Les Cahiers du Digital

#1

Industrie 4.0 : la quatrième révolution industrielle

Tome 1 - Enjeux tehnologiques et économiques

Dorothée Kohler & Jean-Daniel Weisz

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

La collection *Les Cahiers du Digital* a pour but d'enrichir les enseignements prodigués au sein de HEC Liège, grâce à la contribution d'experts qui détiennent une connaissance de terrain reconnue sur des sujets phares liés à la transformation numérique. Les cahiers sont rédigés dans un style clair et abordable, afin de permettre à nos étudiants de saisir correctement les enjeux majeurs de la transformation digitale et d'attiser leur curiosité, afin qu'ils souhaitent explorer davantage la thématique, par le biais, notamment, du travail de fin d'études.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 5

Chapitre 1 - Industrie 4.0 : un storytelling au service d'une transformation 9

Pourquoi une 4ème révolution industrielle ? 9

Le défi de l'informatique industrielle 11

La promesse de l'Industrie 4.0 : concilier les atouts de l'artisanat et de l'industrie de masse 13

Chapitre 2 - Une révolution technologique 19

Le marché des briques technologiques 19

La conception optimisée, le design génératif 21

La maintenance prédictive : produire sans panne 22

L'IA, outil d'optimisation du contrôle 22

Les AGV, l'automatisation des flux internes 23

Le jumeau numérique, des applications tous azimuts 24

Chapitre 3 - L'Usine 4.0 et ses différentes déclinaisons 29

L'hyperautomatisation 29

La différenciation standardisée 30

La modularité adaptative 32

Chapitre 4 - Le passage de la chaîne de valeur à la constellation 39

Une transformation radicale de la chaîne de valeur de l'entreprise 39

L'apprentissage de la coopération comme facteur de compétitivité 42

Vers la compétitivité relationnelle 43

Chapitre 5 - Industrie 4.0 : une reconfiguration des modèles d'affaires ? 49

Une création de valeur industrielle qui s'oriente vers les services 49

Les plateformes de services industriels : nouvelle offre et nouvelle architecture des systèmes d'information 51

La plateforme de services industriels, nouvelle infrastructure du système de production 52

Les plateformes : un enjeu d'indépendance pour l'industrie 54

Introduction[1]

Ces 10 dernières années, l'Industrie 4.0 a pu être envisagée sous un angle presque exclusivement technologique et parfois assimilée à une version *upgradée* de la démarche *Lean* dans l'industrie.

La définition de l'Industrie 4.0 en Allemagne en 2011 : « Produire des biens personnalisés aux mêmes coûts que ceux produits en masse » s'est pleinement inscrite dans un premier temps dans cette logique productiviste. Le fordisme avait permis de créer une formidable croissance économique et sociale au XX^{ème} siècle, le numérique allait immanquablement lui emboîter le pas. Aux gains de productivité qui s'épuisaient allait succéder le nouvel eldorado de la production personnalisée en temps réel.

Mais cette interprétation, déjà trompeuse, devient dangereuse alors que l'Industrie 4.0 et la crise de la COVID-19 font muter en accéléré les chaînes de valeur, les modèles d'affaires, les organisations et la manière de travailler. L'Industrie 4.0 n'est pas une version augmentée du fordisme ou de ses successeurs. Elle mérite pleinement son statut de révolution industrielle car elle met celui-ci sens dessus-dessous et ouvre la voie à une industrie renouvelée.

Face aux approches séquentielles et analytiques, focalisées sur le rythme du budget, l'introduction partielle de briques technologiques et l'attente de la preuve par le calcul d'un retour sur investissement, la nécessité d'une approche systémique et constructiviste de l'Industrie 4.0 ne fait aujourd'hui plus débat. Le biais de cette première interprétation était compréhensible. Le capitalisme est une machine à chercher des gains de productivité partout, avec l'obsession récurrente de la baisse des coûts comme le rappelait récemment Daniel Cohen dans un article du quotidien *Le Monde*[2].

Mais le monde a changé et « l'économie désirable » que nous décrit Pierre Veltz[3], appelle d'autres ressorts pour une hyper-industrie localisée au sein des territoires[4].

Nous analyserons dans ce tout premier *Cahier du Digital* la promesse de l'industrie 4.0 et ses rouages techniques, et proposerons une grille d'analyse permettant de décrypter les différentes déclinaisons de l'Industrie 4.0 à l'échelle des usines. Nous

---

1 Nous tenons à remercier chaleureusement Daniel Atlan, ancien General Manager Human Resources ArcelorMittal Mining, pour nos échanges stimulants, ses apports et son regard critique.

2 Daniel Cohen, « La crise se paye elle-même par les taux bas », *Le Monde*, 24 octobre 2020.

3 Pierre Veltz, *L'économie désirable, Sortir du monde thermo-fossile*, Paris, Seuil, 2021, p.39.

4 Pierre Veltz, *La Société hyper-industrielle. Le nouveau capitalisme productif*, Paris, Seuil, 2017.

observerons également ses impacts sur la chaîne de valeur et les modèles d'affaires avec l'émergence des plateformes.

Ce premier tome sera, par ailleurs, suivi d'un second consacré aux enjeux humains et organisationnels de l'Industrie 4.0, ainsi qu'à la dimension géopolitique de la transparence et de la continuité numériques au sein des filières de production.

Industrie 4.0 : un storytelling au service d'une transformation

CHAPITRE 1

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

Chapitre 1 - Industrie 4.0 : un storytelling au service d'une transformation

L'Industrie 4.0 naît dans la période 2000-2005 à un moment où l'Allemagne s'interroge sur l'avenir de son modèle industriel. Bien que positionné sur du moyen-haut de gamme, le pays est alors confronté à une concurrence exacerbée de nouveaux entrants et, depuis la réunification, à un mouvement de délocalisation vers les pays d'Europe Centrale et Orientale qui déstabilise son tissu industriel, notamment les clusters productifs composés de milliers d'entreprises du *Mittelstand*. La part de valeur dans les exportations produite sur le sol allemand régresse et l'économiste Hans-Werner Sinn parle alors « d'économie de bazar[5] ». Dans le même temps, les ambitions des GAFA s'affirment aux marges de l'industrie et Google est de plus en plus perçu comme une menace. L'alliance des constructeurs allemands pour racheter fin 2015 l'application de cartographie Here afin de ne pas avoir à installer le système Google Map dans leurs véhicules en dit long sur leur crainte de laisser le loup entrer dans la bergerie[6].

Le projet Industrie 4.0 émerge ainsi à travers une large réflexion menée – et cogérée – par des représentants de l'industrie, de la recherche et des pouvoirs publics pour redynamiser les avantages compétitifs de l'industrie allemande dans un contexte de pénurie croissante de main d'œuvre qualifiée.

Pourquoi une 4ème révolution industrielle ?

Entre 2011 et 2019, la place dévolue à l'Industrie 4.0 au sein de la foire de Hannovre, la grande foire généraliste de l'industrie allemande, n'a cessé de croître. Sur ce point, l'Industrie 4.0 apparaît comme une formidable opération de marketing au profit de l'industrie allemande. Mais au-delà du slogan, ce mouvement a également emmené l'ensemble des offreurs de solutions de composants, de machines et d'informatique industrielle vers la construction d'offres labellisées 4.0 et conduit les acheteurs de ces solutions, grands groupes et *Mittelstand* industriel à s'interroger sur l'impact du 4.0 sur leurs schémas industriels et leurs modèles d'affaires.

Mobiliser le tissu industriel allemand a été l'œuvre d'une alliance entre l'Etat – ministère de l'économie (BMWi) et ministère de formation et de la recherche (BMBF)

---

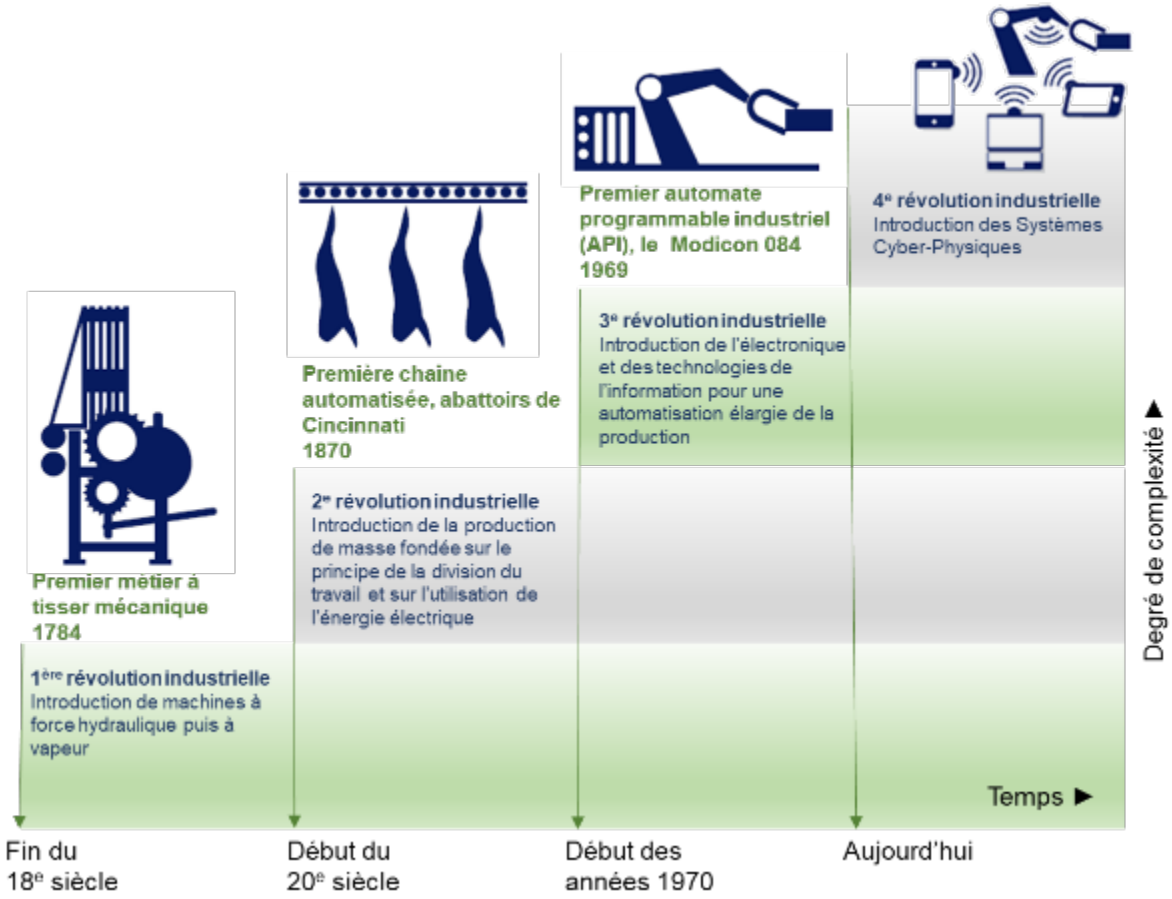
5 Hans-Werner Sinn, *Die Basar-Ökonomie*, Berlin, Econ Verlag, 2005.

6 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *Industrie 4.0 – Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, Paris, La Documentation française, 2016, p. 53.

en tête –, l'industrie et la recherche qui ont collectivement forgé le storytelling autour de l'Industrie 4.0.

La figure ci-dessous est emblématique du récit que les Allemands ont construit autour de l'Industrie 4.0. Celui-ci a été diffusé aussi bien par le gouvernement fédéral et les Länder, que par les milieux industriels, les syndicats et les chambres de commerce. Son message était sans équivoque : la transformation numérique a le statut d'une quatrième révolution industrielle !

Fig. 1 : Les quatre stades des révolutions industrielles



Source : ©DFKI, 2011 issu de Acatech, Forschungsunion, Umsetzungs-empfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, avril 2013, p.17.

L'ambition de l'Industrie 4.0 est de produire des biens personnalisés aux mêmes coûts que ceux de la production de masse, qu'il s'agisse de yaourts, de shampoings, de voitures ou de produits intermédiaires destinés à d'autres industriels.

Dans la logique fordiste, les biens standardisés sont produits avec des gains constants de productivité obtenus grâce à des effets d'échelle et à une organisation du travail qui décompose les tâches à accomplir. La troisième révolution industrielle a été marquée

par l'introduction de la commande numérique et la rationalisation des flux de production. Le 4.0 implique une nouvelle production de flux d'information entre les machines, les hommes et les machines, les machines et les produits, et les produits et les utilisateurs finaux.

Loin de se focaliser sur un catalogue de briques technologiques comme la cobotique, la réalité augmentée, l'impression 3-D, les Allemands se sont attelés à la construction d'une narration autour d'un concept de « système cyber-physique de production » qui est considéré comme le moteur de cette révolution industrielle.

L'Industrie 4.0 réactualise ainsi la vieille utopie cybernétique d'un système capable de maintenir son équilibre sans intervention extérieure à la Norbert Wiener. Ce rêve s'étend à l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en matières, produits, fluides, énergie. Une machine d'extrusion plastique installée à la foire de Hanovre en 2015 est ainsi en mesure d'adapter sa production en fonction du cours de l'électricité sur le marché spot de Leipzig. Une chaîne de production cale automatiquement sa cadence en fonction d'événements logistiques (bouchons, retards de livraison…).

Cette connexion des éléments de l'usine en interne et son ouverture sur l'environnement implique de repenser de fond en comble les schémas d'organisation de l'informatique industrielle.

Le défi de l'informatique industrielle

Le primat donné à la méta-technologie des systèmes cyber-physiques est une spécificité allemande dans la manière d'aborder la transformation numérique. Dans cette vision qui confine parfois à la science-fiction, le système cyber-physique de production désigne une entité virtuelle qui émerge de la capacité des milliers d'éléments de l'usine à se coordonner les uns avec les autres et avec l'environnement extérieur.

Un système cyber-physique de production désigne la capacité des acteurs opérant au sein de l'usine, hommes, machines et équipements, à interagir et à coordonner en temps réel les activités de fabrication, de logistique, d'ingénierie et de management. Il se matérialise par la création d'un jumeau numérique du monde réel permettant de suivre, piloter et ajuster les flux physiques de production.

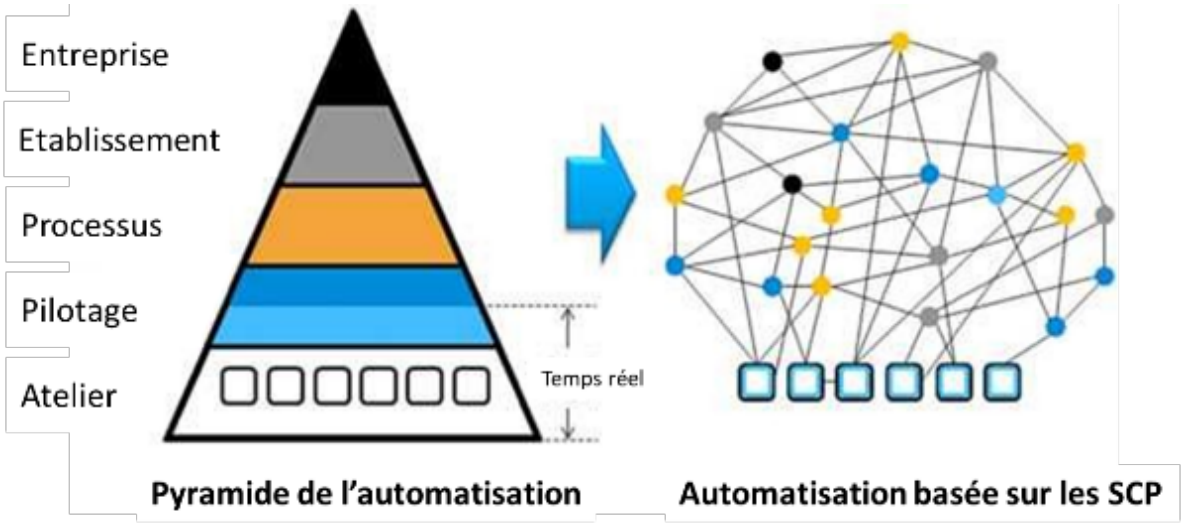
Le défi lancé aux systèmes d'information de production est immense. Il ne s'agit plus de gérer des opérations standard avec une répétabilité maximale, mais de concevoir des process de production spécifiques en fonction de la pièce à produire et des informations reçues de l'environnement en temps réel.

L'Industrie 4.0 remet ainsi en cause la pyramide de l'automatisation qui relie du bas vers le haut les capteurs et actionneurs aux systèmes SCADA[7], aux ERP[8] et *in fine* au système d'information et de décision de l'entreprise, appelé *business intelligence*.

Opérant en temps réel, au rythme de la milliseconde voire de la microseconde, le système doit être entièrement décentralisé pour que les équipements puissent fonctionner de manière autorégulée.

A l'organisation pyramidale succède donc une structure en réseau (cf. Fig. 2)

Fig. 2 – De la pyramide au réseau



L. Forstner, M.Dümmler, Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke – Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0. Elektrotech. Inftech. 131, 2014, pp. 199–201.

A la différence de la 3e révolution industrielle qui avait vu se développer l'électronique et l'informatique dans les usines, l'Industrie 4.0 se caractérise par la mise en réseau de l'ensemble des éléments concourant à la production y compris les différents services.

La production n'est plus composée d'éléments isolés reliés, dans le meilleur des cas, à un système centralisé et vertical de type ERP permettant de remonter les informations de production et de redescendre les instructions de planification. La

---

7 Un système SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) est un système de contrôle et d'acquisition de données qui permet la coordination en temps réel des différentes instances.

8 Un ERP (*Enterprise Resource Planning*) est un outil informatique permettant de gérer l'ensemble des processus de l'entreprise : commerce, comptabilité-finance, ressources humaines, production.

production s'autoorganise de manière autonome et décentralisée au niveau de l'atelier.

C'est cette mise en relation et coordination décentralisées de l'ensemble de ces éléments formant système qui donne à l'Industrie 4.0 sa singularité. A l'instar d'un avion volant en pilotage automatique dont les capteurs alimentent en paramètres de vol des algorithmes recalculant constamment la trajectoire et actionnant les gouvernes, l'usine se trouve pilotée par un système cyber-physique de production. L'usine cybernétique devient à la fois un idéal, un terrain concret d'expérimentation et de transformation, et un lieu où se construisent en temps réel une grande variété de scénarios de production. Cette usine ajuste constamment ses scénarios en fonction des situations de marché et des opportunités.

Dans ce contexte de scénarisation de la production en temps réel, l'exercice budgétaire annuel devient un rituel quasiment anachronique. Ce qui importe c'est la modélisation en amont des différentes partitions qui peuvent être jouées pour coller au plus près aux multiples profils de la demande.

La promesse de l'Industrie 4.0 : concilier les atouts de l'artisanat et de l'industrie de masse

A la différence de la promesse fordiste faite de gains de productivité et de diffusion des biens de consommation que permet l'augmentation concomittante des salaires, la série unitaire pronée par l'Industrie 4.0 se veut une réponse à une production customisée de masse. A la satisfaction des besoins de quelques *happy fews* doit succéder un modèle produisant en masse à la demande avec une forte variété : après les chaussures de jogging coûtant plusieurs centaines d'euros dont la semelle est fabriquée en fonction de la morphologie du pied vient le muesli produit à la demande avec le mélange souhaité par le consommateur.

Dans le monde du B2C[9], l'Industrie 4.0 ne vise pas tant à créer de nouveaux marchés qu'à remplacer des marchés de masse par une production à la demande. A la clé, plus de satisfaction clients et moins de gaspillage. Qu'il s'agisse de livres, de pizzas, de yaourts, de shampoings, de savons, de dentifrices, de produits de coloration pour les cheveux, les rayons des magasins sont remplis de gammes dont une large partie sera jetée si elles ne trouvent pas preneurs dans des délais impartis.

---

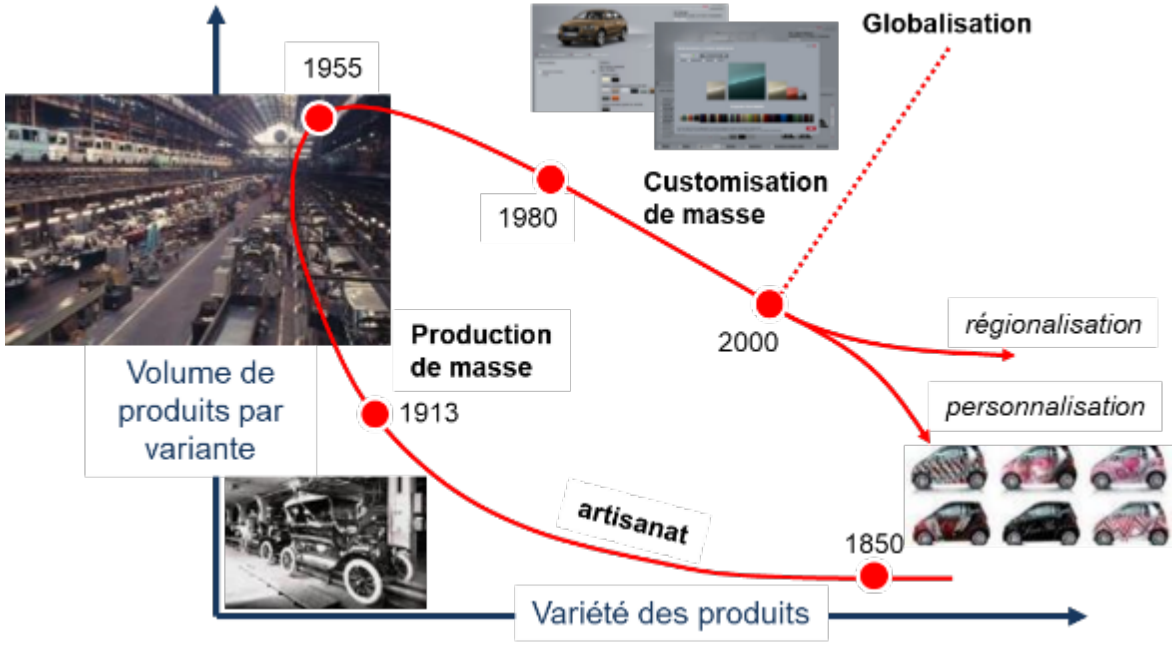
9 L'abbréviation B2C, « *Business to Customer* », désigne les industries qui sont en lien direct avec le client final.

La production unitiaire tend en quelque sorte vers plus de sobriété. La personnalisation cherche à renouer avec les principes de l'artisanat.

La production unitaire est le propre de l'artisanat : forte variété et faible volume. La troisième révolution industrielle poussée par les automates, les machines à commande numérique et les robots n'a pas remis en cause les fondements du fordisme, mais prolongé son dessein d'une standardisation poussée à l'extrême appuyée par des gains constants en termes de coût, de qualité et de délais.

La tendance depuis la seconde moitié du XX^{e} siècle est à une personnalisation croissante de certains biens industriels portée à la fois par la nécessaire adaptation de biens mondiaux aux spécificités locales et par la montée d'une demande de biens individualisés (cf. Fig.3).

Fig. 3 – De l'artisanat à la personnalisation de masse



Source : d'après Yoram Koren, *The Global Manufacturing Revolution, Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, The University of Michigan, 2010.

L'adaptation aux besoins de clients différenciés a été gérée en séparant et en traitant distinctement la partie standard et la partie spécifique des produits. Le secteur automobile qui produit des voitures sous différentes marques à partir de plateformes identiques en est l'exemple phare.

Cette différenciation retardée vise la conquête de nouveaux gains de productivité en répondant le plus rapidement possible aux besoins des clients avec des produits personnalisés.

Avec l'ambition de la série unitaire, l'Industrie 4.0 va bien au-delà de cette différenciation organisée.

Mais comment réussir la série unitaire alors que la petite série et le prototype sont en règle générale le cauchemar des industries fordistes ?

Dans les ateliers, les temps de changement entre la fabrication de deux séries différentes de pièces ou de produits (nettoyage, démontage-remontage des outillages, réglage, relance d'une série…) constituent un enjeu essentiel de productivité dans les usines. Ils peuvent durer de plusieurs heures à quelques jours selon les activités. La prouesse de la série unitaire est obtenue grâce au maillage numérique de l'ensemble de la production. Elle s'ajuste en temps réel au besoin du client et gére la variété des pièces produites. Les changements de série sont de l'ordre de la minute, voire quasi instantanés grâce à la mobilisation de nouvelles technologies.

Une révolution technologique

CHAPITRE 2

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

Chapitre 2 - Une révolution technologique

Il y a maintenant plus de dix ans que le concept Industrie 4.0 a été présenté officiellement à la Chancelière Angela Merkel à la foire de Hanovre. Depuis cet événement, ce terme a fait florès et il existe aujourd'hui sur le terrain, au sein même des entreprises industrielles, des milliers de projets Industrie 4.0 qui prennent des formes très diverses et englobent des périmètres variés en fonction des technologies déployées.

Bien sûr, tous les projets Industrie 4.0 n'ont pas la série unitaire en ligne de mire. Mais ils questionnent le schéma industriel initial pour le rendre plus flexible et adaptatif[10]. « L'industrie 4.0, c'est la fin du câble » anticipent déjà certains industriels pour signifier que les kilomètres d'infrastructures de réseaux câblés seront bientôt remplacés par des technologies sans fil.

Le marché des briques technologiques

Une somme de technologies numériques peuvent être déployées au sein d'un outil de production (cf. figure 4). Labellisées Industrie 4.0, ces briques concernent un projet précis et un département de l'entreprise : production (capteurs spécifiques, maintenance prédictive, robotique avancée, cobots, jumeau numérique…), bureau d'étude (plateformes intégrées de conception et de gestion de projets), logistique (système de suivi et de traçabilité en temps réel). Ce chemin vers la numérisation de l'outil industriel vise à introduire des briques technologiques pour connecter progressivement l'ensemble des éléments concourant à la production.

Ces technologies s'appuient sur l'internet industriel des objets. Ce dernier permet à l'ensemble des éléments connectés de communiquer entre eux, mais également de fournir la base pour de l'intelligence artificielle embarquée dans ces objets. Les algorithmes, procédant de l'analyse linéaire discriminante du clustering ou des réseaux de neurones, sont de plus en plus sophistiqués. Une puissance de calcul croissante leur permet d'exploiter des volumes de données exponentiels, jusqu'à apprendre de leur processus d'essai-erreur : on parle alors d'apprentissage automatique (*machine learning*). L'intégration de cette intelligence artificielle dans de nouveaux outils dote l'outil industriel de nouvelles technologies.

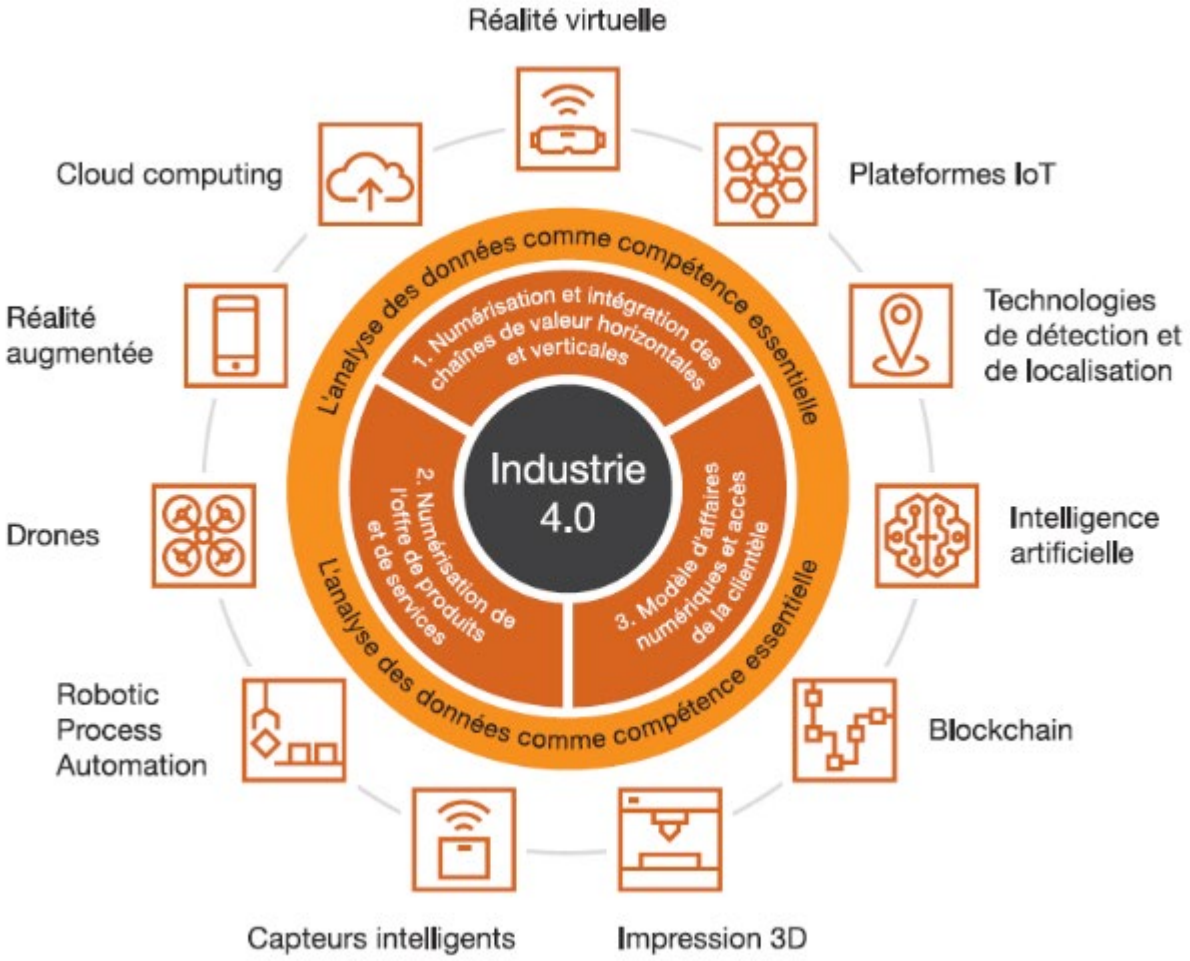
Sur le terrain, nous rencontrons le plus souvent 5 types de technologies en France et en Allemagne. Ils sont représentatifs de l'Industrie 4.0.

---

10 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *op. cit.* p. 31 et p. 97.

- Le design génératif
- La maintenance prédictive
- La vision industrielle
- Les AGV
- Le jumeau numérique

Fig. 4 – Les briques technologiques de l'Industrie du futur



Source : PwC et Agence du Numérique, *Industrie 4.0 : quels sont les facteurs déterminants pour devenir une « industrie du futur » ?*, 2020.

La conception optimisée, le design génératif

En conception assistée par ordinateur, l'optimisation topologique permet d'initier ou de repenser la conception d'une pièce avec à la clé un allègement du produit et des caractéristiques optimisées en termes de déformation thermique et de résonance.

Grâce aux possibilités de calcul et de stockage, le design génératif propose un set de solutions envisageables avec un gain substantiel en termes de temps de développement et de coûts d'industrialisation. Les concepteurs définissent les fonctions et les contraintes et des algorithmes dédiés génèrent plusieurs propositions de conception de la pièce répondant à ces fonctions et contraintes. Les concepteurs peuvent sélectionner celle qui leur apparaît comme la plus adaptée.

La figure 5 montre une application où le gain de poids a été d'environ 30%, où les délais de développement ont pu être divisés par 4 et les coûts d'industrialisation réduits de moitié.

Ces technologies sont souvent couplées avec de l'impression 3D pour répondre à la complexité des formes, difficiles à obtenir avec des procédés de fonderie ou d'usinage classiques.

Fig. 5 – Une trappe pour avion créée par optimisation topologique

Source : Groupe Ventana

La maintenance prédictive : produire sans panne

Dans le processus de production, la maintenance prédictive est une porte d'entrée privilégiée dans l'industrie 4.0 pour les industriels.

La maintenance curative consiste en des interventions destinées à gérer un problème identifié ou une panne. La maintenance préventive regroupe des interventions destinées à prévenir la survenue possible d'un incident en changeant notamment des pièces d'usure dont le temps de cycle approche la durée maximale d'utilisation.

La maintenance prédictive provoque l'intervention de maintenance en fonction d'un incident prévisible. En faisant le lien entre certaines informations de fonctionnement (vibrations, température, bruits), issues de capteurs existants ou spécifiquement installés, et des incidents déjà survenus, les algorithmes permettent de définir des scénarios et des seuils à partir desquels la survenance d'une panne est quasi certaine.

L'IA, outil d'optimisation du contrôle

Dans des industries à forte valeur ajoutée comme l'aéronautique, l'intelligence artificielle est destinée à renforcer l'efficacité du contrôle des pièces.

Une technique de contrôle non destructif comme le ressuage permet de faire apparaître des criques ou des fissures sur des pièces en utilisant un produit qui pénètre à l'endroit où se trouve le défaut. Un contrôle optique identifie les endroits où des défauts apparaissent.

Dans ce cas, les systèmes d''intelligence artificielle permettent de capitaliser sur l'expérience humaine dans la détection des défauts. Une fois des bases constituées qui rassemblent l'ensemble des défauts constatés sur une longue période et le résultat des interprétations passées réalisées par des procédés classiques, les moteurs d'intelligence artificielle sont à même d'identifier les possibles non-conformités et d'alerter les contrôleurs.

Dans d'autres industries, la détection visuelle est au cœur de la création de valeur. Les fabricants de machines industrielles de tri des déchets innovent aussi dans la vision intelligente pour identifier et sélectionner les différentes sortes de plastiques contenues dans un flux de collecte. Dans ce cas, où la compétence humaine de tri reste incontournable pour obtenir le niveau de qualité de tri nécessaire à la valorisation des déchets plastiques, les progrès de l'intelligence artificielle sont nécessaires pour augmenter le degré d'automatisation de ces usines.

Les AGV, l'automatisation des flux internes

Les véhicules autoguidés (AGV – *Automated Guided Vehicles*) sont des chariots électriques guidés par des repères au sol ou directement par géolocalisation. Ils sont autonomes car ils peuvent anticiper des risques de collision et recalculer en temps réel leur trajectoire. Employés en grand nombre dans les entrepôts logistiques ou les centres de tri postaux, ces AGV ont fait leur entrée dans les usines où les parcours sont plus complexes.

Les nouvelles usines dont la conception est guidée par la réactivité à la demande et la déclinaison individuelle des produits font des flux logistiques une variable stratégique. Le système de pilotage de l'entreprise abandonne sa structure verticale et centralisée au profit d'un réseau décentralisé d'entités de production approvisionnées par des AGV.

Fig. 6 – Les AGV chez SEW Usocome

Source : SEW Usocome

L'introduction des AGV conduit à repenser de manière radicale les flux internes de l'usine. Ainsi dans l'automobile, la chaîne de production linéaire où étaient réalisées

les opérations de montage disparaît au profit de multiples îlots disséminés dans l'usine. Le corps de la voiture circule sur un AGV et rejoint ces îlots en fonction des opérations à réaliser.

Chez SEW Usocome, fabricant de moto-réducteurs, la diversité des produits est extrême. Les éléments servant à l'assemblage des pièces circulent sur des AGV entre le stock central automatisé et les postes de montage qui sont organisés en mini-usines au sein du site (figure 6).

Le jumeau numérique, des applications tous azimuts

Le jumeau numérique est un double virtuel d'un élément physique qui reproduit son fonctionnement sur la base de données réelles. Il permet de simuler le processus de production pour évaluer des scénarios et anticiper certains événements de production.

Ce jumeau numérique est très précieux car il permet d'abord d'optimiser des choix de conception en simulant le fonctionnement d'ensembles complexes. Sont ainsi évités les nombreux processus de test, d'essais et d'erreurs, longs et coûteux.

Fig. 7 – Jumeau numérique

Source : Siemens

Le jumeau numérique est ensuite un moyen de simuler le fonctionnement d'un composant, d'un élément, d'un robot, d'une machine existants en fonction de critères multiples : vitesse, température, pression… Cette simulation permet d'optimiser le déroulé d'opérations de production et d'améliorer la maintenance des équipements. Ils sont à la source de nouveaux services : par exemple Dassault utilise en France cette technologie pour optimiser le maintien en conditions opérationnelles de la flotte d'avions Rafale. Dans l'automobile, des jumeaux numériques permettent lors du lancement de nouveaux modèles de simuler des process lors de la mise en service grâce à une montée en cadence virtuelle des lignes de production.

Cette technologie peut également être utilisée pour permettre de nouveaux apprentissages sur une machine complexe au moyen d'un environnement de formation virtuel.

Enfin, un jumeau numérique, même relativement simple est un atout de poids dans un processus d'avant-vente pour permettre à un client de visualiser la solution industrielle proposée, comme par exemple une machine spéciale d'usinage.

Chaque composant d'un système de production peut avoir son jumeau numérique et ces derniers pourront être associés pour créer un jumeau numérique d'un équipement, d'un ilot de production, voire d'une usine tout entière.

Sont ainsi créés des jumeaux numériques d'une machine, d'un moteur (avion, sous-marin), voire d'une ville comme l'ambitionne un projet de Dassault Systèmes avec Singapour.

Au final, ces 5 technologies permettent de réaliser des gains conformes au tryptique coût-qualité-délai :

- réduction des coûts de fabrication par l'amélioration de la productivité des équipements,
- plus grande flexibilité de l'outil de production et une meilleure disponilibité des machines liée à une baisse du coût de la maintenance,
- réduction des coûts liés à la non-qualité avec l'amélioration du fonctionnement des équipements et des systèmes de contrôle,
- réduction des coûts de stockage et des coûts logistiques grâce à la production en temps réel.

Ces technologies réduisent également les coûts de complexité dûs à la variabilité des produits et elles permettent d'aller dans le sens de la série unitaire qui est la finalité 4.0. Plus que par une somme ou un catalogue de technologies, c'est par rapport à cette finalité qu'il semble le plus opportun de construire et d'ordonner les différentes configurations de l'Industrie 4.0 observées sur le terrain.

L'Usine 4.0 et ses différentes déclinaisons

CHAPITRE 3

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

Chapitre 3 - L'Usine 4. 0 et ses différentes déclinaisons

Au-delà des technologies mises en œuvre et face à l'extrême diversité des projets Industrie 4.0, est-il possible de se donner une grille d'analyse qui caractérise ses formes de déploiement au sein des usines ?

L'Industrie 4.0 se singularise surtout par la réduction des coûts de complexité, liés à la gestion de la variété des produits, qui est au cœur de sa promesse et où résident la plus grosse part des gains attendus. C'est pourquoi il nous a semblé pertinent de chercher à dégager les différentes déclinaisons de l'Industrie 4.0 en les classant selon une double logique de taille de série et de variété requise (cf. Fig. 8). Face au foisonnement des projets Industrie 4.0, nous proposons ainsi une grille de lecture synthétique qui les regroupe en 3 modèles :

- l'hyperautomatisation,
- la différenciation standardisée
- la modularité adaptative

L'hyperautomatisation

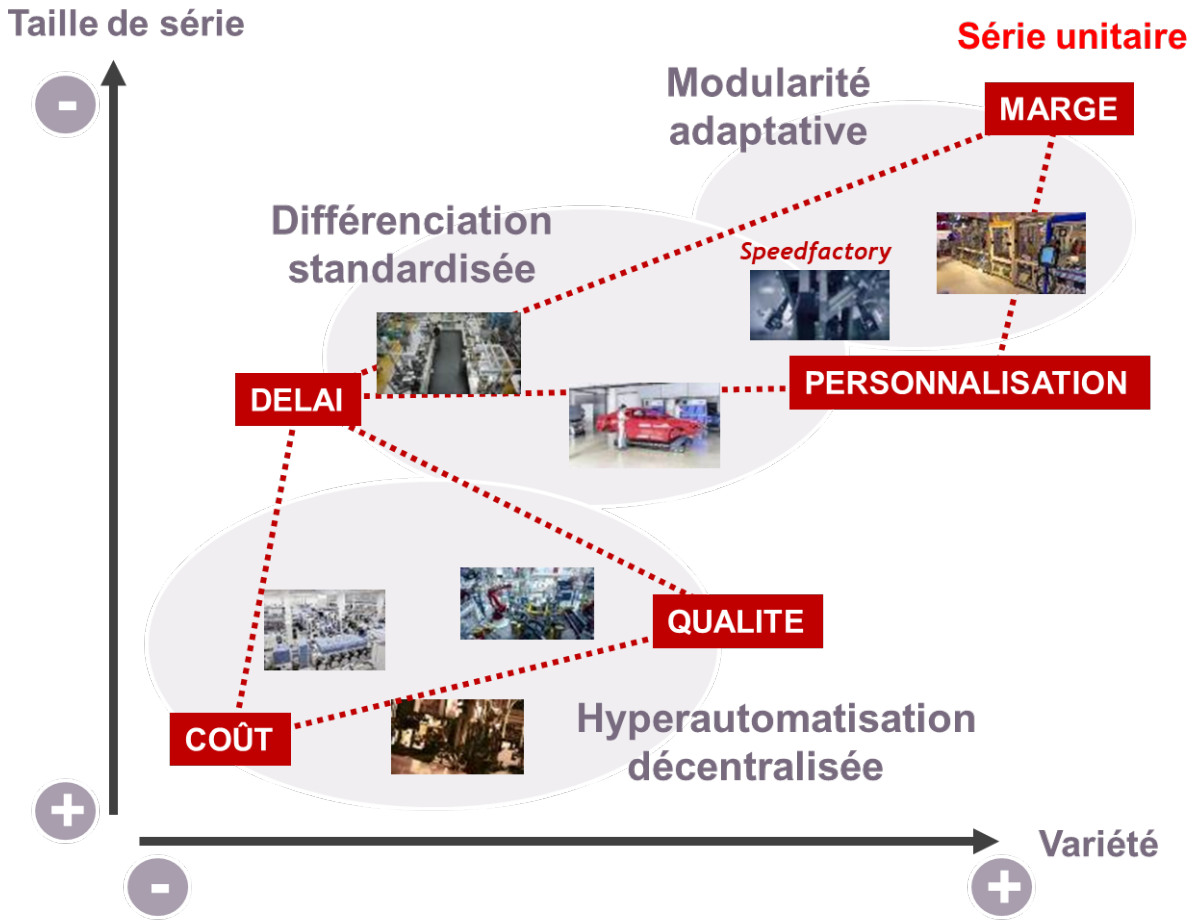
L'hyperautomatisation concerne des activités de fabrication en grande série (cartes électroniques, injecteurs pour moteurs diesel…) fortement automatisées et dont les chaînes de production ont été équipées pour assurer la continuité numérique du processus de fabrication, grâce notamment à la RFID[11]. La finalité est de pousser à l'extrême le tryptique coût-qualité-délai avec une transparence quasiment totale sur les opérations de production. Par exemple, le donneur d'ordre, un constructeur automobile, suit en temps réel la production chez son fournisseur, sous-traitant de rang 1. L'ensemble de l'usine peut-être modélisé sous la forme d'un jumeau numérique et les opérationnels comme les décideurs suivent en temps réel leurs paramètres de production.

Dans ce modèle, le flux de production reste linéaire et la maintenance préventive ou prédictive, tout comme le contrôle des pièces assisté par l'intelligence artificielle sont centraux pour assurer le bon déroulement des opérations.

---

11 RFID, pour *Radio Frequency Identification*, est une technologie d'identification des produits et des équipements par radiofréquence.

Fig. 8 – Les trois déclinaisons de l'Industrie 4.0



Source : Dorothée Kohler et Jean-Daniel Weisz (2021) ©KOHLER C&C.

Les industries traditionnellement fortement automatisées, comme l'électronique ou l'automobile, sont représentatives de ce modèle. L'usine d'Amberg en Bavière, dédiée à la fabrication de cartes électroniques Simatic pour les systèmes d'automatisation Siemens, a ainsi longtemps été une vitrine 4.0 de la marque. Les maîtres-mots y sont un taux de rebuts de l'ordre de quelques pièces par millions et un taux d'automatisation proche de 75%.

La différenciation standardisée

Le second modèle, la différenciation standardisée, regroupe des usines qui se sont organisées pour produire une très grande variété de produits avec souvent plusieurs

millions de possibilités. Le flux de production n'est plus linéaire mais éclaté en de multiples ilots ou en plusieurs mini-usines.

Fig. 9 – L'usine Siemens d'Amberg

Source : Siemens AG

Ce système est entièrement décentralisé et l'ordonnancement de la production se modifie en temps réel. L'impact des aléas de production est considérablement réduit par rapport à un flux linéaire et cette organisation permet de gérer la variété en temps réel selon des gammes de fabrication préétablies.

Dans l'usine pilote Audi d'Ingolstadt, les caisses des voitures en production circulent sur des AGV et les opérations de montage sont réalisées au sein d'ilôts autonomes (cf. figure 10). C'en est fini de la chaîne arrêtée à cause d'un incident de production. Le flux de production peut se reconfigurer en temps réel au rythme des aléas de production ou des décisions des clients. Jusqu'à un stade avancé de la production, le client peut encore modifier un choix d'options ou de variante.

Ce modèle se retrouve également dans l'industrie agro-alimentaire où il ne s'agirait plus de produire des batches d'un produit donné, mais de le fabriquer à la demande selon l'envie du consommateur. Par exemple, Siemens présentait à la foire de Hanovre

de 2018 un démonstrateur permettant de fabriquer un yaourt aux fruits dont la composition est adaptée en fonction de la demande du client. Au-delà de sa capacité à répondre à la demande de personnalisation, ce modèle évite de fabriquer des grandes quantités d'un même produit qui ne seront peut-être pas toutes vendues.

Fig. 10 – L'usine Audi d'Ingolstadt

Source : Wewo technomotion

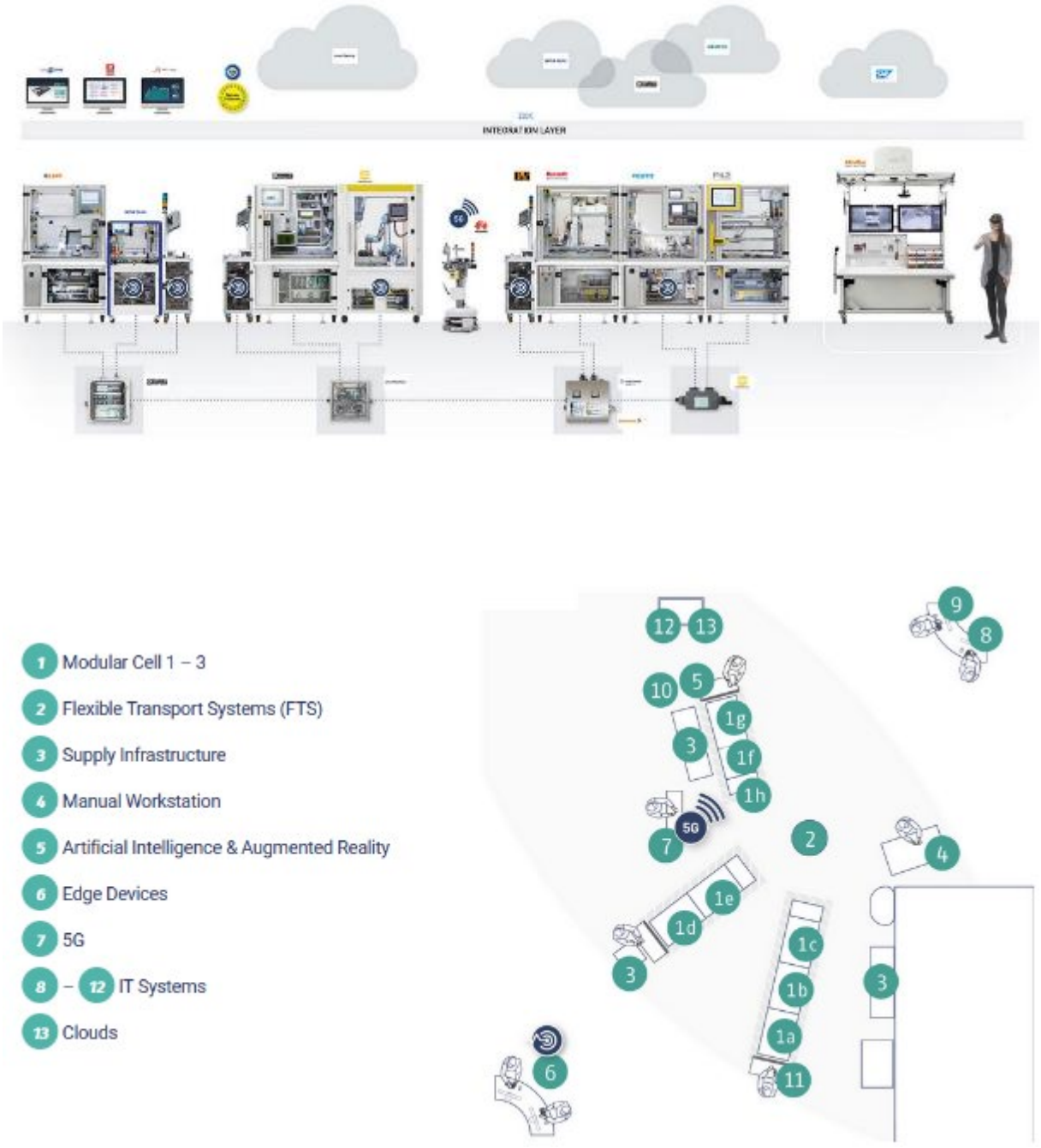
La modularité adaptative

Le troisième modèle, la fabrication modularisée et autonome, est pour ainsi dire le graal de l'Industrie 4.0. Dans ce modèle, la gamme de fabrication n'est pas un prérequis. Le système de production va s'organiser de manière autonome pour personnaliser le produit.

Dans la pratique, cette utopie de la série unitaire personnalisée et conçue avec le client reste du domaine des fab labs et des démonstrateurs, tels que la Smart Factory de l'Institut allemand de recherche en intelligence artificielle de Kaiserslautern (DFKI).

Ce démonstrateur résulte de l'assemblage de différentes technologies avec l'appui d'instituts de recherche. Il s'agit d'installations modulaires fonctionnant en mode *plug and work* montées à partir de composants standard.

Fig. 11 – Le démonstrateur Smart Factory KL



Source : Smartfactory KL

Avec près de 45 partenaires issus de l'industrie et de la recherche rassemblés au sein du projet, ce démonstrateur regroupe 2 ilots de production et une station de travail manuel reliés par un système de transport flexible[12]. Un produit est fabriqué en passant successivement sur les modules issus de fabricants différents : Bosch Rexroth, IBM, Cisco, Festo, Pilz, Phoenix Contact, Harting, Lappkabel… (cf. figure 11). Ces modules sont tous capables de décrypter en temps réel les informations transmises par le produit à partir d'une puce RFID contenant les spécificités de sa fabrication et le calibrage des machines[13].

Les démonstrateurs n'ont rien de spectaculaire en soi et chacun peut prendre des photos, le spectaculaire réside dans l'interopérabilité de ces machines de fabricants différents et en amont dans l'expérimentation collective de la fabrication du produit pour parvenir à combiner ces expertises souvent concurrentes. Ce n'est donc pas ce qui est produit qui est spectaculaire mais l'apprentissage d'un processus de conception et de fabrication collectif.

Ce qui frappe le visiteur face à ces démonstrateurs, c'est le nombre d'acteurs impliqués tant dans le monde industriel que dans celui de la recherche. « Expérimenter ensemble » est un mot d'ordre qui a su trouver des traductions très concrètes sur le terrain. Le démonstrateur met en avant un partage de ressources au sein de différentes entreprises de taille différente. La juxtaposition des logos de société apporte la preuve qu'il a été possible d'être en rupture sur le processus même d'innovation. L'idée est de créer des champions de l'Industrie 4.0 et de communiquer vers l'extérieur la capacité à créer un leadership collectif. Par ailleurs, le démonstrateur a également vocation à essaimer et à produire des moyens efficaces de réplication[14].

L'objectif du démonstrateur Smart Factory KL est double : illustrer la faisabilité d'un système de production modulaire et donner à voir la capacité d'interconnexion et d'interopérabiité de systèmes proposés par des offreurs de solutions différents.

Au final, ces trois déclinaisons de l'Industrie 4.0 – hyperautomatisation, différenciation standardisée, modularité adaptative – sont moins à considérer comme des stades de développement devant être successivement parcourus pour atteindre l'horizon de la série unitaire que comme des modèles pouvant cohabiter au sein d'un même schéma industriel de filière ou au sein d'un même groupe industriel. La production unitaire est souvent le dernier stade d'une chaîne de valeur tournée vers le client et la question se

---

12 Plus d'information sur le site du démonstrateur : https://smartfactory.de/en/industrie-4-0-plant/industrie-4-0-plant-2018/

13 Dorothée Kohler et Jean-Daniel Weisz, « Décrypter la naissance de l'Industrie 4.0 en Allemagne et ses enjeux », dans Wolfgang Asholt, Mireille Calle-Gruber, Edith Heurgon et Patricia Oster-Stierle (dir.), *Europe en mouvement. Nouveaux regards,* Paris, Hermann Editeurs, 2018, pp.193-212.

14 Dorothée Kohler et Jean-Daniel Weisz, *ibid.*, pp.206-208.

pose alors de la reconfiguration de cette chaîne en fonction des besoins de personnalisation en aval.

Le passage de la chaîne de valeur à la constellation

CHAPITRE 4

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

Chapitre 4 - Le passage de la chaîne de valeur à la constellation

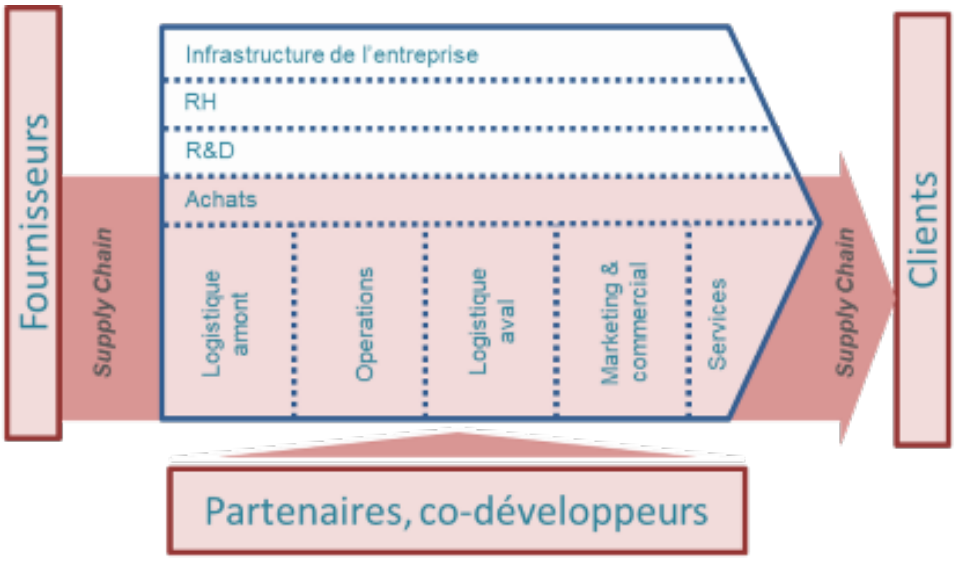
Quelle que soit la configuration d'Industrie 4.0, elle transforme en profondeur la chaîne de valeur de l'entreprise. La continuité numérique abolit les silos entre les fonctions de l'entreprise, entre les bureaux et l'atelier.

Une transformation radicale de la chaîne de valeur de l'entreprise

Michael Porter a donné une représentation de cette chaîne de valeur sous la forme d'un continuum linéaire, ordonné, séparant les activités de production et les activités de support et avec à chacune de extrémités, les fournisseurs et les clients (cf. figure 12).

Dans un monde analytique où l'ordre hiérarchique prévaut, le travail suit des processus et des procédures normées. Les objectifs sont découpés en tâches pour permettre de maîtriser et contrôler chaque composante. L'attention portée aux budgets, au respect des processus et des procédures consomme une grande partie du temps. L'amélioration continue et les rituels de meilleure pratique permettent de progresser Les indicateurs de qualité, coûts et délais servent à mesurer les progrès accomplis.

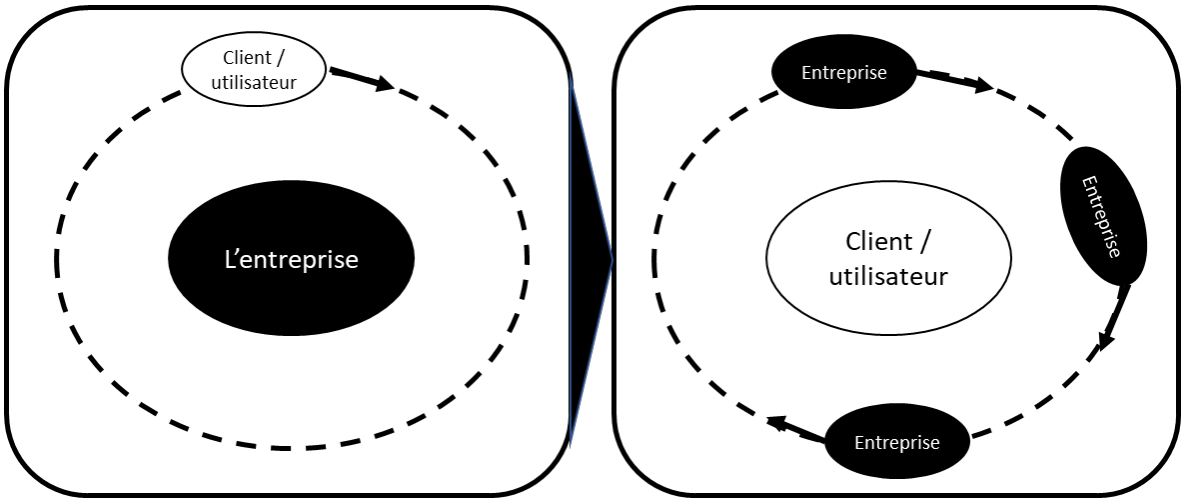
Fig. 12 : La chaîne de valeur hier



Source : Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *Industrie 4.0, les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, Paris, La Documentation française, 2016, p.42.

Dans cette configuration, l'industriel se considère comme l'épicentre de l'écosystème et les clients gravitent autour de lui comme l'illustre Steve Denning (cf. figure 13). Les nouvelles technologies, l'accélération des changements et des innovations bousculent cet ordre bien établi. Steve Denning pointe la révolution copernicienne qui est en train de s'accomplir en inversant la relation de pouvoir entre industriels et clients. Désormais les industriels gravitent autour des clients et leur trajectoire dépendra de leur capacité à créer de la valeur pour les clients.

Fig. 13 : La révolution copernicienne du management



Source : Steve Denning, « What 21st Century Management Looks Like », *Forbes*, 20/09/2020.

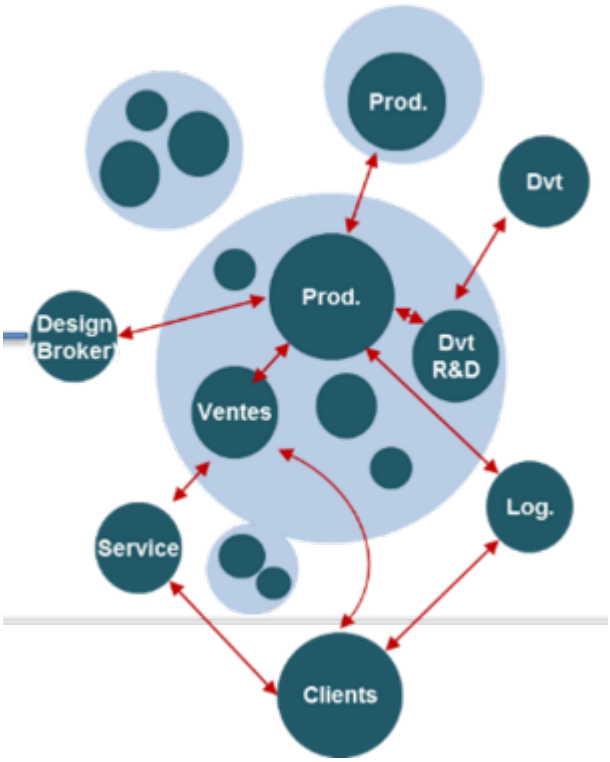
Le changement du paysage économique provoqué par la révolution numérique rend cette organisation figée et cloisonnée entre les fonctions support et les opérations de fabrication, décalée et inopérante dans un environnement où la scalabilité, la réactivité et l'adaptabilité de la chaîne de valeur vont être recherchées.

Nous passons d'un schéma où l'entreprise est auto-centrée sur ses savoir-faire techniques et où les ordres sont donnés à chaque service par le dirigeant à un schéma où les clients deviennent le « boss » de l'organisation. Ce changement de donne, implique un « *reset* » de la chaîne de valeur, de sa structure et de son fonctionnement mais également de la culture managériale.

Un des pères de l'Industrie 4.0 en Allemagne, Henning Kagermann propose de représenter dorénavant l'organisation en entités indépendantes, sortes d'archipels, reliées entre elles (cf. figure 14). C'est désormais la qualité de l'interaction qui crée la valeur. L'efficacité des interactions demande des circuits courts. Certains métiers s'autogèrent, interagissent directement avec le client, expérimentent notamment à partir de méthodes inspirées du *design thinking*. Il y a un cadrage collectif et commun

de la problématique à traiter en lien avec le contexte, puis une phase de diagnostic est menée pour comprendre à l'épreuve du terrain, ce qui coince et ce qui fonctionne bien. Nourries de l'observation, de premières expérimentations sont menées pour identifier les vrais enjeux et pouvoir designer la solution la plus appropriée. Les équipes réalisent de nouveaux apprentissages avec le client et apprennent à se mouvoir dans un écosystème complexe en testant différents scénarios de résolution de problème. Il ne s'agit plus de s'exécuter pour répondre à un cahier des charges défini dans le cadre d'une stratégie extrapolée à partir d'une duplication du passé.

Fig. 14 : L'éclatement de la chaîne de valeur en archipels



Source : Henning Kagermann, *Impuls – Zukunftstbild Industrie 4.0,* Bitkom Kick-Off „Industrie 4.0", Berlin, 9 janvier 2013.

L'architecture de l'entreprise se désintègre, s'étend et articule des archipels focalisés sur des spécificités métier : la fabrication, le développement et l'innovation ou la logistique. Le système cyberphysique ne s'arrête pas aux frontières de l'usine. Il s'interconnecte avec les systèmes de suivi des flux logistiques et pénètre les usines des fournisseurs et des donneurs d'ordres. Le client peut ainsi suivre en temps réel l'état d'avancement de la production des pièces qui lui sont destinées chez son fournisseur. L'entreprise du fournisseur devient « transparente ». L'usine d'assemblage de moteurs diesel de Volkswagen, par exemple, dispose des informations en temps réel concernant la fabrication des injecteurs chez Bosch, du niveau de qualité, du niveau de stock. Le constructeur dispose du suivi de ce qui est

en cours de fabrication chez ses équipementiers, il est présent virtuellement dans l'usine et donc en position de contrôle.

Il est certain qu'une entreprise centenaire dont la vie est rythmée et absorbée par des exercices budgétaires, le lancement de campagnes de réduction de coûts, des vagues répétées d'externalisation de fonctions considérées comme ne faisant pas partie du cœur de métier, avec une innovation réduite, une faible intensité de design, une veille concurrentielle ponctuelle et une relation client distendue, sera fortement menacée dans ce nouvel environnement. A contrario, la performance de l'entreprise va de plus en plus dépendre de la qualité des interactions avec les différentes communautés de clients, de la capacité à capturer l'évolution des marchés en temps réel, à anticiper les facteurs de rupture, à redéfinir le positionnement de son modèle d'affaires et, pour les salariés, redéfinir les conditions d'appropriation de nouveaux apprentissages et de nouvelles compétences. Les hiérarchies freinent la coopération en contrôlant le flux d'informations et de connaissances. Comme l'explique Yaneer Bar-Yam dans *Complexity Rising*[15], les hiérarchies ont une utilité décroissante à mesure que la complexité augmente. La coopération crée les connexions latérales nécessaires à la réussite du travail dans un environnement complexe.

L'apprentissage de la coopération comme facteur de compétitivité

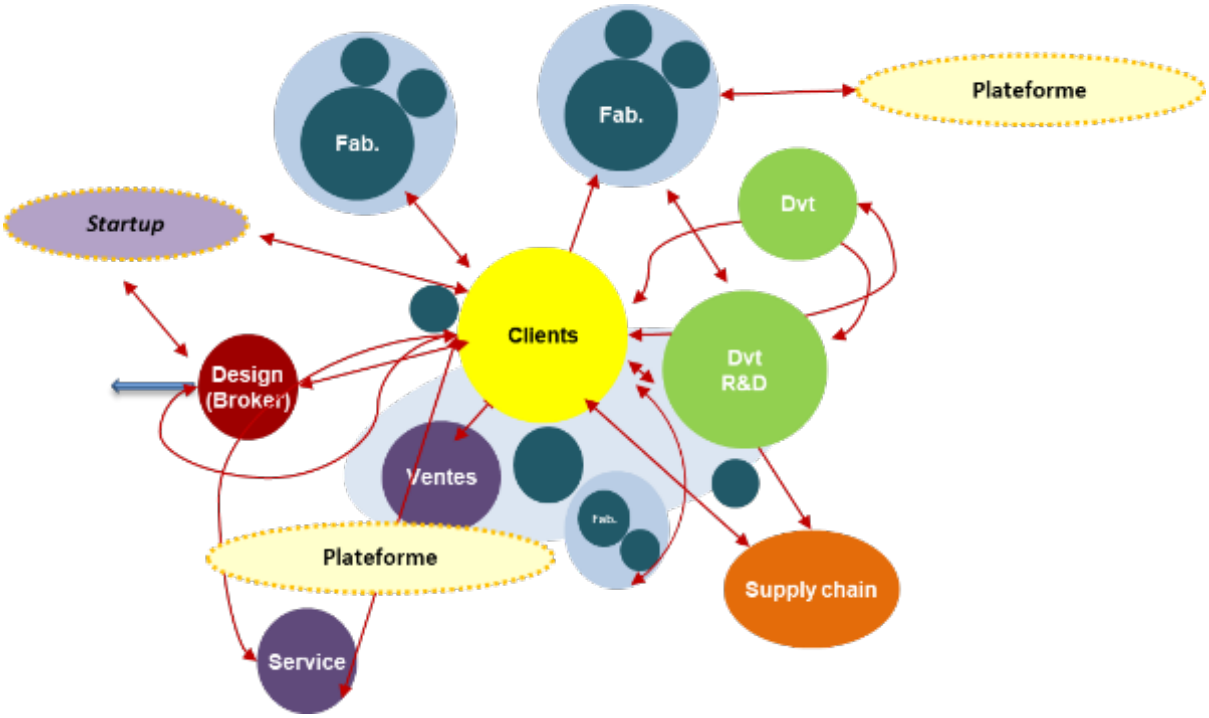
Le monde du 4.0 est d'abord fait de mises en relation. Au-delà des silos, c'est aux interstices entre les fonctions, entre les périmètres d'application, entre les filières que se crée une nouvelle valeur. Dans ces interstices naît l'hybridation entre filières industrielles comme par exemple entre la santé et le textile ou entre la construction mécanique et l'informatique ou entre l'informatique et l'agriculture. Des alliances se créent, détournant la chaîne de valeur et provoquant des sorties de route hors du périmètre *stricto sensu* de la filière.

Par exemple, l'usine Audi de Neckarsulm fabrique l'Audi A6. Une fois que la caisse de l'automobile est passée en peinture, les portières des voitures sont expédiées à 5 kilomètres de là, à Offenau, pour que soit assemblé l'ensemble de leurs composants et équipements. Les portières reviennent en sortie de chaîne pour être remontées sur la caisse avec laquelle elles ont été peintes. Le plus surprenant dans cet exemple n'est pas la prouesse industrielle en termes d'organisation du flux, mais plutôt le partenaire auquel ont été confiées ces opérations industrielles. Il s'agit de DHL, opérateur

15 Yaneer Bar-Yam, "Complexity Rising: From Human Beings to Human Civilization, a Complexity Profile", *Encyclopedia of Life Support Systems*, 1997.

logistique. Le choix de lui confier les opérations de montage des portières est motivé par deux raisons : sa compétence logistique pour l'approvisionnement d'une grande quantité de pièces à assembler, d'une part, son rattachement à la convention collective tarifaire de la logistique et non de la métallurgie, d'autre part. Le constructeur Audi bénéficie d'un différentiel compris entre 20 et 25 % entre les deux conventions tarifaires.

Fig. 15 : La nouvelle constellation de valeur



Source : Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, « Industrie 4.0 comment caractériser cette 4ème révolution industrielle et ses enjeux », *Réalités industrielles, Annales des Mines*, novembre 2016, p. 56.

Vers la compétitivité relationnelle

Si la pression sur les coûts s'exerce de manière accrue avec la crise de la Covid avec des exigences de gains de 15 à 20 %, la capacité à nouer des alliances, des partenariats joue un rôle croissant. Comme Pierre Veltz le souligne, « [les grandes entreprises] ont progressivement découvert que les formes tayloriennes d'organisation fortement routinisées, très efficaces en environnement stable, se révélaient au

contraire de plus en plus inadaptées aux nouveaux contextes concurrentiels et technologiques[16] ».

Nous observons chez les donneurs d'ordres de certaines filières comment les entreprises mères deviennent des têtes de réseau. Elles se délestent de plus en plus des fonctions de fabrication et d'assemblage, confiées aujourd'hui à des sous-traitants, pour se concentrer sur les fonctions de commandement, avec une montée en puissance des fonctions de chaînes d'approvisionnement, d'innovation, de design et de marketing.

La quatrième révolution industrielle rebat les cartes de la compétitivité. Au-delà des compétitivités coût et hors-prix, elle contribue à l'émergence d'une troisième forme de compétitivité que nous nommons : la compétitivité relationnelle[17]. Cette compétitivité relationnelle est fondée sur des modes d'interactions spécifiques entre acteurs économiques à l'intérieur et à l'extérieur de la chaîne de valeur : relation avec l'écosystème, avec les fournisseurs, avec les communautés de clients, avec les salariés, relation avec des partenaires de développement (instituts de recherche, universités, start-ups…), relation avec des filières adjacentes. La capacité à s'allier, à s'hybrider avec d'autres métiers, est considérée dorénavant comme une des composantes clefs de la performance entrepreneuriale.

Face aux coûts et aux délais nécessaires pour internaliser des compétences dans les domaines de l'informatique industrielle, de l'exploitation des données, du design, de la simulation 3D, du prototypage, de nombreux chefs d'entreprise optent pour une nouvelle stratégie qui les amène à rechercher de nouveaux alliés. Par exemple, l'entreprise Vathauer, leader de niche sur le marché des systèmes d'entraînement mécaniques, électroniques et mécatroniques pour des systèmes de convoyage, s'allie avec Weidmüller, de taille beaucoup plus grande, spécialisée dans la connectique industrielle, pour élaborer un produit appelé Energy Recovery System (ERS) qui permet jusqu'à 78% d'économies d'énergie en récupérant et en réinjectant dans le réseau électrique, l'énergie générative du moteur. Cette innovation, fertilisation croisée, permet de proposer des systèmes de convoyage composés de différents modules à propulsion autonome pilotés de manière totalement décentralisée[18].

---

16 Pierre Veltz, *La Société hyper-industrielle. Le nouveau capitalisme productif*, Paris, Seuil, 2017 ; et « La société hyperindustrielle et ses territoires », *Futuribles*, n° 409, novembre-décembre 2015, p. 13.

17 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *Industrie 4.0 – Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, Paris, La Documentation française, 2016, p. 141 et Dorothée Kohler et Jean-Weisz, « La compétitivité relationnelle, enjeu de la révolution numérique », *Les Echos/Le Cercle*, 5 avril 2016.

18 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *ibid.* p. 97.

Les entreprises familiales allemandes anticipent déjà la montée en puissance de cette compétitivité relationnelle : selon une étude, elles estiment que l'Industrie 4.0 les amènera à coopérer d'ici 5 à 10 ans avec plus de 70 nouveaux partenaires[19].

Au sein du cluster It's OWL[20] situé en Westphalie orientale, environ 100 entreprises bénéficient des retombées technologiques de projets développés avec l'appui des laboratoires de l'Ecole d'enseignement supérieur d'Ostwestfalen-Lippe et de l'Université de Paderborn.

Ce n'est donc pas le moindre des paradoxes de cette révolution numérique que d'imposer un renforcement des coopérations, des relations, des interactions humaines alors que les outils numériques ont souvent été exploités pour supprimer les intermédiaires. Autrement dit, la désintermédiation liée à la numérisation a pour pendant le renforcement de la valeur des interactions humaines.

Cet éclatement de la chaîne de valeur et cette hybridation des filières lancent un puissant défi aux institutions gouvernant les relations industrielles, et de manière plus générale aux organisations défendant des intérêts collectifs. Derrière ces évolutions techniques s'annonce une reconfiguration de la répartition du pouvoir économique au sein des filières. Si demain le donneur d'ordres est en mesure de pister la construction de la valeur ajoutée chez ses fournisseurs de rangs 1, 2, 3, 4…, l'asymétrie d'information disparaîtra et réduira d'autant les marges de manœuvre des sous-traitants. Il est même possible d'imaginer des filières dont le pilotage sera largement assuré par le donneur d'ordres. C'est le sens des déclarations de Bernard Charlès, directeur général de Dassault Systèmes, après la signature d'un contrat de 30 ans avec Boeing pour la mise en place de sa plateforme numérique 3DExperience : « Boeing pilotera, de bout en bout, tous les niveaux de sous-traitance, des plus grands aux plus petits partenaires… Il sera en mesure d'imposer et de contrôler les flux d'échanges entre ses divisions, avec ses partenaires et entre ses partenaires… On ne travaille plus en fonction de la chaîne de sous-traitance, mais de la chaîne de valeur[21]. »

L'Industrie 4.0 ne se limite donc pas à la remise en cause des schémas industriels et des feuilles de route technologiques. Comme ces exemples le montrent, elle amène à repenser chaque chaîne de valeur industrielle, à définir un nouvel entrelacs d'interactions et à faire l'apprentissage de la coopération. Coopérer signifie être capable d'aller explorer des sentiers à la périphérie de l'entreprise, savoir repérer les

---

19 „Industrie 4.0 : Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm Autonomik für Industrie 4.0", Berlin, BMWi, mars 2015.

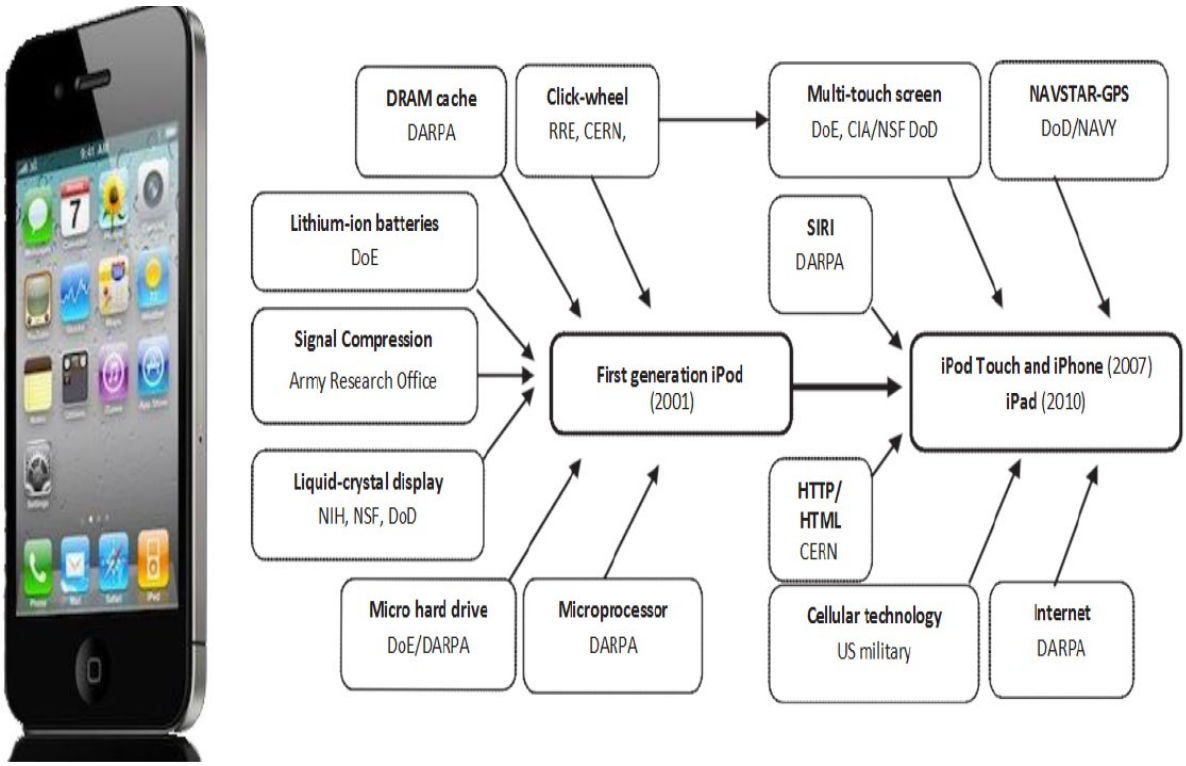
20 https://www.its-owl.de/home/

21 « Boeing conclut un contrat de 1 milliard de dollars avec Dassault Systèmes », *Le Monde*, 25 juillet 2017.

liens que peut tisser l'entreprise pour la faire grandir. Cela implique aussi de sortir des métaphores guerrières (marchés cibles, chaînes de commandement, chasser,….) pour partager des savoirs, des expériences et non plus seulement « travailler ensemble ». Coopérer, c'est être attentif aux qualités émergentes qui naissent dans un collectif.

Un dernier exemple emblématique : la conception de l'Iphone n'a été possible que parce qu'Apple a su récupérer et fédérer des efforts de recherche d'horizons très différents : la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), l'Army Research Office, le CERN. Cet exemple met en évidence comment l'innovation dans ce nouvel environnement a nécessité de grands talents pour récupérer, intégrer, mailler les recherches réalisées dans les univers publics et privés.

Fig. 16 : Qu'est-ce qui rend l'iphone aussi smart ?



Source: Mariana Mazzucato (2015) : *The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths*, PublicAffairs, U.S., United States p.109.

Industrie 4.0 : une reconfiguration des modèles d'affaires ?

CHAPITRE 5

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université

Chapitre 5 - Industrie 4.0 : une reconfiguration des modèles d'affaires ?

En affirmant vouloir réaliser des séries unitaires aux mêmes coûts que ceux de la production de masse, l'Industrie 4.0 affiche une ambition qui questionne aussi bien le schéma industriel de l'entreprise que sa chaîne de valeur. La continuité numérique ne s'arrête pas aux bornes de l'entreprise mais inclut en aval le client et en amont l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. En faisant circuler la donnée tout le long des chaînes de valeur, elle permet de collecter les informations sur les usages des clients et de construire une offre diversifiée.

Une création de valeur industrielle qui s'oriente vers les services

La continuité numérique offre un vaste champ pour le développement de services autour de l'usage des produits aussi bien pour les entreprises B2C que B2B[22].

Dans le monde du B2C, le développement de l'économie des usages ou de la fonctionnalité tend d'abord vers une logique de sobriété[23] : moins de voitures seront produites puisqu'elles seront partagées entre de multiples utilisateurs. Mais de nombreux services peuvent être développés autour de l'usage, parfois plus rentables que la vente de biens industriels. Dans ce cas, le fabricant a intérêt à ce que le produit, support de son service, dure le plus longtemps possible et soit *upgradable*.

Dans le monde des équipements industriels, les fabricants réalisent depuis de nombreuses années l'essentiel de leurs marges, non plus sur la vente de machines mais grâce aux services afférents : maintenance, pièces de rechange, optimisation, *upgrade*…Certains développent des offres de service à la carte, à l'image de Jungheinrich qui, pour ses chariots élévateurs, propose des contrats Activ avec 4 niveaux de service (cf. figure 17), réduisant le risque et le coût d'une immobilisation des machines[24]. Ces services s'organisent autour d'une application de gestion d'un parc de chariots élévateurs appelée ISM online[25].

---

22 B2C (*Business to Customer*) désigne des entreprises qui vendent leur production au consommateur final, B2B (*Business to Business*), des entreprises qui vendent à d'autres entreprises industrielles des composants, des équipements...

23 Pierre Veltz, *L'économie désirable, Sortir du monde thermo-fossile*, Paris, Seuil, 2021, p.39.

24 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *Der Deutsche Mittelstand in Frankreich*, Wiesbaden, 2019, p. 141.

25 ISM Online est une application sécurisée qui donne une vision de parc de chariot sur l'ensemble des sites avec les données commerciales et techniques des chariots et le suivi de leurs coûts d'exploitation, même s'ils ne sont pas de la marque Jungheinrich.

La connectivité permet désormais de suivre en temps réel l'état de santé et l'usage des équipements, ouvrant la voie à de nouveaux services comme la maintenance prédictive. Ces services ne sont toutefois pas seulement un simple enrichissement de l'offre : ils modifient en profondeur le modèle d'affaires des entreprises. En effet, vendre des heures d'usage d'une machine ou un nombre de pièces à l'aune d'une performance garantie plutôt qu'une machine installée dans des locaux, vendre des heures d'éclairage d'atelier plutôt que du matériel d'éclairage industriel, vendre des kilomètres parcourus plutôt que des pneus, tout cela est un nouveau métier, avec des implications financières et numériques importantes[26].

Fig. 17 : L'offre de services pour la gestion d'un parc de chariots élévateurs

Source : Jungheinrich.

L'entreprise doit acquérir de nouveaux savoir-faire pour proposer des contrats où la gestion du risque et l'ingénierie financière deviennent centraux

26 Pierre Veltz, *L'économie désirable, Sortir du monde thermo-fossile*, Paris, Seuil, 2021.

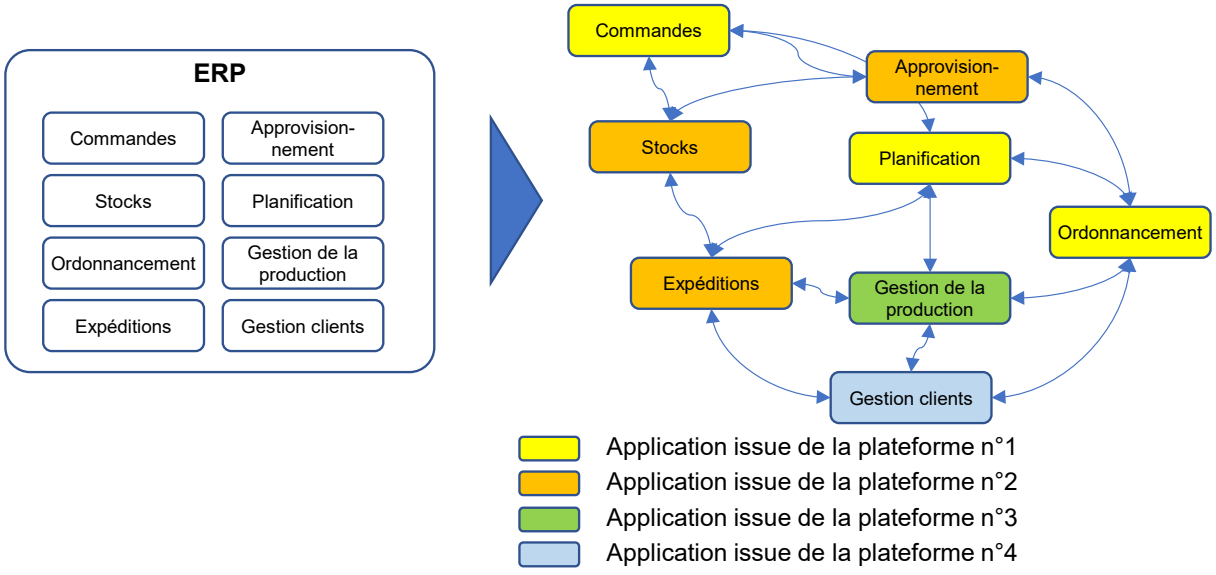
Les plateformes de services industriels : nouvelle offre et nouvelle architecture des systèmes d'information

En parallèle, ces services liés au numérique proposés avec les équipements deviennent interopérables avec le système d'informatique industrielle de l'entreprise et ils empiètent progressivement sur le territoire des logiciels de gestion d'entreprise.

Ces services sont le plus souvent regroupés sur des plateformes d'applications qui peuvent être dédiées à un seul offreur de solutions ou bien ouvertes à de multiples entreprises qui y proposent leurs solutions logicielles à la différence des progiciels de gestion intégrée (ERP) qui ambitionnent d'offrir l'ensemble des solutions dont l'entreprise a besoin pour gérer ses commandes, ses approvisionnements, ses stocks, sa planification et son ordonnancement, sa gestion de production…

Ces plateformes relèvent d'une logique modulaire : l'entreprise « colle » ensemble des logiciels d'horizons différents pour répondre à ses besoins spécifiques (cf. figure 18).

Fig. 18 : De l'ERP intégré à la multiplication des modules issus de plateformes



Source : Dorothée Kohler et Jean-Daniel Weisz (2021) ©KOHLER C&C.

La continuité numérique permet ainsi l'émergence des plateformes, nouvelles infrastructures de l'économie[27] pour reprendre les termes employés par Henri Verdier

[27] Nicolas Colin, Henri Verdier, *L'âge de la multitude : Entreprendre et gouverner après la révolution numérique*, Paris, Armand Colin, 2012, p. 159.

et Nicolas Colin, même si ce thème est rarement abordé. Une plateforme numérique est une interface qui met en relation de multiples acteurs et facilite leurs interactions. Moins connues que les plateformes d'e-commerce, les plateformes de services industriels sont devenues un enjeu crucial pour les acteurs économiques.

Dans l'Industrie 4.0, les équipements industriels ont vocation à être gérés en temps réel par des applications et des algorithmes. A un premier niveau, se trouvent des bibliothèques d'applications, comparables à celles disponibles sur nos téléphones portables. Les industriels peuvent sélectionner les plus utiles, par exemple une application de gestion de maintenance assistée par ordinateur. Ils peuvent également développer ces applications pour leurs propres besoins et les proposer ensuite à la vente sur ces plateformes. Ces applications sont adaptées à la spécificité de chaque activité industrielle.

A un second niveau, se trouve l'infrastructure qui permet à ces applications de fonctionner. Or, à la différence de nos smartphones, ces applications ne sont pas téléchargées pour fonctionner avec un micro-processeur local. Elles sont localisées dans le cloud, c'est-à-dire dans un espace de stockage et avec une puissance de calcul externalisée. Le savoir-faire de géants comme Amazon Web Services ou Microsoft Azure est d'offrir une puissance de calcul capable de suivre l'évolution rapide de la demande. C'est ce que l'on appelle la 'scalabilité', le redimensionnement en temps réel du système en fonction du volume de la demande et la capacité à accompagner la montée en puissance des applications, dont le nombre d'utilisateurs croît de manière exponentielle, sans *bugs* et sans rupture de service. Les géants américains du net excellent dans cette activité « d'industrialisation » du service informatique et y sont devenus incontournables.

Si les 2^{e} et 3^{e} révolutions industrielles ont tiré profit des effets d'échelle de la production à la chaîne et de l'automatisation, la 4^{e} révolution industrielle bénéficie de la scalabilité en temps réel de ces plateformes.

La plateforme de services industriels, nouvelle infrastructure du système de production

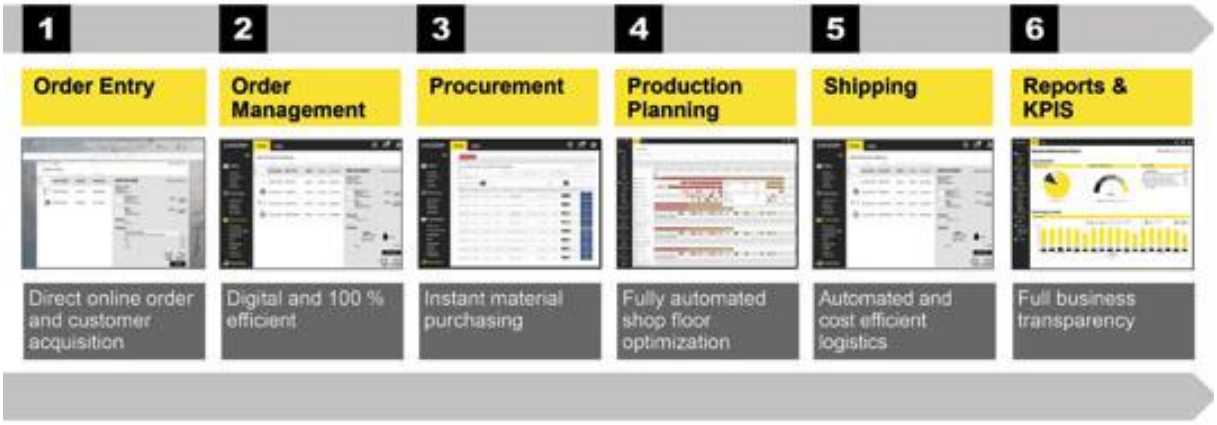
Pour un industriel, la question de la plateforme se pose à deux niveaux : celui des services applicatifs qu'il offre à ses clients et celui des services auxquels il a lui-même recours pour assurer sa production. Longtemps réservées aux seuls industriels B2C, les plateformes sont aussi devenues un enjeu pour les industriels B2B.

L'exemple de Trumpf est illustratif. Ce fabricant spécialisé dans les machines de découpe laser a participé, au début des années 2010, à un projet initié par le ministère

fédéral allemand de la Formation et de la Recherche, intitulé « Place de marché pour les données technologiques », qui a été à l'origine de la création d'une plateforme de services industriels nommée Axoom. Il s'agit d'une bibliothèque d'applications industrielles à laquelle les dirigeants d'entreprise peuvent recourir pour répondre à leurs besoins : gestion des commandes, pilotage de la production, gestion de la relation client… Une start-up a été spécialement créée pour construire cette infrastructure avec l'appui d'autres industriels comme Zeiss (optique) ou Linde (gaz industriel).

Ce faisant, Trumpf sort des limites de son modèle d'affaires puisque cette plateforme n'a pas vocation à ne proposer que des applications pour la gestion des machines de sa propre marque. Elle empiète sur le périmètre des systèmes MES (*Manufacturing Execution System*) et ERP (*Enterprise Resource Planning*[28]) des offreurs classiques de solutions informatiques.

Fig. 19 : Le périmètre d'application de la plateforme Axoom de Trumpf



Source : Trumpf

Si une entreprise dont la vocation est avant tout industrielle peut se positionner comme un acteur des Technologies de l'Information et des Communications (TIC) proposant des bibliothèques d'applications à ses clients, elle est également cliente de ces applications pour numériser ses processus de production. C'est un système à double face qui floute la frontière entre l'interne et l'environnement commercial externe.

28 Un MES (*Manufacturing Exécution System*) est un logiciel de pilotage de la production qui fait l'interface entre l'ERP et les systèmes de supervision type SCADA.

Les plateformes : un enjeu d'indépendance pour l'industrie

Les offres de solutions numériques se multiplient. Les PME industrielles sauront-elles apprendre à travailler avec des systèmes différents pour gérer leur production, leurs transactions, leur relation client, la conception de leurs produits et l'industrialisation de leurs procédés, quand elles parviennent déjà difficilement à maîtriser leur ERP ?

Cette question pointe du doigt la capacité de l'entreprise à générer des processus d'apprentissage, notamment dans le domaine de l'informatique, alors qu'elle était jusqu'à présent focalisée sur la fabrication.

L'Industrie 4.0 suppose que l'ensemble des systèmes soient interopérables et que toutes les briques logicielles communiquent entre elles en temps réel. Ce besoin d'interopérabilité fait pencher la balance en faveur d'éditeurs disposant de solutions intégrées.

Ces éditeurs étant le plus souvent de grande taille (SAP, Bosch, Siemens, Schneider Electric), les dirigeants d'entreprise de taille plus petite, PME ou ETI, peuvent être réticents à leur confier la numérisation de leur chaîne de production. Ils deviendraient alors très dépendants de ces acteurs, leur efficacité opérationnelle étant conditionnée par la performance de leur infrastructure numérique et au téléchargement des versions les plus récentes des outils numériques. Cette numérisation pose également de nombreuses questions : à qui appartiennent les données de l'entreprise transitant ou étant stockées chez le partenaire offreur de services numériques ? Quid de la propriété intellectuelle ? Qui a accès aux données d'usage du client qui permettent de calibrer de nouveaux services ? Quel est le modèle de rémunération du prestataire numérique et dans quelle mesure est-il possible de changer de prestataire ? Comment gérer les responsabilités en cas d'incidents ou de crise[29] ?

Dans ce domaine où les plus grands équipementiers se positionnent aujourd'hui, on voit apparaître des offres alternatives comme celle d'Axoom, déjà citée, ou encore la plateforme Adamos qui regroupe de son côté plusieurs industriels de renom (DMG Mori, Dürr, Zeiss). Elles ciblent spécifiquement les entreprises familiales tout en cherchant à capturer la valeur de ces nouveaux services numériques.

A côté de ces plateformes de services industriels développées par des acteurs connus, émergent quantité d'applications qui ont elles-mêmes l'ambition de faire plateforme. Un exemple parmi tant d'autres est une start-up nommée Mobility Work, qui a créé le premier réseau social de machines afin de faciliter la gestion de la maintenance industrielle. Cette application permet non seulement d'accéder à des outils de gestion

---

29 Ce passage est extrait de l'article écrit par Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, « Industrie 4.0, une révolution industrielle et sociétale », *Futuribles* n° 424, mai-juin 2018, p.61.

de maintenance par ordinateur, mais également de partager des données concernant les machines (consommation d'énergie, de fluides, intervalles de maintenance…) avec d'autres utilisateurs des mêmes équipements et ainsi d'optimiser leur utilisation[30].

Mobility Work ambitionne de se positionner comme plateforme sur le marché de la maintenance, et de désintermédier ainsi la relation entre les fabricants d'équipements industriels et leurs clients. Les premiers voient leurs marges se réduire et pensent se rattraper sur les services de maintenance et la vente de pièces de rechange. Mais que se passera-t-il si les données collectées par un nouvel entrant comme cette start-up permettent de faire de la maintenance prédictive, et si elle se positionne comme intermédiaire entre l'industriel et ses fournisseurs de services ? Demain, l'application peut proposer en direct l'approvisionnement de la pièce selon sa disponibilité dans le monde, à l'image d'Amazon, ou vendre l'intervention d'un technicien de maintenance freelance inscrit sur sa plateforme[31].

30 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz,*op.cit.,* p.62.
31 Dorothée Kohler, Jean-Daniel Weisz, *ibid*., p.62

Industrie 4.0 : la quatrième révolution industrielle
Tome 1 - Enjeux tehnologiques et économiques
Les Cahiers du Digital - N°1
HEC Digital Lab - HEC Liège Management School - Liège Université

Auteurs : Dorothée Kohler & Jean-Daniel Weisz
Date de publication en ligne : Juin 2021
Coordination : Nicolas Neysen
Communication & Design : Roxanne Thonnard
Illustration page de garde : mrsemilyhopper sur pixabay.com

Le HEC Digital Lab tient à remercier tout particulièrement la Société Régionale d'Investissement de Wallonie (SRIW), principal partenaire de ses initiatives en matière d'Industrie 4.0.

Publication gratuite - Ne peut être vendue ou utilisée à des fins commerciales. Ce *Cahier du Digital* est une publication du HEC Digital Lab. Vous êtes libre de reproduire, de distribuer et de communiquer cette création au public dans le respect des droits moraux des auteurs, à condition de citer vos sources et de ne pas en faire un usage commercial.

Avec le soutien de :

W.IN.G
by digital wallonia

▶ QUI SOMMES-NOUS

W.IN.G by Digital Wallonia, c'est un fonds d'investissement dédié au financement en capital des start up Tech et Digitale en Wallonie.

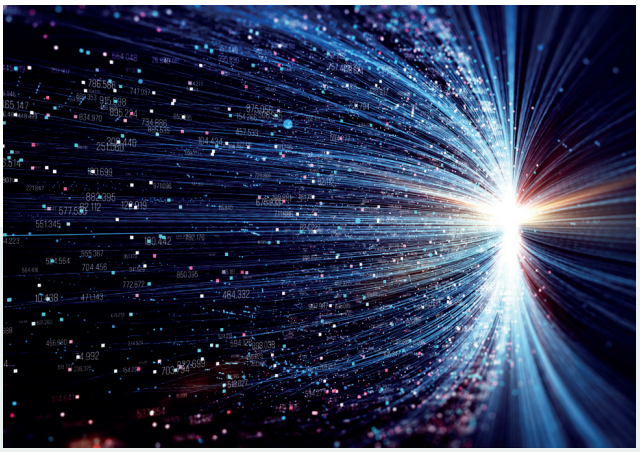
▶ NOS MOYENS

Capitalisé à hauteur de 60 millions d'euros, W.IN.G by Digital Wallonia investit dans les start-up aux différents stades de leur évolution : de la phase de « pré-amorçage » (finançable dès 50 000 euros) à la « Série A » (finançable jusqu'à 2,5 millions d'euros).

▶ NOTRE APPROCHE

W.IN.G, est un investisseur professionnel et bienveillant. Nous challengeons dès le départ les start-up, entrepreneurs et porteurs de projets et poursuivons ce rôle de « sparring-partner », à la fois critique et engageant, au sein comme en dehors du Conseil d'administration.

Disponible, réactif et « supportive », notre comité d'experts vous garantit un processus d'investissement efficace et diligent.



▶ NOTRE ÉQUIPE

L'équipe derrière W.IN.G, ce sont 4 Investment Managers aux profils complémentaires et aux compétences variées ; mais aussi une Operating Team qui offre aux start-up une première intervention gratuite dans les domaines les plus pertinents (growth marketing, RH, vente, stratégie, finance).

▶ NOTRE RÉSEAU

Par le biais de la Société Régionale d'Investissement de Wallonie (SRIW), W.IN.G bénéficie d'un accès à un réseau étendu de partenaires, d'entreprises et de fonds spécialisés.

▶ NOS RÉFÉRENCES

En quatre ans à peine, le fonds d'investissement W.IN.G by Digital Wallonia a déjà contribué à l'émergence de nombreuses startups reconnues au niveau national comme à l'international : **E-Peas**, **OnComfort**, **Mozzeno**, **ListMinut**, **WooClap**, **Neveo**, **Verbolia**, **etc.**

SRIW GROUP
INVESTMENT & GROWTH

digital wallonia .be

Envie d'en savoir plus ? Rendez-vous sur www.wing-digitalwallonia.be

CONTACT

www.digitallab.be
hecdigitallab@uliege.be

HEC LIÈGE
Management School - Liège Université
DIGITAL LAB