

Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie.

CHRISTOPHE DANJOU¹, LOUIS RIVEST¹, ROBERT PELLERIN²

¹ Department of Automated Production Engineering, École de Technologie Supérieure
1100 Notre-Dame West, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3
christophe.danjou@etsmtl.ca
louis.rivest@etsmtl.ca

² Department of Mathematics and Industrial Engineering, École Polytechnique de Montréal
Case postale 6079, Succursale Centre-ville Montréal, Québec, Canada H3C 3A7
robert.pellerin@polymtl.ca

Résumé - L'émergence du paradigme Industrie 4.0 invite les chefs d'entreprises à revoir en profondeur leurs modèles d'affaires. En effet, l'omniprésence du numérique et de la connectivité amène à repenser les processus manufacturiers, mais aussi les produits et les services de l'entreprise. Afin de soutenir les entreprises dans cette démarche, cet article organise d'abord les modèles de maturité de l'Industrie 4.0 selon trois dimensions. Il propose ensuite une grille d'analyse pour un positionnement stratégique en termes de processus, produits, ou services, et selon leur capacité de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie.

Abstract - The Industry 4.0 paradigm emergence prompts business leaders to thoroughly review their business models. Indeed, the digitization and connectivity era leads to rethink not only the manufacturing processes, but also the products and services of the company. To support companies in this process, this paper first organizes the Industry 4.0 maturity models along three dimensions. It then proposes a framework for a strategic positioning in terms of processes, products, or services, and according to their capacity as monitoring, control, optimization or autonomy.

Mots clés – Industrie 4.0, Maturité, Grille d'analyse, Processus-Produit-Service (PPS)

Keywords – Industry 4.0, Maturity, Framework, Product-Process-Service (PPS)

1 INTRODUCTION

Depuis le début de l'industrialisation, les sauts technologiques ont conduit à des changements de paradigmes qui sont aujourd'hui appelés "révolutions industrielles" [Lasi et al., 2014].

Trois révolutions industrielles ont conduit jusqu'ici à des changements de paradigmes dans le domaine de la fabrication - la mécanisation par l'eau et la vapeur, la production de masse dans les chaînes de montage et l'automatisation par la technologie de l'information. Au cours des dernières années, les industries, ainsi que les chercheurs et les décideurs du monde entier, ont de plus en plus préconisé une quatrième révolution industrielle pour entrer dans une nouvelle ère du numérique et de la connectivité.

Ainsi, contrairement à d'autres approches et technologies qui s'appuient sur une centralisation des informations et des prises de décisions, *Industrie 4.0* propose une décentralisation des prises de décisions avec une répartition de l'information dans chacune des entités composant le système global. Cette décentralisation favorise la flexibilité et l'agilité des systèmes par l'accroissement de leur réactivité et de leur autonomie.

Grâce à cette décentralisation, l'implantation de technologies sur lesquelles *l'Industrie 4.0* prend appui peut être graduelle.

L'émergence de *l'Industrie 4.0* amène les chefs d'entreprise à remettre en question leurs modèles d'affaires et impose deux défis majeurs :

- le premier défi consiste à imaginer, envisager, anticiper, de quelle façon ces technologies peuvent se combiner pour transformer les produits, les processus et les services offerts ; et
- le second défi consiste ensuite à maîtriser ces technologies, souvent extérieures au cœur de métier de l'entreprise, afin d'être en mesure de créer ces nouveaux processus, produits ou services. Le développement ou l'acquisition de ressources humaines possédant ces nouvelles compétences clés sera un enjeu incontournable de cette nouvelle ère.

Au regard de ces 2 défis industriels, cet article propose une réponse à la question suivante : « Quelle stratégie adopter pour répondre aux défis de *l'Industrie 4.0* et ainsi développer de nouvelles opportunités d'affaires ? »

Pour répondre à cette question, la discussion s'organise en cinq volets. La section suivante présente le contexte en montrant le fort engouement pour l'*Industrie 4.0* et réalise un inventaire des modèles de maturité. La section 3 fournit une grille d'analyse pour l'*Industrie 4.0*. Puis, la section 4 propose, au travers de la grille d'analyse, une démarche pour le déploiement de l'*Industrie 4.0*. Enfin, la section 5 vient conclure cet article.

2 CONTEXTE ET VUE D'ENSEMBLE

2.1 L'engouement pour l'Industrie 4.0

Initialement apparu en 2011 [Drath & Horch, 2014] à la faveur d'un effort allemand, le terme '*Industrie 4.0*' évoque une 4ème révolution industrielle. La première révolution industrielle correspond au passage d'une production manuelle à une production mécanisée, dans la deuxième moitié du 18ème siècle. C'est par l'électrification des systèmes de production et la production en série que se caractérise la seconde révolution industrielle à la fin du 19ème siècle. La troisième, quant à elle, se caractérise par l'automatisation de la production grâce à l'électronique et aux technologies de l'information dans les années 1970.

Le terme '*Industrie 4.0*' regroupe un ensemble de technologies et de concepts liés à la réorganisation de la chaîne de valeur [Hermann et al., 2015]. Ainsi, la vision relative à l'*Industrie 4.0* prend appui sur la communication en temps réel pour surveiller et agir sur les systèmes physiques. [Kagermann, 2015] caractérise cette nouvelle ère du numérique par la réutilisation massive des connaissances capitalisées avec les technologies de l'information dans les ateliers pour permettre une production intelligente, efficiente et réactive.

Les systèmes communiquent et coopèrent entre eux, mais également avec les humains, pour décentraliser la prise de décisions. L'*Industrie 4.0* met donc l'accent sur la connectivité, favorisant ainsi le développement de nouveaux processus, produits et services. Son déploiement requiert une intégration de différents savoir-faire propres aux technologies numériques.

La 4ème révolution industrielle prend différentes appellations selon les contributeurs et les zones géographiques. En s'appuyant sur les travaux de [Kagermann, et al., 2013], [EFFRA, 2013], [FIM, 2015], [Hermann et al., 2015], [Geissbauer et al, 2016], on retrouve ainsi des termes tels que:

- *Industry 4.0 / Industrie 4.0 / Industrial 4.0,*
- *Industrial Internet,*
- *Smart production,*
- *Smart Manufacturing,*
- *Smart factory / Smartfactory,*
- *Factory of the future / Factories of the future,*
- *Advanced Manufacturing,*
- *Intelligent Manufacturing,*
- *Industry of the future / Industries of the future,*
- *High value manufacturing,*
- *Smart Industry / SmartIndustry,*
- *Manufacturing 4.0,*
- *Integrated industry,*
- *Digital Factory,*
- *Manufacturing Renaissance,*
- *Make in India.*

Un inventaire de la littérature a été réalisé afin de jauger l'engouement pour l'*Industrie 4.0*. Nous avons ainsi répertorié

les publications en lien avec l'*Industrie 4.0* en nous appuyant sur les mots-clés précédents.

Pour cette étude, nous avons considéré tous les documents disponibles sous Scopus, qu'il s'agisse de publications scientifiques, de revues, de rapports de projets ou de documents produits par des consultants.

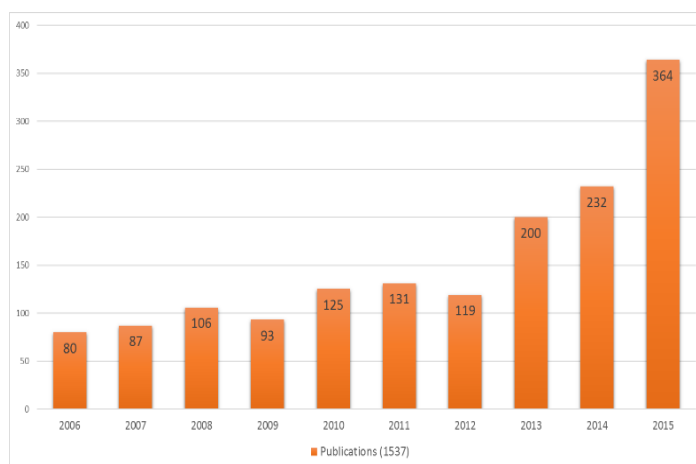


Figure 1 : Distribution par année des 1537 publications répertoriées

On retient de cette étude le fort intérêt pour l'*Industrie 4.0* en termes de volume de publications. La Figure 1 montre l'évolution du nombre de publications liées à la thématique *Industrie 4.0* de 2006 à 2015 avec un total de 1537 publications. On observe clairement une croissance du nombre de publications à partir de 2012. On observe aussi une forte augmentation en 2015, ce qui indique l'intérêt récent suscité par le thème auprès des communautés scientifiques et industrielles.

2.2 Revue des technologies de l'Industrie 4.0

On observe clairement une croissance de l'intérêt pour l'*Industrie 4.0*. Cependant, on peut légitimement se questionner sur l'importance de l'effet de mode de cette croissance. S'il est probable qu'il y ait un effet de mode, on peut quand même identifier des idées fortes et les technologies de l'ère du numérique et de la connectivité, qu'il s'agisse ou non d'une révolution industrielle.

On retrouve dans la bibliographie scientifique de nombreux travaux adressant les technologies mises en œuvre dans l'*Industrie 4.0* [Rüßmann et al, 2015]; [Brettel et al., 2014]; [CETIM, 2015]; [Dopico et al., 2016]; [Ernst & Frische, 2015]. Les auteurs proposent de retenir les dix groupes technologiques suivants [Danjou et al., 2017] :

- les données massives (*Big Data*);
- l'intelligence artificielle;
- l'infonuagique (*Cloud Computing*);
- l'internet des objets;
- les systèmes cyberphysiques (*Cyber-Physical Systems, CPS*);
- la cybersécurité;
- les robots/machines autonomes;
- la communication intermachines (*Machine-to-Machine, M2M*);
- les systèmes de simulations; et la réalité augmentée.

Ces groupes technologiques réunissent une variété de technologies, d'approches, de méthodes et de techniques. Leur combinaison judicieuse permet la mise en œuvre de la stratégie numérique de l'entreprise.

2.3 Modèle de maturité de l'Industrie 4.0

L'analyse présentée à la section 2.1 suggère un intérêt croissant pour l'*Industrie 4.0*. De nombreuses entreprises auront besoin d'être accompagnées dans cette nouvelle ère. Aussi bien en termes d'organisation que dans le déploiement des nouvelles technologies, les PME expriment des difficultés à identifier les défis à relever pour entrer dans le paradigme *Industrie 4.0* [Ganzarain & Errasti, 2016]. Même les entreprises les plus éclairées et informées des défis à relever pour assumer la transformation numérique présentent des difficultés dans l'évaluation de leur capacité à être prête pour supporter la transformation et dans quelle mesure cette transformation est nécessaire [Zimmermann, 2016].

Afin de supporter les entreprises dans leur processus de transformation numérique, de nombreuses initiatives se sont intéressées au développement de modèles de maturité pour caractériser l'*Industrie 4.0*. Ces modèles définissent tous des critères et des étapes pour la transformation des entreprises, mais évaluent la maturité l'*Industrie 4.0* selon différents aspects. Nous proposons de regrouper ces modèles selon trois dimensions de caractérisations de maturité pour l'*Industrie 4.0* :

- la maturité des technologies;
- la maturité de déploiement; et
- la maturité numérique de l'organisation.

Les trois dimensions regroupant les modèles de maturité pour l'*Industrie 4.0* sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

2.3.1 Maturité des technologies

Cette première caractérisation de maturité pour l'*Industrie 4.0* tend à donner aux entreprises des indications sur la maturité des technologies disponibles pour améliorer leurs systèmes. Ces modèles de maturité technologique, semblables aux indicateurs de types TRL (Technology Readiness Level) [ISO 16290], permettent à l'entreprise d'identifier la maturité de chacune des composantes des nouvelles technologies à implanter [Lichtblau et al, 2016].

En exemple, [Westermann et al., 2016] proposent un modèle de maturité sur cinq niveaux de références pour les CPS qu'ils déclinent par la suite au niveau de chaque composant et ainsi permettre de déterminer le niveau global de maturité de la technologie. De même, [Menon et al., 2016] proposent des caractéristiques pour l'évaluation de la maturité de l'Internet des Objets en s'appuyant sur des modèles de maturité déjà existants tels que les modèles de maturité PLM. Ainsi, chacune des composantes ou fonctions peut être évaluée pour permettre un meilleur déploiement de cette technologie au niveau des entreprises. [Halper & Krishnan, 2014] définissent un modèle de maturité pour les technologies du Big Data et de l'analyse qui en découle en définissant 5 niveaux d'implantation et de performance. A chaque niveau, les caractéristiques auxquelles les technologies mises en œuvre doivent répondre sont énoncées, constituant ainsi un guide pour les entreprises voulant développer cette composante.

2.3.2 Maturité de déploiement

Cette deuxième dimension de caractérisation de la maturité s'intéresse à la progression de déploiement des groupes technologiques au sein de l'entreprise. On évalue alors l'état du déploiement à un instant donné. On estime la progression en termes de 'où' et de 'combien'. Ainsi, similairement aux méthodologies issues du Lean Manufacturing, la plupart des modèles proposent une démarche de déploiement graduelle avec le respect de jalons pour l'entrée dans la phase suivante.

On peut notamment citer en exemple [Ganzarain & Errasti, 2016] qui proposent un modèle de maturité graduelle à 5 niveaux qui s'appliquent à 3 états de déploiement proposant ainsi 15 positionnements possibles permettant ainsi à l'entreprise de situer son avancement. [Leyh et al., 2016] proposent 'SIMMI 4.0' un avancement en cinq étapes pour le déploiement de l'*Industrie 4.0* sur l'ensemble de l'entreprise. Ils s'intéressent notamment à l'échange d'informations au travers des technologies de l'information jusqu'à atteindre une intégration numérique totale de l'entreprise et du système de production.

2.3.3 Maturité numérique de l'organisation

Cette troisième dimension de mesure de la maturité propose une analyse à un niveau plus organisationnel. Elle s'intéresse à la maturité de l'organisation pour assumer sa transformation numérique, en la comparant à celles de ses concurrents [Zimmermann, 2016]. Le terme anglophone exact est 'Readiness'. Cette troisième dimension ne s'appuie plus exclusivement sur la dimension technologique mais également sur la dimension humaine de l'*Industrie 4.0*. Elle relève de la compétence et de l'attitude de son personnel. La plupart de ces initiatives ont été motivées par des cabinets de consultants, parfois en association avec des universitaires.

[Blanchet et al., 2014] proposent un indicateur de maturité en s'appuyant sur différentes caractéristiques du système de production, tels que la sophistication et le niveau d'automatisation, ainsi que sur le niveau de compréhension de l'*Industrie 4.0* par les employés. Par la suite, une classification par comparaison des résultats avec une échelle de 1 à 5 permet de déterminer la maturité d'une industrie ou d'un pays par rapport à un autre. [Kane et al., 2015] proposent un modèle de maturité pour la transformation digitale en s'appuyant sur une enquête réalisée au niveau des entreprises. Ainsi, à partir des réponses et en répartissant sur 10 niveaux la maturité des entreprises pour la transformation numérique, trois catégories sont identifiées : mature, en développement, début de la réflexion. [Berghaus et al., 2016] (d'après [Zimmermann, 2016]) proposent un modèle de maturité empirique pour évaluer la capacité à supporter la transformation numérique qui s'appuie sur une liste de 59 indicateurs prenant en compte neuf dimensions de l'entreprise. [Schmidt et al, 2015] proposent un modèle empirique pour évaluer le potentiel pour une entreprise de s'engager dans l'*Industrie 4.0*. Ce modèle s'appuie sur six hypothèses pondérées par des coefficients au travers de l'approche SEM.

2.3.4 Analyse des modèles de maturité

Les modèles de maturité présentés permettent de considérer la maturité selon différentes dimensions. L'ensemble de ces dimensions mène à évaluer globalement la capacité d'une entreprise à entreprendre le virage de l'*Industrie 4.0*. Bien que ces modèles proposent des aspects utiles à l'accompagnement

des entreprises dans ce virage, ils négligent un aspect fondamental de la révolution promise par l'omniprésence du numérique et de la connectivité : l'opportunité de redéfinir la mission de l'entreprise à travers un examen de son positionnement stratégique. En effet,

- la plupart des modèles de maturité ne caractérisent pas le périmètre d'analyse des processus de production, et une transformation numérique initiée sur une partie du processus ne serait alors pas identifiée au regard des processus globaux de l'entreprise ;
- la quasi-totalité des modèles de maturité est orientée sur les processus de production et de logistique, mais ne s'intéressent pas au développement de nouveaux produits ou services rendus possibles avec l'*Industrie 4.0* ;
- bien que la technologie soit un facteur important pour l'*Industrie 4.0*, elle ne peut pas porter à elle toute seule la transformation et doit répondre à des besoins identifiés au niveau du modèle d'affaires.

D'après l'analyse réalisée dans cette section 2, il apparaît que les modèles de maturité ne permettent pas d'évaluer toutes les dimensions de l'Industrie 4.0 et ne permettent pas ainsi aux chefs d'entreprise de positionner leurs modèles d'affaires dans le paradigme *Industrie 4.0*. La section suivante détaille une proposition pour permettre aux chefs d'entreprises de redéfinir le positionnement stratégique de leurs modèles d'affaires.

3 PROPOSITION : GRILLE D'ANALYSE POUR L'INDUSTRIE 4.0

Les sections précédentes ont permis de présenter l'*Industrie 4.0* et d'identifier les limites des modèles de maturité actuels. Avec le souhait d'offrir au chef d'entreprise d'aborder l'Industrie 4.0 et de redéfinir le positionnement stratégique de leurs modèles d'affaires à forte composante numérique, nous proposons maintenant une grille d'analyse de l'*Industrie 4.0*. Cette grille d'analyse ne constitue pas un modèle de maturité mais propose une analyse des opportunités offertes par l'*Industrie 4.0* selon deux perspectives: (1) la déclinaison processus, produits et services et (2) les capacités de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie.

3.1 Déclinaison processus, produits et services

Le terme *Industrie 4.0* laisse entendre que l'effort se focalise sur l'amélioration des processus de fabrication. Cependant, l'accroissement de la présence de capteurs et des échanges en temps réel ouvre également de nouvelles opportunités dans la définition de produits communicants, de même que dans la 'servicisation' des produits [Kohler & Weisz, 2015]. En effet, les apports du numérique peuvent se décliner selon trois axes principaux :

- Du côté des processus, l'*Industrie 4.0* promet une transformation des modes de production, passant de la production de masse à une production individualisée (lot unitaire). Les processus sont plus agiles et reconfigurables pour s'ajuster aux besoins du client et ainsi maximiser la création de valeur. Les décisions de production sont adaptées en temps réel avec l'apparition des machines autonomes et la communication entre machines et systèmes cyberphysiques. L'exemple des modules SmartFactory [Web 01] s'inscrit dans la vision de l'*Industrie 4.0* avec la reconfiguration autonome de la chaîne de production et des machines pour répondre aux besoins de production unitaire;
- Les produits connectés permettent la collecte de données en temps réel. Ces données peuvent être analysées

immédiatement et permettre au système de s'adapter à son environnement de manière autonome, ou être utilisées ultérieurement pour le développement de nouveaux produits ou services. L'exemple de la voiture autonome illustre la capacité à s'adapter à son environnement extérieur;

- La disponibilité des données et les possibilités d'analyse amènent des opportunités de développement de nouveaux services (data-based services – [Geissbauer et al., 2016]). L'avènement de services de nouvelle génération permet le développement de nouveaux marchés. Dans l'exemple du gant de golf Zepp [Web 02] connecté au smartphone, on fournit un service à l'utilisateur au travers de l'analyse des données. L'utilisateur obtient des informations et des conseils techniques pour améliorer son jeu.

Dans certains cas, la frontière entre produits et services peut s'avérer discutable. Dans un univers connecté, la prédominance de l'information fournie par le produit ou le service connecté détermine sa classification. Ainsi, un réfrigérateur doté d'une fonction d'alarme lorsque la porte reste ouverte demeure un réfrigérateur, donc un produit. A l'inverse, le gant de golf connecté a pour fonction première de fournir une information au joueur, l'artéfact physique existant essentiellement pour fournir le service.

Par ailleurs, la frontière entre les processus, les produits et les services relève potentiellement du point de vue. Ainsi, la toupie Shaper Origin [Web 03] utilise la vision par ordinateur pour déterminer son emplacement sur la surface à découper ; ses moteurs affinent la position de la broche, de manière à corriger en temps réel sa trajectoire en fonction de la position du corps de la machine, guidé par les mains de l'opérateur. Pour le bricoleur occasionnel, il s'agit d'un produit à composante numérique. Pour un fabricant de meubles, elle contribue au processus de production, de manière transparente à son propre client.

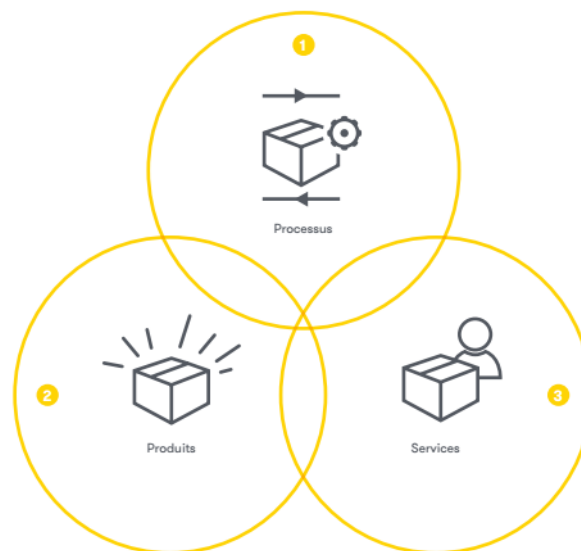


Figure 2: Déclinaison Processus-Produit-Service [CEFRIO, 2016]

3.2 Capacités de surveillance, contrôle, optimisation ou autonomie

La disponibilité massive de fonctions de connectivité permet de mettre en œuvre de nouvelles capacités pour les processus, les

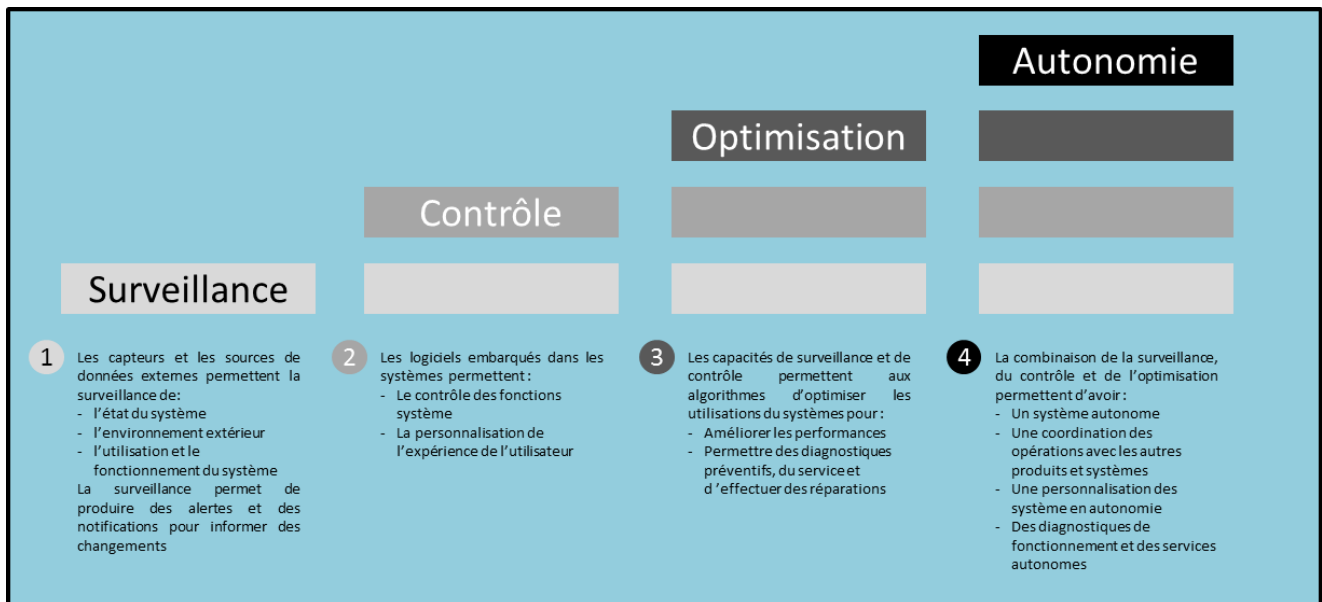


Figure 3 : Classification des capacités des systèmes – Traduit de [Porter & Heppelmann, 2014]

produits et les services. Ces nouvelles capacités peuvent être regroupées en quatre classes : la surveillance, le contrôle, l'optimisation et l'autonomie, variant donc du plus simple au plus ambitieux [Porter & Heppelmann, 2014].

Les capacités de surveillance constituent la base pour permettre le contrôle. Similairement, la surveillance et le contrôle sont essentiels pour permettre l'optimisation. Enfin, la surveillance, le contrôle et l'optimisation sont nécessaires pour atteindre l'autonomie, comme illustrés par la Figure 3.

Bien que la proposition de [Porter & Heppelmann, 2014] se focalise sur les produits (*smart, connected products*), cette déclinaison des capacités est transposable à tous les systèmes, qu'il s'agisse de processus, de produits ou de services.

Ces quatre niveaux de capacité sont définis ci-dessous :

- La surveillance : Les capacités numériques et de connectivité sont mises en œuvre pour surveiller l'état ou le fonctionnement du système et son environnement extérieur. Ainsi, grâce à des capteurs ou à des sources de données extérieures, le système peut émettre des alertes pour avertir des utilisateurs ou d'autres systèmes, mais n'exerce pas lui-même d'action. Cette surveillance permet de suivre l'évolution des caractéristiques du système et de disposer d'un historique de fonctionnement afin d'éclairer une éventuelle prise de décision. Le réfrigérateur General Electric [Web 04] qui émet une alerte de porte ouverte sur le téléphone de son propriétaire constitue un exemple de surveillance;
- Le contrôle : Le système est contrôlé par des algorithmes spécifiques. Les algorithmes déterminent une action simple du système pour répondre aux changements de son état ou de son environnement. Cette fonction permet aussi à l'utilisateur d'interagir avec le système pour en personnaliser le comportement. La mise en marche d'un ventilateur qui assure un apport d'air frais lorsque la concentration d'un polluant atteint un certain seuil constitue un exemple de contrôle. Les voitures Tesla [Porter & Heppelmann, 2014] présentent un autre exemple avec le contrôle de l'intégrité du véhicule et le téléchargement de correctif si nécessaire;

- L'optimisation : Le riche flux de données de surveillance disponible, associé à la capacité de contrôle, permet d'optimiser les performances du système. Le système peut ainsi mener des analyses sur les données de fonctionnement ou d'utilisation et appliquer des algorithmes afin d'optimiser l'utilisation et l'efficacité du système. Par exemple, WTC [Web 05] optimise l'orientation des pales de ses éoliennes pour réguler la puissance générée; et
- L'autonomie : Les capacités de surveillance, de contrôle et d'optimisation se combinent pour conférer de l'autonomie au système. Un système autonome est capable d'apprendre de son environnement, d'autodiagnostiquer ses besoins et de s'adapter aux préférences de l'utilisateur. Ces systèmes autonomes peuvent agir en coordination, en temps réel, avec d'autres produits ou systèmes de leur environnement. On peut citer en exemple l'aspirateur autonome Roomba de iRobot [Web 06] qui adapte sa trajectoire selon l'analyse de son environnement, optimise la puissance d'aspiration en fonction de la surface et retourne à sa base lorsqu'il faut recharger les batteries.

Les quatre capacités présentées reposent sur la mise en œuvre de technologies numériques et les fonctions de connectivité. Cette classification des capacités ne correspond pas à un niveau de maturité ; il n'y a pas de classe idéale. Il revient à chaque entreprise de définir les capacités souhaitées de ses processus, produits ou services et ainsi définir son positionnement stratégique pour maximiser la valeur livrée à ses clients. La réalisation de cette stratégie s'appuie sur le choix et la mise en œuvre des technologies disponibles. La section suivante propose une démarche pour accompagner les chefs d'entreprises dans le positionnement stratégique et dans la transformation numérique.

4 POSITIONNEMENT STRATEGIQUE

La première étape essentielle pour le déploiement du 4.0 sur l'activité de l'entreprise concerne la définition de la stratégie globale. En effet, il incombe à l'entreprise de déterminer sa

stratégie, qui comporte deux dimensions correspondant aux deux premiers axes évoqués plus haut :

- Souhaite-t-elle focaliser ses efforts sur le développement de ses processus, de ses produits ou de ses services ?
- Ces nouveaux processus, produits ou services se distinguent-ils par leur capacité de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie ?

En combinant les deux dimensions, on obtient la grille d'analyse présentée à la Figure 4 qui offre douze positionnements stratégiques. Cette grille d'analyse des capacités des processus, produits et services, indique, à titre illustratif, le positionnement stratégique de 15 exemples représentatifs du paradigme de l'Industrie 4.0. Plusieurs de ces exemples ont déjà été évoqués dans le présent document. Les autres sont brièvement présentés ci-dessous.

- Moteurs John Deere [Porter & Heppelmann, 2014] assemble une seule configuration moteur sur plusieurs machines, mais en limite, grâce au logiciel, la puissance disponible pour s'adapter aux besoins des différentes gammes de produits;
- Les fermes connectées [Porter & Heppelmann, 2014], développées par plusieurs entreprises simultanément, proposent de connecter les données de l'environnement extérieur de façon à prévoir en autonomie les quantités d'épandages et d'irrigations pour optimiser le rendement agricole;
- Philips propose Hue [Web 07], un système d'ampoules connecté au smartphone qui permet à l'utilisateur de contrôler à distance l'éclairage. Ainsi l'utilisateur peut

allumer ou éteindre à distance les lumières ou encore choisir une ambiance lumineuse en fonction du contexte;

- Le ventilateur Haiku [Web 08] de Big Ass s'actionne lorsqu'il détecte l'entrée d'utilisateurs dans une pièce et régule sa vitesse en fonction de ses préférences, de la température et de l'humidité de l'environnement;
- Bosch-Rexroth [Kohler & Weisz, 2015] présente une usine qui s'adapte aux opérateurs présents sur la chaîne de montage. Les stations de travail sont adaptées à la morphologie et au niveau d'expertise des opérateurs pour fournir les instructions de travail appropriées. On optimise ainsi les processus d'assemblage; et
- La raquette de tennis PLAY [Web 09] proposée par Babolat permet d'instrumenter les frappes de balles de façon à récupérer des données (vitesse de balle, point d'impact, rotation...) pour l'amélioration a posteriori du jeu de l'utilisateur.
- L'emballage 4.0 [Web 10] prend des mesures et des actions afin d'informer sur l'état du produit. Ainsi, équipé de capteurs chimiques intelligents, l'emballage interactif permet au consommateur de retrouver des informations sur la fraîcheur du produit et de le protéger s'il devient impropre à la consommation, par exemple en changeant la couleur de l'emballage ou en effaçant son code-barre.

La grille d'analyse est également complétée avec 3 cas issus de l'industrie manufacturière québécoise.

- L'entreprise Masonite utilise les systèmes Worximity [Web 11] et Poka [Web 12] pour surveiller son système de

	Surveillance	Contrôle	Optimisation	Autonomie
Processus	Masonite (Poka&Worximity)		Usine Bosch Rexroth Parc Éolien (ITMI)	SmartFactory
Produits	Réfrigérateur avec alarme	Toupie Shaper Voiture Tesla Moteurs John Deere	Éoliennes WTC	Voiture autonome Robot Roomba
	Raquette Babolat	Emballage 4.0		
	Services	Chandail Hexoskyn Gant de golf Zepp	Ampoule Philips	Ventilateur Big Ass

Figure 4: Grille d'analyse des capacités des processus, produits et services

production et ainsi diminuer le temps d'action en cas de défaillance de ses processus de production ou de maintenance;

- L'ITMI a développé une solution logicielle permettant d'optimiser les processus de maintenance opérationnelle de parcs éoliens en prenant en compte les conditions météorologiques et la disponibilité des équipes de travail; et
- L'entreprise Hexoskin propose le vêtement biométrique Smart Shirt qui permet la mise à disposition des informations de santé personnelles et les rend accessibles pour analyse. Grâce aux capteurs directement intégrés au vêtement, les données biométriques sont enregistrées et consultables sur un téléphone intelligent.

Le positionnement stratégique étant choisi, la deuxième étape consiste à identifier les technologies nécessaires au regard des objectifs. La section 2.2 présente un éventail de groupes technologiques typiquement associés à l'*Industrie 4.0*. Cet éventail ne saurait cependant prétendre être exhaustif. L'identification des technologies nécessaires à l'atteinte des objectifs peut être conditionnée par les technologies déjà maîtrisées par l'entreprise.

Enfin, il faut repérer et s'adjoindre les expertises nécessaires à la maîtrise et au déploiement de ces technologies. On peut prévoir qu'une des clefs de la réussite consiste à s'entourer des compétences requises, qu'elles soient internes à l'entreprise ou externes, via des sociétés de services.

La dernière étape de la démarche consiste à déployer les solutions technologiques pour atteindre l'objectif de développement précédemment identifié. Contrairement à d'autres approches, *Industrie 4.0* n'impose pas nécessairement un déploiement massif de technologies à l'ensemble des activités de l'entreprise. L'évolution pourra être graduelle et se faire par l'apport localisé de nouvelles technologies. Ainsi, on pourra choisir d'équiper de capteurs un premier équipement de production particulièrement critique, afin de surveiller son fonctionnement, sans généraliser la surveillance à la totalité des processus de l'usine.

L'implantation de ces nouvelles solutions technologiques trouvera écho dans la nécessité de recruter ou former la main-d'œuvre qualifiée pour appuyer cette nouvelle stratégie d'entreprise. Ces embauches ou formations seront planifiées et équilibrées au regard des transformations à effectuer pour satisfaire la stratégie de l'entreprise quant aux processus, produits ou services à développer.

Une fois les compétences acquises et les technologies maîtrisées, il devient plus facile et rapide de déployer la stratégie choisie de façon itérative, dans une logique d'amélioration continue

5 DISCUSSION ET CONCLUSION

Le terme *Industrie 4.0* est employé pour décrire les changements imminents auxquels fait face l'industrie. Cette 'révolution' prend appui sur la disponibilité accrue de groupes technologiques du numérique et de la connectivité pour réorganiser la chaîne de valeur. Les entreprises sont alors amenées à se remettre en question devant les nouvelles opportunités et les nouveaux défis imposés par l'évolution de leurs compétiteurs.

Différents modèles de maturité sont disponibles afin d'accompagner les entreprises dans cette transformation. Nous proposons d'organiser les différents modèles selon trois dimensions : la maturité des technologies, la maturité de déploiement et la maturité numérique de l'organisation. La dimension 'technologie' s'intéresse à l'état de développement des technologies disponibles. La dimension 'déploiement' s'intéresse à l'évaluation de l'état du déploiement (de la technologie au sein des processus de fabrication) à un instant donné au sein de l'entreprise. La troisième dimension s'intéresse à la maturité de l'organisation pour assumer sa transformation numérique. C'est par la réunion de ses trois dimensions qu'il sera envisageable d'évaluer globalement la maturité d'une organisation pour amorcer le virage vers l'*Industrie 4.0*. Soulignons que ces modèles de maturité sont essentiellement tournés vers l'amélioration des processus de production.

Aussi, ces modèles de maturité ne permettent pas de couvrir entièrement les modèles d'affaires des entreprises, puisqu'ils ne considèrent pas les produits ou les services. On omet ainsi un aspect fondamental de la révolution promise par l'omniprésence du numérique et de la connectivité : l'opportunité de redéfinir la mission de l'entreprise à travers un examen de son positionnement stratégique. Cette redéfinition pourrait mener par exemple une entreprise traditionnellement orientée vers le développement et la vente de produits, à recentrer ses activités vers les services.

C'est pourquoi cet article présente une grille d'analyse proposant aux chefs d'entreprises la possibilité de redéfinir le positionnement stratégique de leurs modèles d'affaires à forte composante numérique. Cette grille met en relief le potentiel des technologies de l'*Industrie 4.0* à impacter autant les processus que les produits et les services. On notera toutefois que la frontière entre les produits et les services tend à s'effacer avec les fonctions du numérique et de la connectivité de l'*Industrie 4.0* pouvant entraîner un positionnement sur la frontière produit/service. Aussi, la grille proposée met en évidence quatre niveaux de capacité de ces processus, produits ou services, soit la surveillance, le contrôle, l'optimisation et l'autonomie. Il en résulte donc douze positionnements stratégiques possibles pour l'*Industrie 4.0*. Le chef d'entreprise pourra utiliser cette grille afin de décrire le positionnement actuel de son entreprise, de même que le positionnement souhaité par son virage vers l'*Industrie 4.0*.

6 REFERENCES

- Berghaus, S., Back, A., Kaltenrieder, B., (2016) "Digital Maturity & Transformation Report 2016,"
- Blanchet, M., Rinn, T., Von Thaden, G., De Thieulloy, G., (2014). *INDUSTRY 4.0: The new industrial revolution How Europe will succeed*. Roland Berger Strategy Consultants.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- CEFRIO (2016) Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME. CEFRIO 2016. ISBN 978-2-923852-68-3
- CETIM (2015) Technologies prioritaires 2020 en mécanique, CETIM 2015. ISBN 978-2-36894-079-2

- Danjou, C., Rivest, L., Pellerin R., (2017). Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité, CEFRIO 2017. ISBN 978-2-923852-71-3
- Dopico, M., Gomez, A., De la Fuente, D., García, N., Rosillo, R., & Puche, J. (2016). A vision of industry 4.0 from an artificial intelligence point of view. In Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence (ICAI).
- Drath, R. and A. Horch, (2014)"Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 56-58.
- EFFRA-European Factories of the Future Research Association. (2013). Factories of the future: Multi-annual roadmap for the contractual PPP under horizon 2020.
- Ernst, F., Frische, P. (2015). Industry 4.0/Industrial Internet of Things-Related Technologies and Requirements for a Successful Digital Transformation: An Investigation of Manufacturing Businesses Worldwide.
- FIM-Fédération des Industries Mécaniques, (2015). Guide pratique de l'usine du futur.
- Ganzarain, J., Errasti, N., (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. Journal of Industrial Engineering and Management, 9(5), 1119-1128.
- Geissbauer, R., Vedso, J., Schrauf, S. (2016). Industry 4.0: Building the digital enterprise. 2016 Global Industry 4.0 Survey.
- Halper, Fern, and Krishnan, K., (2014). "TDWI Big Data Maturity Model Guide." RDWi Resarch 2013–2014: 1– 20
- Hermann M, Pentek T., & Otto, B (2015) Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Working paper No. 01 / 2015.
- ISO 16290:2013 Space systems -- Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment
- Kane, G. C., Palmer, D., Phillips, A. N., Kiron, D., Buckley, N. (2015). Strategy, not technology, drives digital transformation. MIT Sloan Management Review and Deloitte University Press.
- Kagermann, H., (2015). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In Management of Permanent Change (pp. 23-45). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 WG
- Kohler, D., Weisz, J.-D., (2015), "Industrie 4.0 : quelles stratégies numériques ?", Publication Bpifrance Industrie 4.0 rédigée par KOHLER C&C.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 6(4), 239.
- Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., & Forstenhäusler, S. (2016, September). SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. In Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2016 Federated Conference on (pp. 1297-1302). IEEE.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., & Schröter, M. (2015). Industrie 4.0-Readiness. Aachen & Cologne: Impuls/VDMA.
- Menon, K, Kärkkäinen, H., Lasrado, L.A., (2016) "Towards a Maturity Modeling Approach for the Implementation of Industrial Internet." Proceedings of the Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS).
- Porter, M. E., Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. Harvard Business Review, 92(11), 64-88.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. Boston Consulting Group.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R. C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P., (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. In International Conference on Business Information Systems (pp. 16-27).
- Westermann, T., Anacker, H., Dumitrescu, R., & Czaja, A. (2016). Reference architecture and maturity levels for cyber-physical systems in the mechanical engineering industry. In Systems Engineering (ISSE).
- Zimmermann, H.-D. (2016). Digital Transformation - The emerging Digital Economy. In J. Skrbek, D. Nejedlova, & T. Semeradova (eds.), Proceedings of the Liberec Informatics Forum 2016 (pp. 138–146).

7 REFERENCES WEB

Accessibles au 15 Décembre 2016

- [Web 01] <http://www.smartfactory.de/>
- [Web 02] <http://www.zep.com/golf/>
- [Web 03] <https://shapertools.com/>
- [Web 04] <http://www.geappliances.com/ge/connected-appliances/refrigerators.htm>
- [Web 05] <http://windturbinecompany.com/index.html>
- [Web 06] <http://www.irobot.com/>
- [Web 07] <http://www.philips.fr/c-p/8718291241751/hue-lumiereconnectee-hue#see-all-benefits>
- [Web 08] <http://www.bigassfans.com/products/haiku/>
- [Web 09] <https://fr.babolatplay.com/play>
- [Web 10] <http://ici.radio-canada.ca/premiere/emissions/les-eclaireurs/segments/chronique/9148/emballage-connecte-intelligent-marketing-valeurs-consommation>
- [Web 11] <https://www.poka.io/fr>
- [Web 12] <https://worximity.com/fr/>