

PME 2.0

# Le passage au numérique

Industrie 4.0 : des pistes pour  
aborder l'ère du numérique  
et de la connectivité.

[C. Danjou, L. Rivest et R. Pellerin]

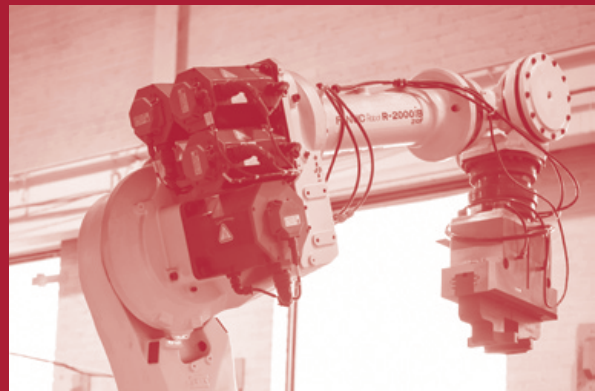
Réalisé par



Principal partenaire financier

Économie, Science  
et Innovation

Québec



## **PME 2.0 – LE PASSAGE AU NUMERIQUE**

### **INDUSTRIE 4.0 : DES PISTES POUR ABORDER L'ÈRE DU NUMERIQUE ET DE LA CONNECTIVITE**

Ce rapport s'adresse à toute personne désireuse d'approprier les rudiments de l'Industrie 4.0. Ce document propose dans un premier temps des éclaircissements et une grille d'analyse pour comprendre les principaux enjeux de l'Industrie 4.0 et fournit, dans un second temps, quelques pistes pour en aborder le déploiement.

#### **Équipe scientifique et auteurs**

**Christophe Danjou**, chercheur postdoctoral, École de technologie supérieure (ETS)

**Robert Pellerin**, professeur titulaire, École Polytechnique et chercheur associé au CEFRIO

**Louis Rivest**, professeur titulaire, École de Technologie supérieure (ETS) et chercheur associé au CEFRIO

#### **Équipe projet – CEFRIO PME 2.0**

**Josée Beaudoin**, vice-présidente, Innovation et Transfert

**Geneviève Lefebvre**, directrice de projet

**Mélanie Normand**, directrice de projet

**Vanessa Gouri**, chargée de projet

**Alexandre Skerlj**, chargé de projet

#### **Équipe d'édition**

**Guillaume Ducharme**, vice-président, communications et affaires corporatives, CEFRIO

**Sylvia Kuersteiner**, adjointe administrative, CEFRIO

**Criterion**, design graphique

#### **Crédit photos couverture**

**Éric Carrière**, photographe

**Francis Fontaine**, photographe

#### **PME 2.0**

PME 2.0 est une mesure initiée par le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI) et orchestrée dans les secteurs industriels québécois par le CEFRIO. Dans le cadre de cette mesure, le CEFRIO a mené 30 projets pilotes liés aux technologies de l'information dans les secteurs de la mode et de l'habillement et de l'aéronautique. L'objectif de PME 2.0 est de réaliser des projets technologiques stratégiques pour les entreprises et d'en valoriser les apprentissages. Appuyé des leçons tirées depuis ces 30 expérimentations, le CEFRIO élabore puis diffuse de nouveaux outils et approches sur l'adoption du numérique dans ces industries et dans d'autres secteurs d'activité.

Ce document est également disponible sur les sites [PMENumerique.ca](http://PMENumerique.ca) et [cefrio.qc.ca](http://cefrio.qc.ca)

## Table des matières

1.	Présentation de l'Industrie 4.0 .....	4
2.	L'engouement pour l'Industrie 4.0 .....	5
3.	Grille d'analyse pour l'Industrie 4.0 .....	8
3.1.	Déclinaison processus, produits et services .....	8
3.2.	Capacités de surveillance, contrôle, optimisation ou autonomie .....	9
3.3.	Leviers technologiques .....	12
	Données massives ( <i>Big Data</i> ) et analyse .....	14
	L'intelligence artificielle .....	14
	L'infonuagique ( <i>Cloud</i> ) .....	14
	Internet des objets, IdO ( <i>Internet of Things, IoT</i> ) .....	15
	Les systèmes cyberphysiques ( <i>Cyber-physical systems, CPS</i> ) .....	15
	Cybersécurité .....	15
	Machines autonomes .....	15
	La communication inter machines (M2M) .....	16
	Simulation .....	16
	La réalité augmentée .....	16
4.	Proposition de démarche pour le déploiement .....	17
4.1.	Choix du positionnement stratégique .....	17
4.2.	Choix des leviers technologiques .....	18
4.3.	Investir et déployer les solutions technologiques .....	19
5.	Quelques exemples concrets .....	19
5.1.	Cas Masonite .....	19
5.2.	Cas Hexoskyn .....	20
5.3.	Cas ITMI .....	20
6.	Suggestions de lecture .....	22
7.	Conclusion .....	23
8.	Références .....	24
9.	Annexe : Exemples de la grille d'analyse .....	25

## 1. Présentation de l'Industrie 4.0

Le terme 'Industrie 4.0' regroupe un ensemble de technologies et de concepts liés à la réorganisation de la chaîne de valeur [Hermann et coll., 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. 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.

Initialement apparu en 2011 [Drath & Horch 2014] à la faveur d'un effort allemand, le terme 'Industrie 4.0' évoque une 4<sup>e</sup> révolution industrielle. La première révolution industrielle correspond au passage d'une production manuelle à une production mécanisée, dans la deuxième moitié du 18<sup>e</sup> 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 19<sup>e</sup> 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.

La 4<sup>e</sup> révolution industrielle prend différentes appellations selon les contributeurs et les zones géographiques. On retrouve ainsi des termes tels que *Industry 4.0* dans son écriture anglophone, *Smart Factory*, *Smart Industry*, *Factory of the Future*, *Industry of the Future*, *Digital Factory*, etc. Ces efforts abordent différentes perspectives portant sur l'émergence de nouveaux processus, produits et services. En effet, l'Industrie 4.0 ne concerne pas que les processus de production - l'excellence opérationnelle, mais révolutionne également l'horizon des produits et des services.

On observe clairement un engouement autour de l'Industrie 4.0. On peut légitimement se questionner sur l'importance de l'effet de mode dans cet engouement. 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.

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.

Ce court rapport présente quelques concepts essentiels liés à l'Industrie 4.0. La section suivante propose des repères bibliométriques. Par la suite, la section 3 fournit une grille d'analyse. Puis, la section 4 propose une démarche pour le déploiement de l'Industrie 4.0 et la section 5 présente des exemples concrets de déploiement dans des entreprises québécoises. Enfin, la section 6 fournit des suggestions de lectures complémentaires.

## **2. L'engouement pour l'Industrie 4.0**

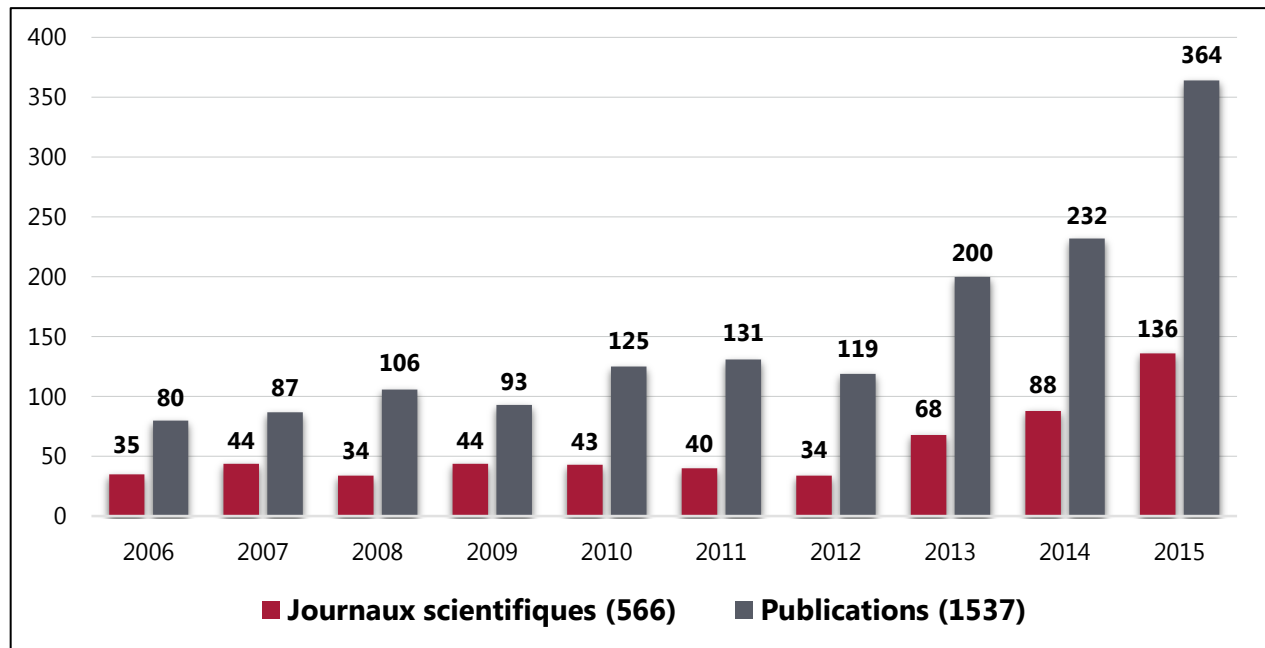
Un inventaire de la littérature a été réalisé afin de documenter les origines et l'engouement pour l'Industrie 4.0. On retient de cette étude deux faits principaux :

- le fort engouement pour l'*Industrie 4.0* en termes de volume de publications et ;
- la modeste contribution canadienne aux publications sur l'Industrie 4.0.

Nous avons ainsi répertorié les publications en lien avec l'Industrie 4.0 en nous appuyant sur les mots-clés suivants : "*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*".

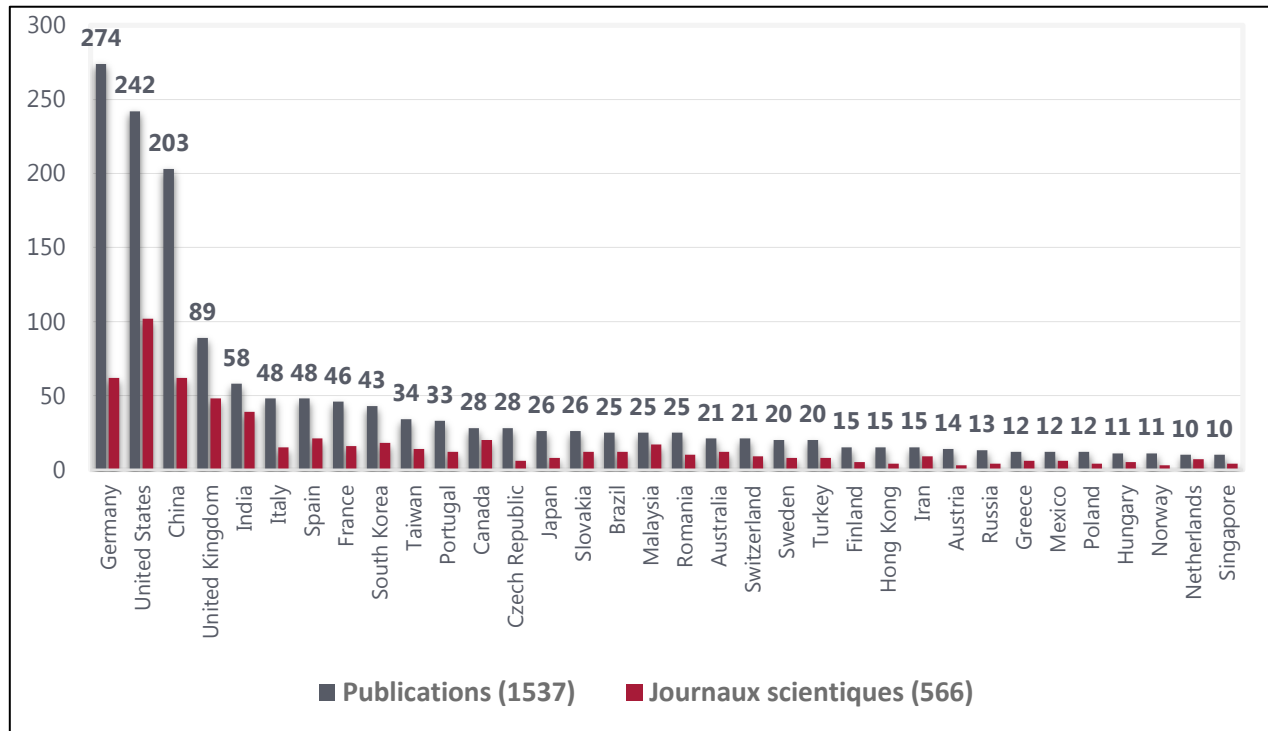
Nous avons considéré tous les documents disponibles sous Scopus, qu'il s'agisse de publications scientifiques, de revues, de rapports de projets ou de documents produits par des consultants.

*FIGURE 1 – Distribution par année des 1537 publications répertoriées*



La figure 1 montre l'évolution du nombre de publications liées à la thématique Industrie 4.0 de 2006 à 2015. 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.

FIGURE 2 – Distribution par pays des 1537 publications répertoriées



La figure 2 propose une distribution par pays des publications répertoriées de 2006 à 2015 – nombre de publications supérieur ou égal à 10. On note l'importance de l'effort allemand, qui exprime le leadership de ce pays pour la thématique de l'Industrie 4.0, accompagné par les États-Unis et la Chine. Un second groupe, composé du Royaume-Uni, de l'Inde, de l'Italie, de l'Espagne, de la France et de la Corée du Sud, se dégage avec un nombre conséquent de contributions. Enfin, on observe que le Canada a apporté une contribution relativement modeste à l'effort mondial au cours de cette période.

Lors de cet inventaire de la littérature, nous avons identifié des documents particulièrement intéressants. Ces documents sont proposés dans la section 6 de ce rapport.

## 3. Grille d'analyse pour l'Industrie 4.0

Après avoir brièvement présenté l'Industrie 4.0, nous proposons maintenant une grille d'analyse selon trois perspectives : (1) la déclinaison processus, produits et services (2), les capacités de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie et (3) l'inventaire des technologies en jeu.

### 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 communiquant, 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<sup>1</sup> 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 –

---

<sup>1</sup> <http://www.smartfactory.de/>



[PWC, 2016]). L'avènement de services de nouvelle génération permet le développement de nouveaux marchés. Dans l'exemple du gant de golf<sup>2</sup> connecté au téléphone intelligent, 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. À 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 ces axes relève potentiellement du point de vue. Ainsi, la toupie Shaper Origin<sup>3</sup> 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.

### **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 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.

---

<sup>2</sup> <http://www.zapp.com/golf/>

<sup>3</sup> <https://shapertools.com/>

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 et Heppelmann 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.

FIGURE 3 – Classification des capacités des systèmes - adapté de [Porter & Heppelmann, 2014]



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<sup>4</sup> 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 optimise l'orientation des pales de ses éoliennes pour réguler la puissance générée<sup>5</sup>.
- **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<sup>6</sup> 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

---

<sup>4</sup> <http://www.geappliances.com/ge/connected-appliances/refrigerators.htm>

<sup>5</sup> <http://windturbinecompany.com/index.html>

<sup>6</sup> <http://www.irobot.com/>

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, discutées ci-après.

### 3.3. Leviers technologiques

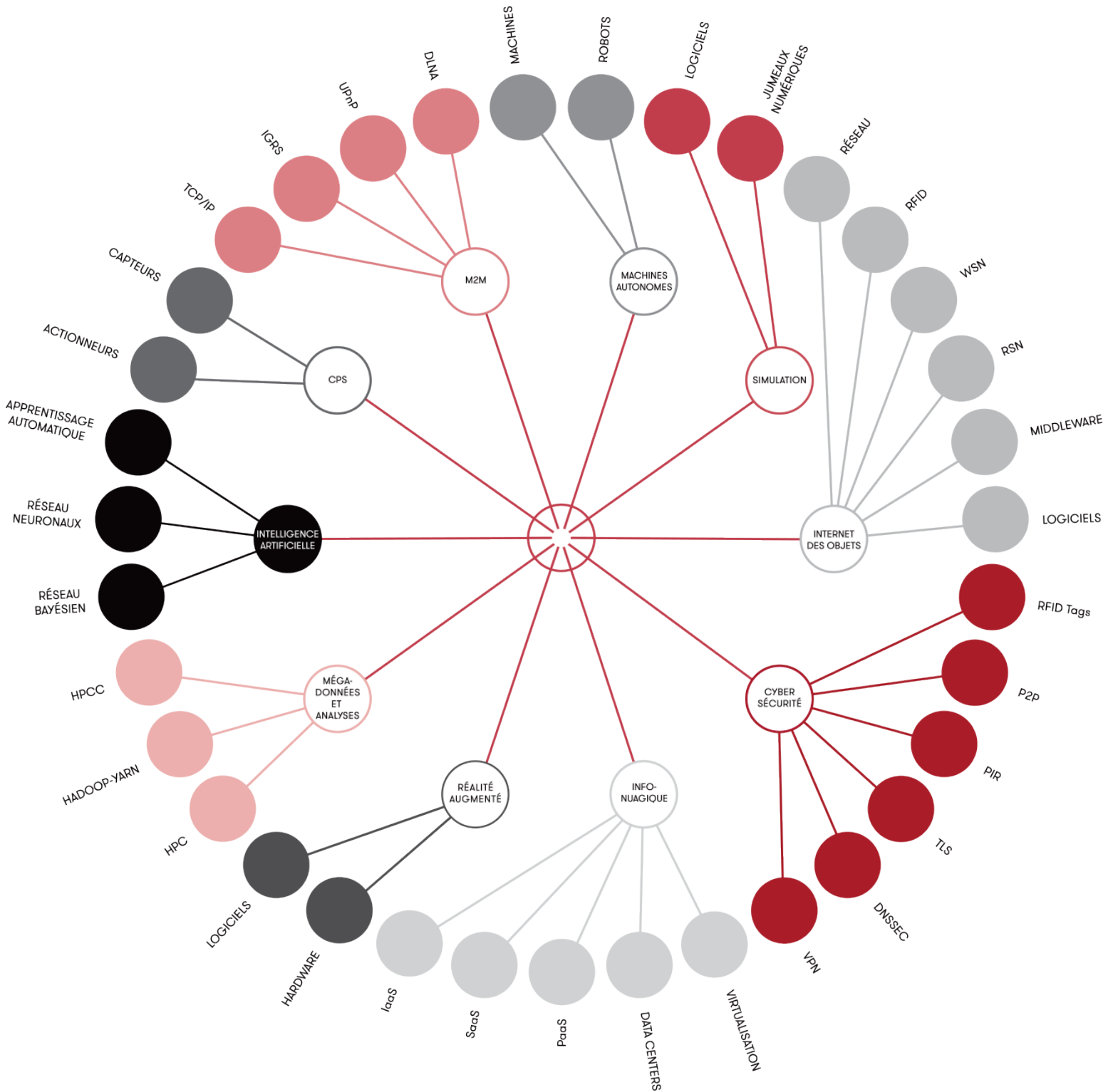
Cette section décrit des leviers technologiques susceptibles de contribuer à mettre en œuvre la stratégie identifiée. Nous organisons ici les leviers en dix groupes technologiques en redécoupant et en enrichissant la proposition en provenance du *Boston Consulting Group* [BCG, 2015]. Parmi ces groupes technologiques<sup>7</sup> on trouve : les données massives (*Big Data*), l'intelligence artificielle, l'infonuagique (*Cloud Computing*), l'Internet des objets, les systèmes cyberphysiques, 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, tels que schématisés à la Figure 4. Leur combinaison judicieuse permet la mise en œuvre de la stratégie numérique de l'entreprise.

---

<sup>7</sup> On notera que la fabrication additive n'apparaît pas ici comme un concept technologique pour l'Industrie 4.0 mais constitue un processus de fabrication, au même titre que les machines-outils ou les robots.

FIGURE 4 – Groupes technologiques et les ressources support - inspiré par [BCG, 2015]



### **DONNEES MASSIVES (*BIG DATA*) ET ANALYSE**

Les données massives, ou mégadonnées, et leur analyse, visent à traiter d'énormes volumes de données de sources et formats variés afin d'en dégager un sens et prendre de meilleures décisions. Par exemple, les données collectées en temps réel à partir du GPS des téléphones intelligents, caméras et feux de circulation, des bulletins météorologiques et même des médias sociaux, fournissent un ensemble de données variées permettant de prévoir les embouteillages et de proposer le meilleur itinéraire<sup>8</sup>. Dans le paradigme de l'Industrie 4.0, ces données peuvent provenir du processus, du produit ou des informations clients. On peut s'appuyer sur différentes ressources telles que, pour n'en nommer que quelques-unes : HPC (*High performance computing*), HPCC (*High-Performance Computing Cluster*) et la plate-forme HADOOP-YARN.

### **L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

L'intelligence artificielle est définie par Minsky comme « la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains, car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique »<sup>9</sup>. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'intelligence artificielle peut être appliquée à la prise de décision et promet, par exemple, de prendre en charge le pilotage des machines du processus de production. Différentes ressources peuvent être évoquées, comme les réseaux neuronaux, l'apprentissage automatique et les réseaux bayésiens.

### **L'INFONUAGIQUE (*CLOUD*)**

L'infonuagique est un modèle qui permet un accès ubiquitaire à des ressources informatiques partagées (réseaux, serveurs, stockage, applications et services) [NIST, 2011]. L'infonuagique permet d'externaliser la gestion de l'infrastructure informatique et d'en réduire les coûts. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'infonuagique facilite le partage de données entre sites ou systèmes. Même les données et les fonctionnalités liées à la production, la surveillance et le contrôle des processus pourront être déployés dans le nuage. Parmi les ressources impliquées, qui mènent à la virtualisation des infrastructures, notons : *Infrastructure as a service (IaaS)*, *Software as a Service (SaaS)*, *Platform as a Service (PaaS)*, les centres de données (*data centers*).

<sup>8</sup> <http://ltd.edc.org/big-data-driving-google-maps>: 'The Big Data Driving Google Maps'

<sup>9</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Intelligence\\_artificielle#cite\\_note-2](https://fr.wikipedia.org/wiki/Intelligence_artificielle#cite_note-2)

### **INTERNET DES OBJETS, IDO (*INTERNET OF THINGS, IOT*)**

L'Internet des objets est défini par le projet de norme ISO/IEC 30141 comme une infrastructure d'interconnexion d'entités physiques, de systèmes, de sources d'information et de services intelligents, capable de traiter des informations du monde physique et du monde virtuel, et d'influer sur les activités du monde physique. Pour l'Industrie 4.0, l'IdO permet de connecter une immense variété de ressources numériques et physiques, embarquées ou non. Le réseau ainsi formé permet de décentraliser la prise de décision et de réagir en temps réel au niveau des systèmes cyberphysiques (CPS). L'IdO utilise des technologies telles que les logiciels, les intergiciels (*middlewares*), les réseaux (WSN, RSN) et les puces RFID.

### **LES SYSTEMES CYBERPHYSIQUES (*CYBER-PHYSICAL SYSTEMS, CPS*)**

Les systèmes cyberphysiques sont des mécanismes capables d'échanger des informations de manière autonome, de déclencher des actions et de se contrôler mutuellement [Kagermann et al., 2013]. Les CPS constituent des nœuds mis en réseau par l'IdO. Pour l'Industrie 4.0, les CPS intègrent des capteurs, des éléments logiciels et de communication, ainsi que des actionneurs, permettant de surveiller et d'agir en temps réel sur le monde physique.

### **CYBERSECURITE**

La connectivité à la base de l'Industrie 4.0 fait apparaître un risque critique de cybersécurité. En effet, l'échange de données industrielles et le contrôle à distance de systèmes de production imposent d'accroître les mesures de sécurité. Pour cela, on peut recourir à des protocoles de communications fiables et éprouvés pour contrôler les accès aux systèmes de pilotage des machines. On peut mentionner quelques technologies support : VPN, P2P, PIR, TLS, DNSSEC et les étiquettes RFID [Weber & Weber, 2010].

### **MACHINES AUTONOMES**

Depuis longtemps, les machines sont utilisées en production pour accomplir des tâches complexes programmées. Dans le paradigme de l'Industrie 4.0, les machines sont dotées de nouvelles technologies de connectivité et deviennent plus autonomes, plus flexibles et coopératives. Elles interagissent les unes avec les autres et vont jusqu'à opérer avec les humains de façon sécuritaire (cobotique).

### **LA COMMUNICATION INTER MACHINES (M2M)**

Avec le nombre accru de systèmes et machines autonomes, les technologies de communications inter machines se développent. À l'inverse de l'IdO, associé à un réseau global, les technologies du M2M créent des réseaux locaux de machines autonomes. Le M2M s'appuie sur des protocoles et des standards tels que : TCP/IP, IGRS, UPnP, DLNA, OPC-UA.

### **SIMULATION**

Bien que la simulation existe déjà dans différentes sphères de l'ingénierie, pour l'Industrie 4.0 elle consiste à simuler l'intégralité des opérations de production. Les jumeaux numériques constituent donc le miroir virtuel du monde physique, incluant les machines et les mesures associées (vitesses, forces...) [Grieves, 2014], les produits et les humains. La simulation vise alors à tester et optimiser notamment le paramétrage des machines et les flux avant de transposer ces changements dans le monde réel. Cela permet de diminuer les temps de réglage et d'augmenter les performances.

### **LA REALITE AUGMENTEE**

Les systèmes de réalité augmentée superposent en temps réel des informations à la réalité environnante. Ainsi, on peut aujourd'hui virtuellement ajouter et visualiser un meuble de catalogue à son salon actuel via une tablette (Ikea). Pour l'Industrie 4.0, la réalité augmentée contribue à fournir des instructions d'assemblage ou de réparation en fonction de la situation actuelle, ou encore guider des opérateurs de chariot élévateur à l'intérieur d'un entrepôt<sup>10</sup>, en temps réel, jusqu'à la palette à récupérer.

La mise en œuvre d'éléments choisis parmi cet éventail d'alternatives pourra, selon les cas, redéfinir la manière de surveiller, de contrôler, d'optimiser ou encore de rendre autonome les produits, les processus ou les services de l'Industrie 4.0.

---

<sup>10</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=Uo528eZSqCw> – SAP & Vuzix



## 4. Proposition de démarche pour le déploiement

L'émergence de l'Industrie 4.0 repose essentiellement sur le numérique et la connectivité. De nombreuses alternatives technologiques sont désormais accessibles et engendrent de nouvelles opportunités de développement de produits, processus et services. Chaque entreprise doit alors adapter son modèle d'affaires et son positionnement stratégique face à ces nouvelles opportunités. Cette quatrième section propose une démarche en trois étapes pour aborder le déploiement de l'Industrie 4.0 :

- choisir le positionnement stratégique face aux opportunités de l'Industrie 4.0;
- choisir les leviers technologiques pour répondre au défi de l'Industrie 4.0 et;
- investir et déployer les solutions technologiques choisies.

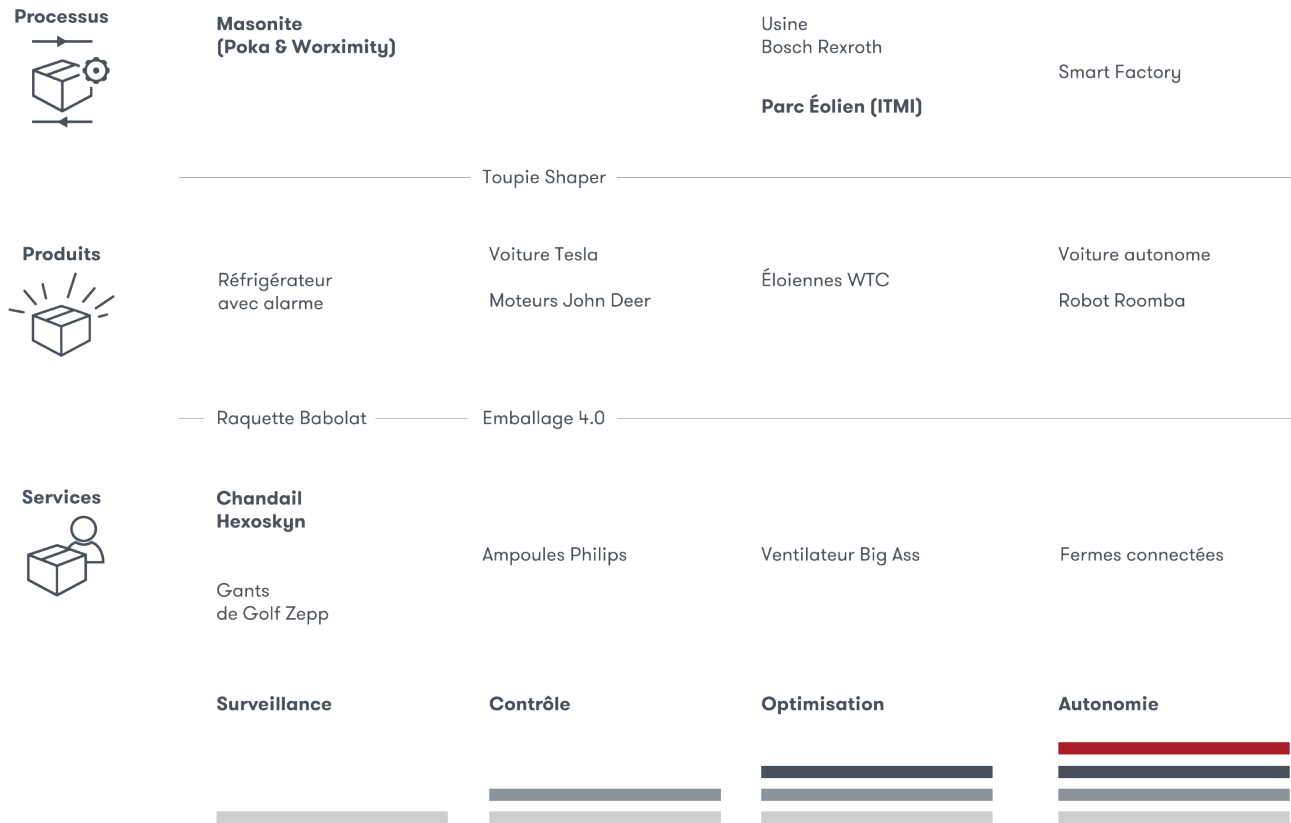
### 4.1. Choix du positionnement stratégique

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 5 qui offre douze positionnements stratégiques. Différents exemples cités dans ce rapport, ou en annexe, ont été positionnés à titre illustratif.

FIGURE 5 – Grille d'analyse des capacités des processus, produits et services



## 4.2. Choix des leviers technologiques

La deuxième étape consiste à identifier les technologies nécessaires au regard des objectifs choisis. La figure 4 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 clés de la réussite consiste à s'entourer des compétences requises, qu'elles soient internes à l'entreprise ou externes, via des sociétés de services.

### **4.3. Investir et déployer les solutions technologiques**

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'implémentation 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.

Il faut noter que ces nouvelles stratégies peuvent se réaliser dans un délai plus court que celles qui s'appuient traditionnellement sur des progiciels de gestion d'entreprises (PLM, ERP, CRM...). 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. Quelques exemples concrets**

### **5.1. Cas Masonite**

Le groupe Masonite est un fabricant de portes destinées aux marchés résidentiel, industriel et institutionnel. Avec un chiffre d'affaires de plus de 21 M\$, le site de Saint-Éphrem-de-Beauce se veut un pionnier dans le déploiement des solutions technologiques associées à l'Industrie 4.0.

L'entreprise s'est récemment consacrée à la mise en œuvre de deux projets majeurs pour la surveillance de ses processus de production. D'abord, pour répondre à des problématiques de sécurité, le site de St-Éphrem-de-Beauce a pris le parti de surveiller, communiquer et documenter ses processus dès l'apparition d'un souci de sécurité. Ainsi,

une notification est émise immédiatement pour avertir du souci et ainsi accélérer le traitement et la prise de décision. L'entreprise s'est pour cela appuyée sur une solution clés en main développée par Poka<sup>11</sup>.

Ensuite, pour caractériser les taux d'utilisation des équipements de production, plutôt que le travail des opérateurs, largement tributaire de la diversité des produits aux temps de cycle variables, le site de St-Éphrem-de-Beauce mesure désormais les temps à valeur ajoutée (TVA) des machines de production. Pour ce faire, des capteurs sont directement installés sur les machines. La captation des données et leur analyse repose sur les solutions de Worximity<sup>12</sup>.

La mise en place de ces deux solutions a nécessité la mise en œuvre de nouvelles bornes réseau et Wi-Fi pour accélérer la transmission des informations entre les capteurs et les systèmes de traitement. Le stockage et le traitement des données sont réalisés à travers l'infonuagique.

## 5.2. Cas Hexoskyn

L'entreprise Hexoskin propose un 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. On retrouve différents utilisateurs finaux tels que les athlètes de haut niveau, la recherche clinique, les agences spatiales, les organisations gouvernementales, le suivi des patients atteints de maladies chroniques, etc.

## 5.3. Cas ITMI

L'Institut technologique de maintenance industrielle (ITMI) s'est associé avec un autre CCTT, soit le TechnoCentre éolien, pour développer une solution logicielle permettant d'optimiser les processus de maintenance opérationnelle de parcs éoliens au Québec. Grâce aux données issues de l'éolienne, le système mis en place détecte des bris ou des défaillances de fonctionnement. Le logiciel peut donc informer l'opérateur des

---

<sup>11</sup> <https://www.poka.io/fr>

<sup>12</sup> <https://worximity.com/fr/>

problèmes et les algorithmes ajoutés au logiciel permettent de proposer les meilleurs scénarios d'interventions pour effectuer la maintenance. L'algorithme tient compte des conditions météorologiques et de la disponibilité des équipes de travail. De plus, les données recueillies permettent d'intégrer les concepts de maintenance prédictive, tout en améliorant les processus de maintenance préventive.

La mise en œuvre de cette solution, se base sur l'utilisation du réseau de fibres optiques déjà en place dans la région, des technologies liées aux données massives comme la fouille de données (*Data Mining*) et de nouveaux processus de communication. Le stockage des données de type Cloud est actuellement à l'étude pour prévenir les risques liés à la cybersécurité.

## 6. Suggestions de lecture

La synthèse présentée dans ce rapport s'appuie essentiellement sur l'analyse des publications répertoriées. Quelques-uns de ces documents se démarquent de l'ensemble. Aussi, nous sommes enclins à suggérer les documents suivants aux lecteurs intéressés à explorer davantage le thème de l'Industrie 4.0.

- Hermann, Pentek & Otto (2015) proposent une définition des concepts mis de l'avant par l'Industrie 4.0. Ils proposent également une synthèse des contributions disponibles dans la littérature scientifique.
- Kohler & Weisz (2015) proposent un document qui s'intéresse, à travers différents cas industriels, aux investissements consentis en Allemagne à des projets Industrie 4.0. Les auteurs soulignent l'impact du numérique sur différents champs de création de valeur plutôt qu'uniquement sur les processus de production.
- Porter & Heppelmann (2012) décrivent l'impact des produits intelligents et connectés sur la compétitivité des entreprises. Ils proposent une classification en quatre niveaux de capacités les fonctions attendues des produits intelligents et connectés.
- Boston Consulting Group (2015) propose un document qui organise en neuf piliers les technologies impliquées dans la transformation des processus industriels. Les auteurs quantifient les impacts de l'Industrie 4.0 dans le cas allemand.

## 7. Conclusion

Industrie 4.0 s'appuie sur le numérique et la connectivité en temps réel pour surveiller et agir sur les systèmes physiques. Industrie 4.0 apparaît comme une évolution logique des processus actuels, avec des objectifs similaires d'efficacité, mais au moyen de technologies plus accessibles. Du point de vue des processus manufacturiers, l'accroissement de l'agilité permet de tendre vers la production unitaire.

Cependant, bien que traitant des processus de production, l'Industrie 4.0 concerne également les autres aspects de la chaîne de création de valeur, soit les produits et les services. Ces trois champs de création de valeur constituent autant d'occasions de révision des stratégies d'entreprise pour créer de nouvelles opportunités d'affaires.

On distingue aussi quatre niveaux de capacité qui dépendent des fonctions attendues du système, en progressant de la surveillance, au contrôle, à l'optimisation, jusqu'à l'autonomie. C'est par la combinaison de ces deux dimensions que l'entreprise peut situer son positionnement stratégique dans la grille d'analyse des capacités des processus, produits et services.

Sur le plan opérationnel, un éventail de dix groupes technologiques est disponible pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0. Ces technologies sont assemblées au besoin, de manière à favoriser la décentralisation des décisions. La mise en œuvre de ces technologies peut être réalisée par itérations pour déployer graduellement la stratégie de développement des nouveaux processus, produits ou services. Enfin, soulignons que l'un des enjeux incontournables du passage à l'Industrie 4.0 consiste à réunir, au sein d'une équipe projet, l'ensemble des compétences exigées par la réalisation de la stratégie retenue.

## 8. Références

**BCG: Boston Consulting Group, (2015)**, "Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries"

**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. doi: 10.1109/MIE.2014.2312079

**Grieves, Michael (2014)** Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, White paper.

**Hermann M, Pentek T., & Otto, B (2015)** Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Working paper No. 01 / 2015. ISO/IEC CD 30141 - Internet of Things Reference Architecture (IoT RA)

**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 & Weisz (2015)**, "Industrie 4.0 : quelles stratégies numériques ?", Publication Bpifrance Industrie 4.0 rédigée par KOHLER C&C.

**NIST - Mell, P., & Grance, T. (2011)**. "The NIST definition of cloud computing", NIST Special Publication 800-145.

**Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014)**. How smart, connected products are transforming competition. Harvard Business Review, 92(11), 64-88.

**PwC : PricewaterhouseCoopers (2016)**, "Industry 4.0: Building the digital enterprise"

**Weber, Rolf H. & Weber, Romana (2010)** Internet of Things: Legal Perspectives, Springer



## 9. Annexe : Exemples de la grille d'analyse

La grille d'analyse des capacités des processus, produits et services, proposée à la Figure 5, indique le positionnement stratégique de 18 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<sup>13</sup>, un système d'ampoules connecté au téléphone intelligent 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<sup>14</sup> 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.

L'emballage 4.0<sup>15</sup> 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.

---

<sup>13</sup> <http://www.philips.fr/c-p/8718291241751/hue-lumiere-connectee-hue#see-all-benefits>

<sup>14</sup> <http://www.bigassfans.com/products/haiku/>

<sup>15</sup> <http://ici.radio-canada.ca/premiere/emissions/les-eclaireurs/segments/chronique/9148/emballage-connecte-intelligent-marketing-valeurs-consommation>

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.

La raquette de tennis PLAY<sup>16</sup> 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.

---

<sup>16</sup> <https://fr.babolatplay.com/play>

Organisme de recherche et d'innovation, le CEFRIO accompagne les entreprises et organisations dans la transformation de leurs processus et pratiques d'affaires par l'appropriation et l'utilisation du numérique. Membre de QuébecInno, le CEFRIO est mandaté par le gouvernement du Québec afin de contribuer à l'avancement de la société québécoise par le numérique. Il recherche, expérimente, enquête et fait connaître les usages du numérique dans tous les volets de la société. Son action s'appuie sur une équipe expérimentée, un réseau de plus de 90 chercheurs associés et invités ainsi que l'engagement de plus de 200 membres. Son principal partenaire financier est le Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI).

Dépôt légal :  
Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
Bibliothèque et Archives Canada  
ISBN 978-2-923852-71-3

**Québec**  
888, rue St-Jean  
Bureau 575  
Québec (Québec)  
G1R 5H6  
Canada

**Montréal**  
550, rue Sherbrooke Ouest  
Bureau 1770, Tour Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 1B9  
Canada

Téléphone  
418 523-3746

Téléphone  
514 840-1245



Principal partenaire financier

