



SEPT.
2017

IMPACTS DU NUMÉRIQUE AU SEIN DE L'INDUSTRIE, AU REGARD DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Étude réalisée pour le compte de
l'ADEME par Deloitte, G-SCOP et SATIE

Rapport final

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Deloitte Développement Durable (Benoît TINETTI, Arnaud LADEPECHE, Alexis LEMEILLET, Pierre-Alexis DUVERNOIS, Astrid MICHEL, Agathe VIANO), Deloitte In Extenso (Noémie KELLER, Stéphane FAUSSURIER, Clélia FISCHER), G-SCOP (Valérie ROCCHI, Peggy ZWOLINSKI), SATIE (Javier OJEDA). 2017. Impacts du numérique au sein de l'industrie, au regard de la transition énergétique et écologique. 147 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 16 MAR 001273

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Deloitte Développement Durable,
Deloitte In Extenso, G-SCOP, SATIE

Coordination technique - ADEME : BORDE Cyrielle
Service Entreprises et dynamiques industrielles

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
REMERCIEMENTS	5
GLOSSAIRE	6
1. INTRODUCTION	9
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	9
1.1.1. <i>Une révolution industrielle aux impacts mal connus</i>	9
1.1.2. <i>Objectifs pour l'ADEME</i>	10
1.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE	11
1.2.1. <i>Une méthode en trois temps</i>	11
1.2.2. <i>Périmètre de l'étude</i>	11
1.2.3. <i>Précisions sémantiques</i>	12
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE TECHNOLOGIQUE	13
2.1. PRÉAMBULE.....	13
2.1.1. <i>Caractérisation et compilations des sources bibliographiques recensées en fonction de leur pertinence</i>	13
2.1.2. <i>Méthodologie de collecte des documents et choix des technologies investiguées</i>	14
2.2. ENSEIGNEMENTS DE LA REVUE TECHNOLOGIQUE	17
2.2.1. <i>Origines du numérique</i>	17
2.2.2. <i>Avènement de l'industrie du futur</i>	17
2.2.3. <i>Numérique et industrie : évolution ou révolution ?</i>	19
2.2.4. <i>Descriptif des technologies</i>	23
2.3. FOCUS SUR LE MODÈLE NORD-AMÉRICAIN ET LES STRATÉGIES DES LEADERS DU NUMÉRIQUE	32
2.3.1. <i>Stratégies « Industry du futur » : L'ère de la reconquête industrielle. Quels impacts en matière d'environnement ?</i>	32
2.3.2. <i>Stratégie des leaders du numériques vis-à-vis de l'industrie du Futur</i>	33
2.3.3. <i>En synthèse</i>	34
2.4. CONCLUSIONS DE LA REVUE TECHNOLOGIQUE.....	34
3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ENVIRONNEMENTALE	36
3.1. MÉTHODOLOGIE DE COLLECTE ET D'ANALYSE DES DOCUMENTS	36
3.2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE DANS L'INDUSTRIE, UN SUJET ENCORE PEU INVESTIGUÉ	37
3.3. DES APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES HÉTÉROGÈNES ET SOUVENT INCOMPLÈTES	38
3.3.1. <i>Un sujet prédominant dans les pays industrialisés</i>	39
3.3.2. <i>Des méthodologies d'évaluation diverses</i>	39
3.3.3. <i>Une couverture incomplète du cycle de vie</i>	40
3.3.4. <i>Un réflexe d'évaluation multi-critères non généralisé</i>	40
3.3.5. <i>Des impacts directs, indirects et systémiques encore mal identifiés</i>	41
3.4. DES TENDANCES DIFFICILES À GÉNÉRALISER D'UNE ÉTUDE À L'AUTRE.....	42
3.4.1. <i>Focus sur la fabrication additive</i>	42
3.4.2. <i>Autres technologies abordées</i>	44
3.4.3. <i>Focus sur les études « globales »</i>	45
3.5. CONCLUSIONS DE LA REVUE ENVIRONNEMENTALE.....	46
4. CAS D'ÉCOLE	48
4.1. SÉLECTION DES CAS D'ÉCOLE	48
4.2. ÉTUDE DES CAS D'ÉCOLE.....	52
4.3. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DES CAS D'ÉCOLE	52
4.3.1. <i>Classements possibles des cas d'école</i>	52
4.3.2. <i>Enseignements pour l'ensemble des cas d'école</i>	59
4.3.3. <i>Enseignements différenciés pour les deux catégories de cas d'école</i>	65
4.3.4. <i>Points de vigilance pour l'ensemble des cas d'école</i>	66

5. RECOMMANDATIONS : CONCILIER TRANSITION NUMÉRIQUE ET TRANSITION ÉCOLOGIQUE, AU CŒUR DE L'USINE DU FUTUR.....	69
5.1. SAVOIR. COMBLER LE MANQUE ACTUEL DE CONNAISSANCES ET DE DONNÉES SUR LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES AU SEIN DE L'INDUSTRIE	70
5.2. VOULOIR. FACILITER L'ENGAGEMENT DES ACTEURS DU NUMÉRIQUE ET DES INDUSTRIELS DANS UNE TRANSITION NUMÉRIQUE RESPONSABLE	72
5.3. POUVOIR. ADAPTER LES RÈGLES DE FINANCEMENT DE L'USINE DU FUTUR EN CORRÉLANT TRANSITION NUMÉRIQUE ET TRANSITION ÉCOLOGIQUE DE MANIÈRE PLUS SYSTÉMATIQUE	73
5.4. RELEVER LES DÉFIS STRATÉGIQUES POUR CONSTRUIRE UNE USINE DU FUTUR RESPONSABLE ET DURABLE	74
ANNEXES.....	76
ANNEXE I BIBLIOGRAPHIE	76
I.1 REVUE TECHNIQUE	76
I.2 REVUE ENVIRONNEMENTALE	78
ANNEXE II CAS D'ÉCOLE	84
II.1 CAS N°1 : LA SIMULATION NUMÉRIQUE 4.0.....	84
II.2 CAS N°2 : LA PERSONNALISATION DE MASSE DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION	91
II.3 CAS N°3 : L'OPTIMISATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS, PAR L'INTRODUCTION DE CAPTEURS ET L'ANALYSE DE DONNÉES.....	95
II.4 CAS N°4 : LE PILOTAGE À DISTANCE DU PROCÉDÉ INDUSTRIEL.....	101
II.5 CAS N°5 : LE BUSINESS INTELLIGENCE	105
II.6 CAS N°6 : LA COBOTIQUE AU SERVICE DES OPÉRATEURS.....	109
II.7 CAS N°7 : LA FABRICATION ADDITIVE SABLE.....	118
II.8 CAS N°8 : LA TRAÇABILITÉ DES FLUX ET DES PRODUITS PAR PUCES RFID OU FICHIERS NUMÉRIQUES ASSOCIÉS.....	127
II.9 CAS N°9 : LA MAINTENANCE PRÉVISIONNELLE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES	137
ANNEXE III IMPACT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE ET DE L'INDUSTRIE : ÉTAT DE L'ART SUR LA MAINTENANCE DES MACHINES ÉLECTRIQUES.....	140
III.1 INTRODUCTION	140
III.2 LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAINTENANCES.....	140
III.3 CLASSIFICATION DES DÉFAUTS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.....	141
III.4 LE VIEILLISSEMENT DES ACTIONNEURS ÉLECTRIQUES	143
III.5 LE SUIVI DES PERFORMANCES DES ACTIONNEURS ÉLECTRIQUES.....	143
III.6 BIBLIOGRAPHIE.....	144
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	146

REMERCIEMENTS

Nous remercions les membres du Comité de Pilotage qui ont activement participé à l'étude :

ADEME	Cyrielle Borde Marlène Dresch Thomas Gourdon David Marchal Sylvie Padilla
FING	Jacques-François Marchandise

Ainsi que les participants au comité de sélection des cas d'école :

MINISTÈRE DES FINANCES	Yves-Marie Brault
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT	Philippe Biron
AFIM/AFNOR	Claude Pichot
FIVES	Sébastien Devroe Pauline Plisson
SIEMENS	Franck Mercier Vincent Masztalerz
UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES	Damien Trentesaux

Nous remercions enfin tous les acteurs qui ont accepté de participer à cette étude :

- Air Liquide
- CETIM
- Dassault Systèmes
- Editag
- Endel
- Engie
- Fédération Forge Fonderie
- Ffly4u
- Fonderie Boutté
- Fives
- Georges Pernoud
- Isybot
- IRT Jules Verne
- Saint-Gobain
- SAP
- Schneider Electric
- Siemens
- SNCF
- Solvay
- Voxeljet
- WRI

GLOSSAIRE

Certains termes de ce glossaire (indiqués par un [S]) sont repris de : Syntec Numérique (2016), *Transformer l'industrie par le numérique – Livre blanc industrie du futur* ; D'autres, (indiqués par un [C]), proviennent de CCI Innovation (2017), *Glossaire de l'industrie 4.0*.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)	<p>Méthode d'évaluation quantitative des impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Ayant pris son essor au début des années 1990, l'ACV est une méthode :</p> <ol style="list-style-type: none">1. Multi critères : plusieurs types d'impacts environnementaux étudiés ;2. Multi étapes : l'ensemble du cycle de vie du produit/service/procédé est étudié ;3. Standardisée, par la série des normes ISO 14040.
APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MACHINE LEARNING) [C]	<p>Processus de développement, d'analyse et d'implémentation conduisant à la mise en place de procédés systématiques. Il s'agit d'un programme permettant à un automate ou une machine un apprentissage automatisé, de façon à pouvoir réaliser un certain nombre d'opérations très complexes. L'objectif visé est de rendre la machine capable d'apporter seule une solution à un problème complexe. Il s'agit de la brique mathématique et technique du <i>Big Data</i>.</p>
BIG DATA [S]	<p>Capacité à collecter, stocker et traiter en temps réel des flux très importants de données de nature diverse en vue de leur appliquer toutes sortes de traitements analytiques et statistiques avancés qui relèvent de l'intelligence artificielle (analyse prédictive, <i>machine learning</i>, <i>deep learning</i>, etc.). Ces traitements puissants visent à révéler des informations difficilement détectables par les voies traditionnelles et susceptibles de créer de la valeur. Ils permettent l'analyse en continu et en temps réel de l'environnement. Le <i>big data</i> combiné à l'<i>IoT</i> rend possible le pilotage de l'usine par les données.</p>
CAPTEURS [C]	<p>Système analytique intégré transformant une information physique en un signal électrique. Le capteur permet la détection, la transmission et l'analyse d'information recherchée.</p>
CLOUD COMPUTING [S]	<p>Modèle désormais établi d'industrialisation et de commercialisation de l'informatique. Dans le cloud, le fournisseur met à disposition de l'entreprise des ressources informatiques (des applications, par exemple) comme un service. L'entreprise utilisatrice n'a plus besoin d'acheter l'équipement matériel éventuel et la licence du logiciel. Elle s'affranchit également de la maintenance de l'ensemble. Elle ne paie que le service consommé. Ses dépenses d'investissement de capital (Capex) sont transformées en dépenses opérationnelles (Opex), plus aisément maîtrisables. Les applications proposées dans le cloud sont appelées applications SaaS (<i>Software as a Service</i>).</p>
COBOTIQUE [S]	<p>Encore appelée robotique collaborative, cette branche de la robotique regroupe les systèmes conçus pour interagir et collaborer avec l'être humain. Le robot travaille avec l'opérateur en phase de production dans une zone commune. Il intègre des fonctions de sécurité (capteurs, caméra, sécurité intrinsèque, etc.) permettant de limiter, voire supprimer la mise en place d'enceinte grillagée et de fluidifier l'interaction homme-robot. L'opérateur est déchargé des tâches les plus laborieuses ou répétitives au profit de tâches à plus forte valeur ajoutée. La production y gagne car la technologie permet d'accéder à des pièces inaccessibles aux humains.</p>
CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR (CAO) [C]	<p>La conception assistée par ordinateur comprend l'ensemble des logiciels et techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement, à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numériques, et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.</p>

CONTROLE NON DESTRUCTIF [C]	Les contrôles non destructifs sont un ensemble de méthodes permettant de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux sans les dégrader à différents stades de leur cycle de vie. Cette technologie utilise à présent le numérique pour élever le niveau de contrôle, tout en privilégiant des méthodes sans rayonnement ni produit chimique et en minimisant les coûts. Il apporte une vision globale, précise et non invasive d'équipements en cours d'utilisation. Il permet par exemple d'identifier des fissures ou des anomalies de certaines pièces.
EFFET INDIRECT, SYSTEMIQUE	DIRECT, Les effets directs concernent les technologies elles-mêmes, les effets indirects concernent l'impact des technologies sur d'autres secteurs, les effets systémiques impliquent les changements structurels liés à l'arrivée de ces technologies.
EFFET REBOND	Réduction voire annulation des économies d'énergie par des modifications du comportement de la société, directs mais aussi indirects.
FABRICATION ADDITIVE (OU IMPRESSION 3D) [S]	Ce procédé de fabrication transforme un modèle numérique 3D en un objet physique, par ajout de couches successives d'un matériau. Plusieurs matériaux (plastique, métal...) et techniques peuvent être utilisés. La fabrication additive permet de fabriquer des formes complexes en modèle unique sur de grandes variétés de déclinaison. Elle permet donc flexibilité et efficacité énergétique, permettant par exemple de concevoir des échangeurs de chaleur en optimisant les circuits pour limiter la perte de pression. En limitant la matière là où elle est nécessaire, elle permet un usage maîtrisé des ressources et un allègement des pièces, ce qui permet de limiter les consommations de carburant pour le transport. Elle est aujourd'hui bien adaptée à la fabrication de pièces et produits unitaires, de prototypes et de petites séries.
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	L'intelligence artificielle est définie par le Larousse comme l'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. L'intelligence artificielle (IA) vise donc à reproduire au mieux, à l'aide de machines, des activités mentales, qu'elles soient de l'ordre de la compréhension, de la perception, ou de la décision.
INTERNET DES OBJETS (INTERNET OF THINGS) (IOT) [S]	L'Internet des objets est l'extension du réseau Internet au monde physique. Cette organisation permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets virtuels ou physiques grâce aux technologies de l'information et de la communication. Une version industrielle existe, grâce à une pose de capteurs sur les machines et les objets en cours de fabrication, afin de connaître l'historique de production de l'objet et la demande finale pour mieux répondre de manière centralisée. Pour l'industriel, l'Internet des objets présente un double intérêt : il ouvre de nouvelles opportunités de création de valeur par la connexion de ses produits et permet d'optimiser et de rendre flexible la production par la connexion de son usine.
JUMEAU NUMERIQUE [C]	Les logiciels permettent de simuler l'ergonomie, la productivité et la consommation d'énergie d'une usine avant sa conception. Cette usine virtuelle permet ensuite de piloter l'usine réelle. Elle fournit une base de données dynamique, qui grâce aux systèmes de capteurs, permet de simuler différentes hypothèses, d'anticiper les incidents, de modifier la production et de mieux anticiper la maintenance.
NUMERISATION DE LA CHAINE DE VALEUR [C]	DE Il s'agit de l'ensemble des techniques de productions dites du futur. Elle assure une interconnexion des outils et des postes de travail à travers l'internet des objets et les réseaux virtuels de contrôle. Son principe : rendre la production la plus adaptable possible et cantonner l'allocation des ressources aux stricts besoins pour économiser l'énergie et la matière première.

RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (RFID) [C]	Technologie d'identification automatique utilisant le rayonnement radiofréquence pour identifier les objets porteurs d'étiquettes spécifiques lorsqu'ils passent à proximité d'un interrogateur.
REALITE AUGMENTEE [S]	La réalité augmentée est la superposition d'informations numériques sur une image réelle regardée à travers un écran, des lunettes ou un viseur. En milieu industriel, la réalité augmentée peut servir à guider l'opérateur pour effectuer certaines tâches ou certains gestes.
REALITE VIRTUELLE [S]	La réalité virtuelle est un environnement simulé créé par ordinateur dans lequel l'utilisateur est immergé et avec lequel il peut interagir. Elle trouve sa place aujourd'hui dans les phases de conception pour faciliter la communication autour d'un prototype numérique, par exemple.
SIMULATION NUMERIQUE [C]	La simulation numérique est une série de calculs effectués sur un ordinateur pour reproduire un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. La simulation numérique répond à des enjeux de réduction des coûts et des délais de production, ainsi qu'à une recherche de la qualité du produit / procédé.
SYSTEMES CYBER-PHYSIQUES	Les systèmes cyber-physiques sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacité de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau ¹ . Les véhicules autonomes sont un exemple de systèmes cyber-physiques.
TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (TIC)	Ensemble des techniques et des équipements informatiques permettant de communiquer à distance par voie électronique.

¹ Olivier Cardin [IRCCyN, Nantes], Damien Trentesaux [LAMIH, Valenciennes], *Les systèmes cyber-physiques de production*

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

1.1.1. Une révolution industrielle aux impacts mal connus

L'augmentation rapide des capacités de calcul, selon le modèle de la loi de Moore (doublement de la capacité des composants électroniques tous les 18 mois), a permis le développement scientifique et l'arrivée à maturité de nombreuses technologies, matérielles et d'algorithmes (*machine learning, big data, cloud computing, robot intelligent, internet des objets, drones autonomes, impression 3D, etc.*).

Au-delà du cœur de métier industriel, la quasi intégralité des fonctions de l'entreprise se retrouvent impactées par l'arrivée des technologies numériques, de la R&D à la gestion en passant par les achats, la production, le stockage et la logistique, le marketing ou les ventes.

Les entreprises doivent s'adapter à ce changement rapide si elles ne veulent pas être dépassées par les développements du secteur et par leurs concurrents. L'industrie est bouleversée, au point que nombreux sont ceux qui parlent aujourd'hui de 4^e révolution industrielle, et de l'avènement d'une industrie du futur. Le tableau ci-dessous présente de manière plus détaillée les grandes caractéristiques des quatre grandes révolutions industrielles.

Tableau 1 : Proposition de synthèse des Révolutions Industrielles (RI) depuis 1750

Dates	1 ^{ère} RI 1780 – 1850	2 ^e RI 1880 – 1950	3 ^e RI 1970 – 2020	4 ^e RI 2020 – 2050
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> Semi-mécanique (petits ateliers) 	<ul style="list-style-type: none"> Mécanique (chaînes de montage) Production de masse 	<ul style="list-style-type: none"> Techniques communicantes Informatique 	<ul style="list-style-type: none"> Numérique
Inventions techniques majeures	<ul style="list-style-type: none"> Machine à vapeur Métier à tisser mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> Moteur à explosion Plastique 	<ul style="list-style-type: none"> Microprocesseur Satellites ERP, CRM 	<ul style="list-style-type: none"> Impression 3D Systèmes cyber physique Réalité virtuelle / augmentée Intelligence artificielle
Nouvelles sources d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> Hydraulique Charbon 	<ul style="list-style-type: none"> Electricité Pétrole Gaz 	<ul style="list-style-type: none"> Nucléaire Energies renouvelables 	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogène
Moyens de transport	<ul style="list-style-type: none"> Navires à vapeur et voies navigables Locomotives et chemin de fer 	<ul style="list-style-type: none"> Automobile et réseaux routiers Avions 	<ul style="list-style-type: none"> Trains à grande vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> Véhicules autonomes
Canaux de diffusion de l'information	<ul style="list-style-type: none"> Télégraphe Courrier Presse écrite 	<ul style="list-style-type: none"> Téléphone Radio 	<ul style="list-style-type: none"> Email Télévision Internet 	<ul style="list-style-type: none"> Réseaux sociaux Cloud computing Réseaux LPWAN²

Cette mutation est accompagnée par les pouvoirs publics qui voient, notamment en Europe, cette nouvelle révolution industrielle comme un levier pour redresser et redynamiser le tissu industriel européen.

² Décrits comme « les réseaux de l'internet des objets », les technologies LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) permettent la communication de nombreux objets connectés au sein de réseaux de couverture nationale et internationale.

Il existe actuellement plusieurs initiatives internationales relatives au déploiement de l'industrie du futur : en Allemagne (*Industrie 4.0*), aux États-Unis (*Advanced manufacturing, Manufacturing renaissance, National network for manufacturing innovation*), en Inde (*Make in India*), au Japon (*Innovation 25*), en Chine (*Intelligent Manufacturing*), etc. L'industrie du futur est l'un des piliers du 8e Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) de l'Union Européenne, au travers des programmes de recherche « Horizon 2020 » et « Factories of the Future ». En France, l'industrie du futur est perçue comme une priorité politique.

12 septembre 2013 : Lancement de la Nouvelle France Industrielle (NFI) par le Président de la République, à l'Élysée.

14 avril 2015 : Lancement de l'Industrie du futur (vue comme une matrice de la NFI) par le Président de la République, à Figeac.

18 mai 2015 : Lancement de la seconde phase de la Nouvelle France Industrielle par Emmanuel Macron, ministre de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, et présentation des 9 solutions industrielles, à l'École des Mines de Nantes.

20 juillet 2015 : Création de l'Alliance Industrie du futur, organe « exécutif » de NFI.

Encadré 1 : Grandes dates de l'Industrie du Futur en France

Le **projet « Industrie du Futur »** va jouer un rôle central dans la démarche de la seconde phase de la Nouvelle France Industrielle, avec pour objectif d'amener chaque entreprise à franchir un pas sur la voie de la modernisation de son outil industriel et de la transformation de son modèle économique par le numérique.

Ce contexte politico-économique très favorable à l'émergence de l'industrie du futur a engendré une vision extrêmement positive et quasi unanime à son encontre. Cette transformation fait l'objet d'un large consensus, et la question des externalités négatives de ce nouveau modèle industriel n'est que rarement abordée.

Or les enjeux associés à l'essor du numérique dans l'industrie sont nombreux. Selon le *Guide pratique de l'usine du futur*³, « il s'agit de poursuivre la modernisation de l'outil de production et d'accompagner les entreprises dans la transformation de leurs modèles d'affaires, de leurs organisations, de leurs modes de conception et de commercialisation, dans un monde où les outils numériques font tomber la cloison entre industrie et services »⁴.

Sans présager des réponses, l'usage accru du numérique au sein de l'industrie soulève des **questionnements importants sur les plans environnementaux** (quels bénéfices ? sur quels indicateurs ? et dans quelles conditions ?), **techniques** (quel impact sur l'appareil industriel ?), **économiques et sociaux** (comment cela va-t-il transformer le marché et quels seront les impacts sur la société (emplois, qualification, etc.) ?).

De nombreuses études, dont celle réalisée par Deloitte Suisse courant 2015⁵, montrent que les interactions entre les multiples dimensions du numérique conduisent à une transformation de plus en plus rapide de l'industrie, touchent et vont toucher de manière importante toutes les fonctions de celle-ci.

1.1.2. Objectifs pour l'ADEME

Cette étude doit permettre, dans un premier temps, de replacer le numérique dans le contexte historique du développement industriel, et de dresser une typologie des impacts du numérique.

Dans un second temps, elle vise à établir des éléments permettant d'objectiver et de quantifier (dans la mesure du possible) les impacts du numérique dans l'industrie, au regard de la transition énergétique et écologique. Les impacts étudiés sont à la fois :

- **Économiques** : volumes produits, investissements nécessaires, évolution des coûts, économies réalisées, temps de retour sur investissement, etc. ;

³ *Guide pratique de l'usine du futur, Enjeux et panorama de solutions*, Usine du futur, FIM, Alliance Industrie du Futur, Edition mai 2016

⁴ *Guide pratique de l'usine du futur. Enjeux et panorama de solutions*, Fédération des Industries Mécaniques, Alliance Industrie du Futur, 2015

⁵ *Industry 4.0, Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*, Deloitte Switzerland, 2015

- **Environnementaux** : consommations de matières et d'énergie, rejets de polluants (dans l'air, l'eau, le sol), effets rebonds du numérique, etc. ;
- **Sociaux** : évolution de l'emploi et des conditions de travail, dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place, etc.

Enfin, l'étude de l'ensemble de ces éléments doit permettre d'identifier les leviers afin de faire converger industrie du futur et transition écologique et énergétique.

1.2. Approche méthodologique de l'étude

1.2.1. Une méthode en trois temps

Pour atteindre les objectifs cités précédemment, l'étude s'articule en trois phases :

- **Phase 1** : État des lieux bibliographique technique et environnemental sur le numérique dans l'industrie, et identification de « cas d'école » ;
- **Phase 2** : Étude des « cas d'école » et projections ;
- **Phase 3** : Recommandations.

1.2.2. Périmètre de l'étude

Dans le cadre de cette étude, nous considérerons que les termes « Usine du futur » et « Industrie du futur » sont synonymes. Le terme d'Industrie 4.0 est quant à lui spécifiquement associé à la démarche allemande, et nous n'emploierons donc ce terme que dans le cas d'une référence à ce modèle.

Par ailleurs, le périmètre de l'étude se focalise aux industries de première transformation et manufacturières : industries automobiles, navales et aéronautiques, industries mécaniques et fonderie, construction électrique et électronique, industries agro-alimentaires, papier-carton, chimie, minéraux non métalliques, non ferreux, sidérurgie. Ne sont donc pas concernées les activités relatives au tertiaire et aux services (pour les services non liés à une externalisation d'une activité industrielle).

Enfin d'un point de vue technologique, le périmètre de l'étude englobe à la fois des technologies matures, renforcées par les outils numériques, et des technologies émergentes ou sur le point de l'être, et ce, sur l'ensemble du cycle de vie industriel, de la conception à la maintenance, en passant par le pilotage, la fabrication et la gestion des données.

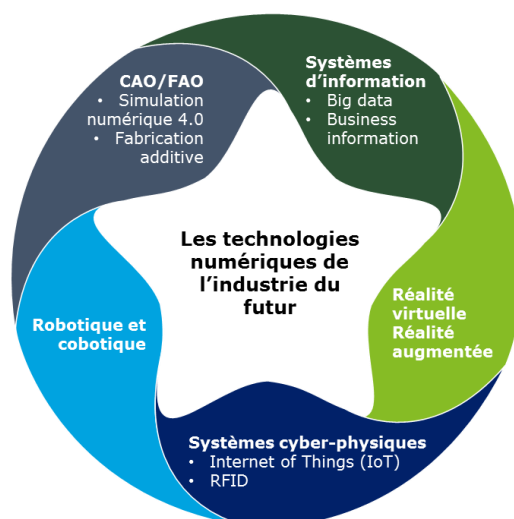


Figure 1 : Technologies étudiées – Périmètre de l'étude⁶

⁶ Schéma Deloitte Développement Durable, adapté du *Guide pratique de l'usine du futur*.

1.2.3. Précisions sémantiques

Il est important de préciser le lien entre le « numérique » et d'autres termes proches comme « digital », « analogique », « informatique » et « électronique », qui sont souvent confondus, que ce soit par les experts ou par le grand public.

Numérique et digital

L'adjectif « numérique » vient du latin *numerus* (« nombre », « multitude ») et signifie « qui relève des nombres, qui est représenté par un nombre ». Dans le contexte des nouvelles technologies de l'information et de la communication, l'adjectif numérique se rapporte à la « représentation d'informations ou de grandeurs physiques au moyen de caractères, tels que des chiffres, ou au moyen de signaux à valeurs discrètes »⁷.

Le mot « numérique » renvoie donc au processus de numérisation, qui consiste à reproduire techniquement les valeurs d'un phénomène physique non sur le mode analogique (valeurs continues), mais en convertissant toutes les informations qui le constituent en caractères chiffrés (valeurs discrètes)⁸. Il revient ensuite à un matériel informatique de traiter les informations numérisées, c'est-à-dire exprimées par une combinaison de nombres (en l'occurrence des 0 et des 1).

Issu du latin *digitus*, qui signifie « doigt », l'adjectif « digital » signifie :

- En français, « qui appartient aux doigts » ;
- En anglais, « qui utilise les nombres »⁹.

Le terme « digital » en français est donc un anglicisme auquel le terme « numérique » doit être substitué. L'adjectif « numérique » sera systématiquement utilisé dans ce rapport d'étude.

Numérique, informatique et électronique

D'un point de vue étymologique, le mot « informatique » est formé de l'association des termes « information » et « automatique », tandis que l'électronique est la partie de la physique étudiant les phénomènes où sont mis en jeu des électrons à l'état libre. L'informatique et l'électronique sont deux sciences dont le domaine d'étude est le traitement de l'information. Comme résumé dans le tableau ci-dessous, elles diffèrent dans le type d'information qu'elles traitent et dans les applications pratiques qui en sont dérivées.

Tableau 2 : Informatique et électronique

Science	Information traitée	Applications pratiques
Informatique	Information comme support des connaissances et des communications (texte, image, son, vidéo)	<ul style="list-style-type: none">• Matériel informatique (hardware) : ordinateurs, tablettes, smartphones, etc.• Logiciels informatiques (software)
Electronique	Signaux électriques : <ul style="list-style-type: none">• Signaux analogiques (continus)• Signaux numériques (discrets)• Signaux de puissance¹⁰	<ul style="list-style-type: none">• Composants électroniques : transistors, résistances, condensateurs, etc.• Circuits électroniques (ensemble de composants électroniques)

Les applications informatiques et électroniques sont les deux supports du numérique : ces trois domaines sont donc intrinsèquement liés.

⁷ Définitions du Larousse.

⁸ *La Science de l'information, la technologie de l'information*, Que sais-je, PUF, 2004

⁹ Selon l'Académie française, c'est parce que l'on comptait sur ses doigts que du nom latin a aussi été tiré, en anglais, *digit*, « chiffre », et *digital*, « qui utilise des nombres ».

¹⁰ « L'électronique de puissance est l'ensemble des techniques qui s'intéressent à l'énergie contenue dans les signaux électriques, contrairement aux autres disciplines électroniques, qui elles s'intéressent principalement à l'information contenue dans ces signaux. L'objectif est le contrôle ou la transformation de l'énergie électrique. La gamme de puissance traitée en électronique de puissance varie de quelques microwatts à plusieurs mégawatts. » (Article Wikipédia *Electronique*)

2. Revue bibliographique technologique

2.1. Préambule

2.1.1. Caractérisation et compilations des sources bibliographiques recensées en fonction de leur pertinence

Afin d'identifier les documents les plus pertinents et adaptés au contexte de cette étude, chaque source bibliographique identifiée a été consignée dans un fichier Excel suivant un certain nombre de critères d'analyse (voir tableau suivant), choisis en fonction des objectifs à atteindre. Ils sont là pour effectuer un pré-tri des références bibliographiques, et pour faciliter l'analyse comparative.

Le fichier Excel a été décomposé en quatre onglets distincts :

- Guide de lecture : Introduction à l'ensemble du fichier, fournit les clés de lecture pour sa compréhension et son exploitation ;
- Revue technologique : Cœur du fichier ; tableau rassemblant l'ensemble des publications identifiées dans la phase 1 de l'étude, ainsi que les différents critères de caractérisation auxquelles elles sont soumises ;
- Revue environnementale : idem pour les impacts environnementaux ;
- Listes : Onglet annexe où sont rassemblées les listes pour les colonnes à choix déterminées de la grille d'analyse du tableau de l'onglet « Revue bibliographique ».

Le tableau suivant reprend les éléments de l'onglet « Guide de lecture » et notamment les différents critères intégrés à la grille d'analyse des publications. Sont distingués les champs libres (pas de restriction sur le remplissage) des champs restreints (choix entre plusieurs propositions).

Tableau 3 : Liste de critères de la grille d'analyse Excel

Nom du Champ	Rôle / Description	Revue environnementale	Revue technologique
Id	Champ verrouillé - Sert au référencement des différentes publications	X	X
Titre	Champ libre - Titre de la publication	X	X
Nom des auteurs	Champ libre - Nom des auteurs de la publication. Quand pertinent, sont distingués le commanditaire et le réalisateur de l'étude	X	X
Année de publication	Champ libre	X	X
Nombre de pages	Champ libre	X	X
Maturité et degré de diffusion	Champ restreint – évalue le degré de maturité de la technologie étudiée	X	X
Objectifs de la publication	Champ restreint - définit le but à atteindre de la publication.	X	X
Secteur industriel visé	Champ libre	X	X
Technologie du numérique étudiée	Champ libre - périmètre de la publication en termes d'applications TIC visées	X	X
Type de document	Champ restreint - Distinction entre rapports d'étude et articles scientifiques	X	X
Type d'étude	Champ libre - distinction entre analyses de services, produits, études prospectives, etc.	X	X

Nom du Champ	Rôle / Description	Revue environnementale	Revue technologique
Type d'auteur	Champ restreint - Distinction entre académiques, consultants, pouvoirs publics, consortium mixte, etc.	X	X
Type de méthode	Champ restreint - distinction entre méthodes quantitatives et qualitatives	X	X
Type d'évaluation environnementale	Champ restreint - Ajout de précisions sur la méthodologie employée (ACV, empreinte carbone, etc.)	X	
Revue indépendante	Champ restreint - Mention ou non d'une revue de l'étude par un tiers indépendant	X	X
Étapes du processus de production considérées	Champ restreint - Distinction les études mono-étape de celles incluant plusieurs phases voire toutes les phases du cycle de vie des applications TIC visées	X	X
Exhaustivité des effets environnementaux étudiés	Champ restreint - Distinction entre études multi critères et études mono critères (GES uniquement par exemple)	X	
Périmètre géographique	Champ restreint - Représentativité sur les données d'usage, sur le périmètre de la mission	X	X
Impacts analysés	Champ restreint - Distinction entre impacts directs, indirects ou systémiques des TIC	X	
Prise en compte des effets rebond	Champ restreint - Considération d'effets rebond ou non, et si oui lesquels	X	
Points-clés / Commentaires	Champ libre - Énumération des principaux points d'attention de la publication, ses limites, etc.	X	X
Acteurs à potentiellement contacter	Cible d'éventuels interlocuteurs pertinents pour la phase d'interviews de la mission.	X	X
Cas d'école	Cible d'éventuels cas d'études pour la prochaine phase de la mission	X	X

L'analyse faite dans ce chapitre (revue technique) et le suivant (revue environnementale) a été conduite via l'analyse de ce fichier.

2.1.2. Méthodologie de collecte des documents et choix des technologies investiguées

La revue bibliographique réalisée s'appuie sur des publications scientifiques et sur de la littérature grise (rapports de cabinets de conseil, de fédérations professionnelles, de Think Tanks et des pouvoirs publics) principalement françaises mais également européennes lorsqu'il est apparu qu'elles étaient particulièrement pertinentes.

La collecte des documents s'est déroulée en plusieurs temps et de manière différenciée selon le type de documents.

Concernant la **littérature grise**, un grand nombre de documents déjà collectés au préalable ont été versés dans la base de données. Des recherches sur Internet ainsi que des demandes ciblées à des experts du domaine ont ensuite été faites ce qui a permis de compléter la base de données. Les références bibliographiques des documents ont été également exploitées.

Au final, **50 documents de littérature grise** principalement en langue française mais également internationaux ont été collectés, comme visible en ANNEXE I.

Pour le volet scientifique de la revue bibliographique, huit entretiens exploratoires ont été menés avec des chercheurs, chacun expert d'une phase du processus productif :

- Yannick Frein, Laboratoire G-SCOP, Logistique, optimisation ;
- Lilia Gzara, Laboratoire G-SCOP, systèmes d'information, PLM (Product Lifecycle Management) ;
- Michel Tollenaere, Laboratoire G-SCOP, système d'information, conception de produit ;
- Frédéric Noël, Laboratoire G-SCOP, réalité virtuelle, réalité augmentée ;
- Serge Tichkiewitch, Laboratoire G-SCOP, conception intégrée ;
- Gulgun Alpan, Laboratoire G-SCOP, logistique, optimisation ;
- André Thomas, Laboratoire CRAN, logistique, optimisation ;
- Damien Trentesaux, Laboratoire Automatique, Mécanique, Informatique humaine, logistique, optimisation.

Ces entretiens ont permis de clarifier le vocabulaire, de mieux comprendre les technologies et leur finalité et d'avoir une vision historique de leur développement. Ils ont également permis de définir les mots-clés, de cibler les journaux scientifiques et de collecter quelques publications scientifiques phares sur chacun des sujets. Enfin, ces entretiens ont permis de définir les technologies investiguées car il n'est matériellement pas possible de tout traiter dans le cadre de cette étude. La revue bibliographique s'est donc focalisée sur les technologies numériques suivantes :

CAO/FAO

- CAD – CAM (computer-aided design / computer-aided manufacturing)
- Numerical models 2D
- Digital models 3D
- Behaviour simulation model
- Design chain CAD/CAM
- Collaborative design
- Prototyping

FABRICATION ADDITIVE (cas particulier de FAO)

- Design for Additive Manufacturing
- Additive manufacturing processes
- Additive manufacturing applications (mass customization, rapid prototyping, benefits assessments)
- Digital design chain for additive manufacturing
- Advanced manufacturing technologies

RÉALITÉ VIRTUELLE – RÉALITÉ AUGMENTÉE

- Augmented reality for user-simulation
- Virtual reality
- Human Computer Interaction (HCI)
- CAVE-like (Cave Automatic Virtual Environment)/Motion capture systems
- VR (Virtual reality) headsets
- Networked Virtual Environments
- Haptic Devices
- Sensor Devices
- Mobile and wired HDM (Head Mounted Displays)

SYSTÈME D'INFORMATION

- Enterprise information system (PLM, ERP, CRM, SCM, BI & Analytics)
- Enterprise architecture
- Enterprise integration
- Interoperability
- Enterprise networking
- Product data management
- Knowledge management

SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES

- Cyber-physical systems, Intelligent manufacturing
- Internet of things (IoT)
- Intelligent product, smart product, RFID
- Platform web-based
- Product embedded information device, industrial IoT, product-driven control, big data
- System of systems
- Industrial internet, physical internet

ROBOTIQUE – COBOTIQUE

- Robotics
- Cobotics
- Human system interactions
- Exoskeleton
- Artificial intelligence

Les journaux scientifiques suivants ont été consultés :

- Computers in Industry ;
- CIRP - Manufacturing technology ;
- Computer-Aided Design ;
- Robotics and Computer Integrated Manufacturing ;
- Computers and Chemical Engineering.

Parmi les publications scientifiques, les publications de type « Key notes » ont été particulièrement ciblées car elles proposent un état de l'art sur une ou des technologies données avec le plus souvent une perspective historique et prospective tout à fait intéressante. Au final, **48 publications scientifiques** ont été collectées.

La revue bibliographique comporte donc au total **98 documents s'étalant sur une période allant de 1971 à 2016**. Cette revue bibliographique non exhaustive apporte des éléments permettant une première appréhension et identification des évolutions numériques déjà vécues par les principales filières industrielles françaises.

2.2. Enseignements de la revue technologique

La revue technologique a principalement porté sur l'industrie manufacturière de biens et de services.

2.2.1. Origines du numérique

Le numérique renvoie à différentes acceptions et véhicule des visions assez différentes lorsqu'on l'utilise. Il est souvent associé à d'autres termes tels que « société du numérique » ou « technologies de l'information et de la communication ». Il fait référence le plus souvent aux réseaux Internet et à leur large diffusion dans toutes les activités humaines. Il aurait cette fonction « capacitante » de développement de nouveaux usages et de transformation des sociétés humaines.

Cela étant, le numérique est d'abord et avant tout une manière de traiter l'information : « le cœur du numérique consiste à rendre matériel et exploitable techniquement tout type de problème logique et par là, toute question opérationnelle dans tous les domaines sans exception et toute question de connaissance » [14].

Selon cette acception, le numérique n'émerge donc pas avec Internet et le web 2.0. Les principes de l'algèbre binaire des opérateurs booléens sont inventés en 1847 par George Boole et repris par les théoriciens de la communication (Shannon et Bush) en 1937. Les grandes sociétés informatiques IBM et Bull sont créées en 1924 suite à l'invention de la machine dite Hollerith, du nom de son inventeur, en 1886, qui a permis la mise en œuvre des statistiques nationales dans les Etats modernes. L'équipe d'Alan Turing qui, comme chacun le sait, a « cassé » les codes de communications allemands et japonais lors de la seconde guerre mondiale ont, pour ce faire, mis au point une machine – Colossus – qui est considérée comme le précurseur des grands ordinateurs. Alan Turing et John Von Neumann sont considérés comme les pères fondateurs de l'informatique et ce, au milieu du 20ème siècle.

On constate donc assez rapidement que le numérique n'émerge pas spontanément il y a 20 ou 25 ans mais est le résultat d'un développement conjoint et continu d'éléments tels qu'un mode de pensée spécifique, la logique, de disciplines scientifiques telles que les mathématiques et l'informatique, de technologies pour le traitement de l'information et ensuite la communication de ces informations (software) et des équipements (hardware, infrastructure télécoms, etc.) qui les supportent [14].

La recherche bibliographique (publications scientifiques et littérature grise) montre les évolutions sémantiques liées au développement continu de ces technologies et surtout à leur intrication constante donnant lieu à des combinaisons technologiques différentes selon la maturité de ces dernières.

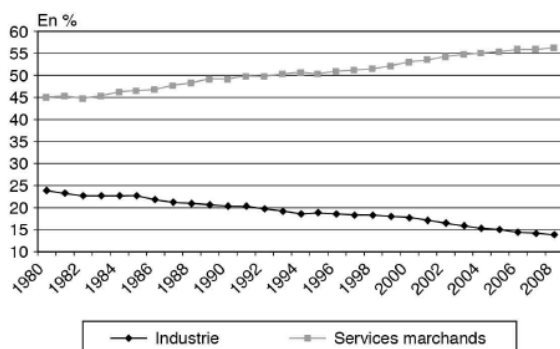
2.2.2. Avènement de l'industrie du futur

Cette revue bibliographique technologique vise à retracer, sur une période d'environ 20 ans, les évolutions des modes industriels au regard de l'arrivée du numérique.

Cette question, qui n'est pas sans poser par ailleurs des problèmes conceptuels comme nous le verrons ensuite, s'inscrit dans un contexte socio-politique spécifique marqué par un regain d'intérêt des pouvoirs publics pour l'industrie et la promotion des technologies du numérique dans les opérations industrielles. Cet intérêt est pour le moins récent en France. En effet, l'industrie en tant que secteur d'activité économique n'était plus, depuis les années 90, dans les radars des politiques publiques. La mondialisation et son cortège de délocalisation a ancré l'idée selon laquelle l'avenir des pays dits industrialisés se trouvait plutôt dans les activités de service que dans la production de biens manufacturiers [1]. Entre 1990 et 2007, la France crée 3 millions d'emplois principalement dans les services et perd plus d'un million d'emploi dans l'industrie. On observe dans la plupart des pays des tendances similaires. Entre 1980 et 2007, en France, la contribution de l'industrie au PIB chute de près de 40% : de 24% elle tombe à 14% [2]. En 2008, la crise financière touche de plein fouet les entreprises et en particulier l'industrie. Les fermetures d'usine s'accroissent et font régulièrement les gros titres des médias.

Le déclin de l'industrie

A - Part dans la valeur ajoutée



Source : comptes nationaux, Insee.

B - Évolution de l'emploi

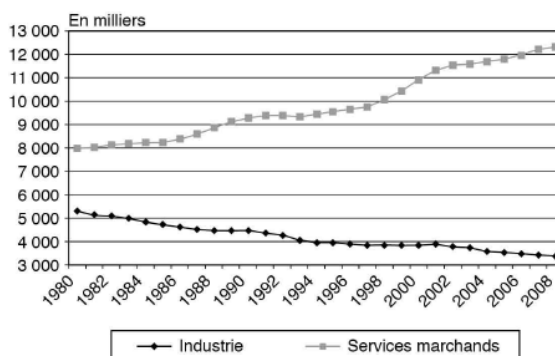


Figure 2 : L. Demmou « Le recul de l'emploi industriel entre 1980 et 2007 », *Economie et Statistiques* n°438-440, 2010

Par ailleurs, l'industrie a longtemps véhiculé une image négative auprès du grand public, accusée d'être responsable de nombreuses pollutions environnementales (pollution des sols, des cours d'eau, des mers, de l'air, ...) ou de catastrophes environnementales ponctuelles mais tout aussi désastreuses (explosion d'usines chimiques ou nucléaires). Du côté de l'emploi, les métiers industriels souffrent d'un vrai déficit d'image : pénibles, dangereux, mal rémunérés, ils sont largement délaissés au profit des activités de services (banques, assurances, finances, consulting, etc.). Les pays dits industrialisés rêvent alors d'un avenir sans industrie laissant aux pays dits émergents ou low cost, selon l'angle de vue, le soin de fournir au monde entier les biens et services manufacturiers que le consommateur réclame.

L'industrie est pourtant une activité particulièrement productive car bien que l'emploi industriel ait fortement décliné, le volume de production n'a cessé de croître ce qui permet de dégager de substantiels gains de productivité sur la période [2]. Elle est également le premier secteur d'activité en termes de Recherche et Développement. En 2007, la part de la R&D effectuée par l'industrie manufacturière était de 90,9% en Allemagne, 88,9% au Japon, 86,3% en France et 63,3% aux USA [2]. D'autres études montrent qu'un emploi industriel génère deux emplois dans les services [3]. De surcroît, la balance commerciale des pays dit industrialisés s'effondre sous l'effet d'importations massives de produits fabriqués dans les pays à bas coûts. On constate ainsi que l'activité industrielle est en fait un élément structurant des économies modernes et contribue largement à sa croissance et à sa prospérité.

Des initiatives émergent en Europe dès le début des années 2000 qui visent à relancer le secteur industriel. C'est la plateforme technologique européenne Manufacture par exemple qui publie en 2004 un agenda de recherche stratégique¹¹ (SRA) consacré au Manufacturing. La plateforme, créée par la Commission Européenne au début des années 2000 est constituée d'académiques et d'industriels européens, diffuse régulièrement des études et des travaux prospectifs sur l'industrie du futur.

En réponse à la crise financière de 2008 qui touche particulièrement l'industrie, la Commission Européenne lance un ambitieux plan de soutien au développement de l'industrie en créant un partenariat public-privé (PPP) et une association pour le gérer : European Factories of the Future Research Association¹² (EFFRA). Cette association pilote aujourd'hui les programmes de recherche européens sur le Manufacturing, en particulier le programme Factory of the Future (FoF). Parallèlement, un autre groupe européen piloté par le CEA travaille sur les Key Enabling Technologies et leur industrialisation qui aboutira à un rapport marquant en 2011 [4]. Les technologies du numérique sont largement promues au sein de toutes ces initiatives mais elles sont plutôt centrées « technologies de production », en particulier la fabrication additive ou l'usinage à grande vitesse. La France lance ses Etats Généraux de l'Industrie en 2010 [5], finance une étude prospective sur l'Industrie en 2030 [6] et les thématiques de recherche à lancer pour y répondre, programme un plan de développement ambitieux de l'industrie en 2013 [7] qui deviendra le plan « Industrie du Futur » en Mai 2015. Aujourd'hui, ce plan est décliné en région et finance de nombreux programmes d'accompagnement à la modernisation technologique des PME/PMI françaises.

¹¹ <http://www.manufacture.org/strategic-research-agenda/>

¹² <http://www.effra.eu/>

C'est en fait dans l'ensemble des pays dits industrialisés que la question industrielle refait surface. L'Allemagne, l'Italie, la Suède, le Japon, les USA, le Royaume Uni mais également l'Europe, publient entre 2008 et 2012 de nombreux rapports, études, livres blancs sur l'industrie du futur et déploient des programmes de soutien au secteur industriel très ambitieux [8]. En 2011, l'Allemagne présente à la foire de Hanovre qui est le plus grand salon consacré au monde industriel, le concept « Industrie 4.0 » qui donnera lieu en 2013 à un rapport faisant date [9]. Les technologies et en particulier les technologies du numérique sont au cœur de cette industrie du futur. L'industrie du futur, comme nous le verrons plus avant, place les technologies du numérique au centre du système de production entendu au sens large, couvrant l'ensemble des phases du cycle de vie d'un produit : conception, production, distribution, usage, et fin de vie. Chacune de ces opérations peut être rendue plus compétitive en ajoutant différentes technologies numériques associées à un réseau Internet.

En avril 2016, la Commission Européenne (CE) lance une initiative intitulée « Digitising European Industry¹³ » complémentaire à sa stratégie « Digital single market » qui vise à établir au sein de l'Union européenne des infrastructures informatiques solides et standardisées. Cette initiative fait l'objet d'une communication de la part de la CE [10] qui donne un cadre aux différentes actions et programmes de soutien. On observe ainsi une convergence des politiques publiques européennes de soutien à l'innovation entre le numérique et l'industrie notamment autour des problématiques de cyber-sécurité des réseaux et d'interopérabilité des systèmes.

Ce détour historique tracé à grands traits est essentiel pour comprendre les débats actuels autour de l'industrie. Ces débats donnent lieu à un grand nombre de rapports « grand public » après une relative déshérence sur le sujet.

2.2.3. Numérique et industrie : évolution ou révolution ?

La littérature grise

Depuis 2008, plusieurs dizaines de rapports ont été publiés sur l'industrie [6] principalement au niveau européen mais également aux Etats-Unis et bien sûr en Allemagne. La France s'est intéressée à la question industrielle plus tardivement [5] en lien avec la crise financière de 2008 et ses conséquences sur l'industrie déjà très fragilisée par ailleurs. Cela étant, malgré le nombre, la diversité des auteurs et du contenu, on peut regrouper les rapports en trois grandes catégories :

- **Des rapports et études généralistes** qui décrivent l'Industrie du futur au travers de technologies emblématiques (Internet of thing, systèmes cyberphysiques, big data, fabrication additive, ...) puis explorent les freins et leviers (économiques, sociaux, technologiques) pour terminer par une série de recommandations adressées soit aux industriels soit aux pouvoirs publics quant à l'urgence des mesures à prendre ;
- **Des rapports centrés sur des technologies** : ces études focalisent sur une ou plusieurs technologies et s'attachent à en montrer le potentiel au travers de cas d'usages réalisés dans des entreprises. Les descriptions s'accompagnent souvent de recommandations quant au potentiel de croissance générés par ces technologies et donc de la nécessité de les intégrer au plus vite.
- **Des rapports centrés sur le volet économique** : ces études focalisent sur les gains de productivité générés par l'industrie du futur. Chiffres à l'appui, les auteurs démontrent que ces technologies permettent de répondre aux exigences de la mondialisation et du consommateur. Ce dernier voudrait des produits personnalisables fabriqués et distribués le plus rapidement possible. Ils pourraient être même co-innovateur et entrer ainsi dans les processus industriels. L'adoption des technologies numériques permettraient à l'entreprise de répondre à ces exigences et de faire croître son chiffre d'affaires de manière conséquente.

Ces études présentent **l'Industrie du futur comme une rupture, une quatrième révolution industrielle**. Le numérique est d'ailleurs envisagée sous sa forme récente de mise en réseau, via Internet, d'équipements collectant des données dans le but de les exploiter et d'améliorer la performance industrielle. Elles n'adoptent donc pas un point de vue historique en mettant en perspective les évolutions des technologies. Au contraire, **elles font table rase du passé et insistent sur le caractère « disruptif »** de ces systèmes : la fameuse quatrième révolution industrielle.

La relation à l'environnement n'est pas abordée si ce n'est sous l'angle de la performance énergétique. Cette dernière n'est pas considérée comme un bénéfice direct de l'usage des technologies du

¹³ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/commission-sets-out-path-digitise-european-industry>

numérique mais comme une conséquence de l'usage d'équipements électroniques (capteurs principalement) permettant de mieux piloter les machines et donc de réguler leur consommation énergétique. Aucun chiffre n'est cependant avancé sur ce potentiel d'économie dans ce type de rapport.

Les études et rapports sur le numérique dans l'industrie privilégient donc **un point de vue plutôt radical axé sur la convergence de systèmes et de technologies auparavant disjointes** en tous cas dans l'industrie. Ils visent d'abord et avant tout la promotion de ces technologies qui ne sont jamais interrogées sur leur impact environnemental. Il est vrai que les méthodes et organisations industrielles et les technologies associées depuis un siècle ont permis à l'industrie d'être un secteur particulièrement performant et de générer des gains de productivité très importants. L'engouement pour les technologies du numérique appliquées à l'industrie participe de cette dynamique et suscite d'immenses espoirs pour qui voudrait voir l'industrie redevenir un secteur d'activité puissant et créateur de richesse en Europe et aux Etats-Unis.

Les publications scientifiques

Les publications scientifiques sont par nature bien différentes des rapports et études précédentes. Elles visent à présenter les résultats d'un travail scientifique souvent long et rigoureux et donc moins sensibles aux effets de mode.

Les publications collectées sont de deux types :

- Des **publications de type « Key notes »** qui visent, souvent en introduction d'un numéro spécial d'un journal, à faire un état de l'art sur une question scientifique ou un ensemble de technologies au sens large. Ces publications développent des perspectives historiques très intéressantes.
- Des **publications orientées sur une ou plusieurs technologies ou famille de technologies** qui visent à présenter des avancées techniques liées à leur amélioration ou leur intégration dans des systèmes plus vastes. Ces publications sont par définition très spécialisées et d'un haut niveau scientifique.

Comme nous l'avons indiqué dès l'introduction, les chercheurs n'entendent pas « technologies numériques » ou « industrie du futur » de la même manière que le grand public [11, 12, 13]. Les différents entretiens et les lectures des publications scientifiques montrent plutôt que les principes de l'industrie du futur existent depuis longtemps en tant qu'évolution continue de différentes technologies mais que **sa mise en œuvre est rendue possible aujourd'hui par la maturité et la convergence de plusieurs technologies** et ce, dans trois domaines : **l'informatique, les télécommunications et les technologies de production** [11, 14]. Les modes industriels, depuis leur origine, sont marqués par les évolutions technologiques qu'il s'agisse d'innovations de rupture ou de développement continu et régulier d'innovations incrémentales. De fait, les termes scientifiques désignant les technologies évoluent régulièrement au fil des recherches et développements.

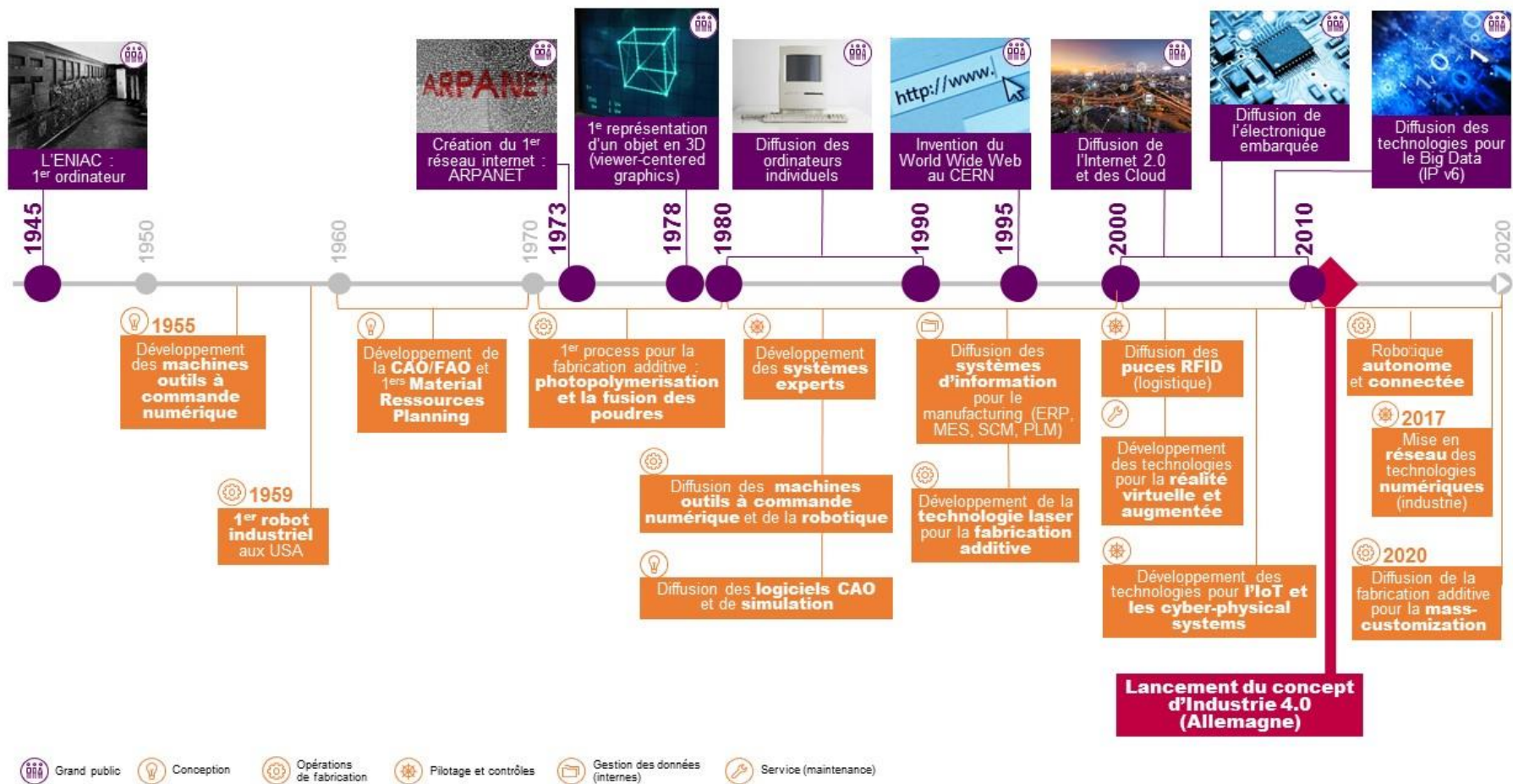


Figure 3 : Représentation des innovations incrémentales dans l'industrie

- Le 1er robot industriel a été inventé aux USA en 1959 et s'appelait Unimate. Il a été installé chez General Motors en 1961 (secteur de l'automobile). Il arrive en Europe en 1967 dans une usine suédoise Metallverken.
- Les systèmes experts cités ici ont été développés dans les années 80 et abandonnés ensuite à cause de leur complexité. Il s'agissait de logiciels dédiés à des métiers industriels qui requéraient une très grande expertise. Le logiciel tentait de reproduire l'expertise et la connaissance de chaque métier. L'absence d'interopérabilité posait néanmoins de nombreux problèmes pour coordonner les opérations industrielles notamment le passage de la conception à la fabrication des produits.

Quelques enseignements issus des entretiens

L'intégration du numérique dans les industries peut être vue selon deux aspects. La première correspond à une approche continue, d'évolution logique du processus d'optimisation de la chaîne de production. D'autres industries prennent le problème en main avec une vision davantage disruptive.

Le numérique vu comme continuité logique

Les entretiens réalisés ont tout d'abord permis de voir quelle était la perception globale de la notion d'Industrie du futur. Pour la majorité des industriels, elle est vue comme une ambition presque purement technologique à des fins :

- D'amélioration des procédés de production ;
- D'augmentation de la sécurité ;
- De gain de temps.

Ce premier aspect rejoint l'idée selon laquelle, pour la majorité des acteurs, le périmètre et la définition du numérique n'a pas changé, c'est le niveau de sa mise en œuvre qui fait qu'on peut parler de nouvelle « révolution ». Ainsi, la mise en place d'un ERP (Entreprise Resource Planning) dans l'industrie chimique ne modifie pas complètement la chaîne de valeur de l'industriel, mais permet d'atteindre un niveau de précision de sa gestion qui n'était pas atteignable auparavant.

Selon tous les acteurs industriels interrogés, l'automatisation des industries il y a une trentaine d'années a été la première étape de la numérisation. D'aucuns préfèrent parler de digitalisation pour le processus engagé depuis une dizaine d'années, à savoir d'intégration de la donnée à toutes les étapes du processus de production. Pour la plupart des acteurs, il s'agissait d'une évolution « naturelle » de la maîtrise de la production face à une concurrence croissante.

L'historicisation des données cette dernière décennie permet de mettre en perspective le processus de numérisation avec déjà un certain recul. Certaines industries sont reconnues comme pionnières dans le domaine par les autres acteurs, c'est par exemple le cas du secteur automobile ou aéronautique. Ces industries semblent avoir une longueur d'avance, d'une part en raison du dynamisme économique de ces secteurs, qui facilite les investissements dans le numérique ; d'autre part grâce à des horizons de temps légèrement plus courts que les industries lourdes de première transformation (comme la métallurgie)¹⁴. La chimie est un secteur intermédiaire, où de grands groupes comme Solvay ont initié des projets ambitieux de numérisation de leur outil industriel (cas du jumeau numérique du site de Chalampé en Alsace par exemple).

Le numérique vu comme une rupture

Certains entretiens ont rappelé que le numérique lié à l'industrie du futur a une mise en œuvre très individualisée. La mise en place ne se fait pas clef en main, les solutions sont très particulières à chaque acteur (y compris au sein d'un même secteur), et de nombreux retours d'expériences sont nécessaires pour arriver à définir le besoin exact de chaque commanditaire. De la même manière, la prise en main du numérique répond à des questionnements qui peuvent être différents, et certains acteurs se posent en fers de lance en essayant de profiter de l'innovation apportée pour modifier leur approche du business. Néanmoins ces acteurs sont en minorité, et appartiennent à des grands groupes permettant d'avoir un département qui travaille exclusivement sur cette vision.

Pour les acteurs interrogés, l'introduction du numérique dans une logique disruptive s'oriente davantage vers une stratégie de développement de nouveaux modèles d'affaires, qui repense la relation entre les équipements, les industriels et les clients. Ces industriels entendent anticiper les évolutions de la demande, et citent par exemple le besoin d'individualisation, de réponse plus rapide ou plus mesurée, et de précision du contrôle des ressources, qu'elles soient humaines, en matières premières ou financières.

Néanmoins, qu'elle soit vue comme une amélioration continue du processus ou comme une rupture, cette prise en main comprend un certain nombre de freins, dont le principal est le montant financier de l'investissement initial. Ces mesures ne répondent pas nécessairement au besoin de ROI relativement rapides auxquels sont soumis certaines industries. Néanmoins, d'une manière générale, l'arrivée du numérique dans l'industrie est perçue comme un vecteur d'opportunités.

¹⁴ Les cycles d'investissement sont en effet légèrement plus courts dans les industries automobile et aéronautique (5 à 15 ans) que dans les industries de première transformation (20 ans ou plus).

2.2.4. Descriptif des technologies

Les paragraphes ci-dessous décrivent les 6 technologies sur lesquelles l'étude s'est focalisée (cf. section 1.2.2), à savoir :

- Les technologies CAO/FAO ;
- Les technologies de fabrication additives ;
- Les technologies pour la réalité virtuelle et augmentée ;
- Les systèmes d'information pour l'entreprise étendue ;
- Les systèmes cyber-physiques et l'Internet des objets ;
- La robotique et cobotique.

Les technologies CAO/FAO

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou Computer-Aided Design (CAD) permettent de créer, manipuler et communiquer une description géométrique d'une pièce ou d'un objet mathématiquement [16]. Les logiciels CAO vont de pair avec les logiciels de Fabrication Assisté par Ordinateur (FAO) ou Computer Aided Manufacturing (CAM). **Les premiers prototypes de logiciels CAO émergent à la fin des années 1950, notamment à General Motors.** Les ingénieurs de la grande firme automobile n'imaginent pas encore la large diffusion de l'outil et son potentiel d'utilisation [16]. Les spécifications de l'outil font référence à des technologies qui ne seront possibles que trente ans plus tard. **A la fin des années 1960, un bureau d'étude anglais, Sud Aviation, réalise les ailes du Concorde à l'aide d'un logiciel CAO** (voir figure suivante), [15]. C'est la première grande réalisation de pièces au moyen d'une maquette numérique.

JANUARY 1976

AIRCRAFT ENGINEERING

13

'The French Connection'

With *Concorde* going into service this month, this article looks back at the manner in which Sud Aviation utilised British NC machine tools for the initial production of *Concorde* components of advanced design.

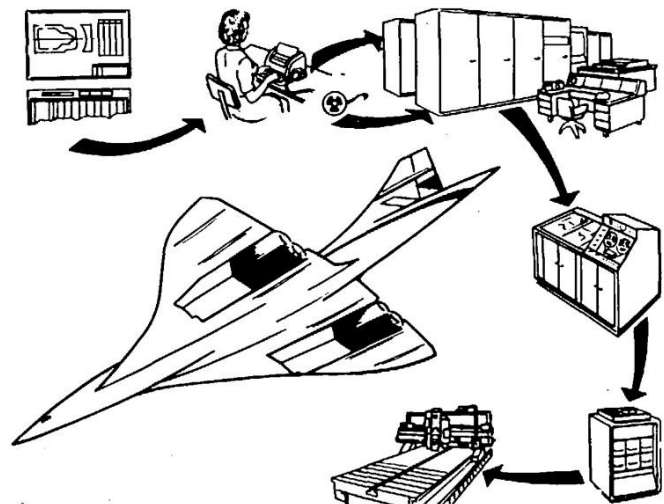


Figure 4 : The French Connection. Aircraft Engineering and Aerospace Technology

Dans la décennie suivante, ces technologies se diffuseront principalement au sein de l'automobile et de l'aéronautique. **A la fin des années 1970/80**, il y a intégration des bases de données et des applications, ce qui donnera lieu à la **création du logiciel CAO Catia** conçu par Dassault, devenu Dassault System par la suite, et qui est l'un des logiciels de CAO les plus utilisés dans l'industrie.

Les Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) sont développées dans les années 1950 et se déploient dans les années 1980 dans les entreprises. Il faut distinguer les secteurs fortement innovants (aéronautique, aérospatial, automobile) très en pointe sur ces technologies numériques dès la fin des années 70 et les autres pour qui l'intégration a été beaucoup plus longue.

Les années 1980/1990 sont également le théâtre du **déploiement de l'informatique dans les systèmes de production et des réseaux locaux** qui permettent bien avant le web de travailler à distance. Au début des années 1980, Airbus développe des réseaux intra-entreprise pour transmettre les **maquettes numériques**

entre les différentes équipes de conception éloignées géographiquement. Ces systèmes seront **largement diffusés dans la décennie 1990 en bénéficiant des développements des différents réseaux Internet** (messagerie, intranet, ...). Ces technologies ont été continuellement développées dans les années 1990 et 2000 et ont bénéficié de la large diffusion de l'informatique et des réseaux d'entreprise [16].

Le concept de management organisationnel intitulé *Computer Integrated Manufacturing* (CIM) [17, 18, 19] se développe dans les années 1980. Il s'agit de mettre en réseau les ordinateurs et leurs différents réseaux dans un super système de production totalement interconnecté. Cette approche permettrait de dépasser les limites de chacun des systèmes développés indépendamment et d'accroître les gains de productivité.

Les défis des décennies 2000 puis 2010 sont l'interfaçage avec les technologies de réalité virtuelle et augmentée [20, 21, 22] et les nouvelles technologies de production issues de la fabrication additive [23]. Il s'agit également d'intégrer ces technologies au réseau Internet. On parle alors de *Virtual Computer Integrated Manufacturing* (VCIM).

Les technologies de fabrication additive

L'ensemble des éléments historiques présentés ici sont issus de [23].

Le procédé de fabrication additive vise à produire une pièce ou un objet à partir d'un modèle numérique morceau par morceau, ligne par ligne, surface par surface ou couche par couche [23]. Les fondements de ce procédé ont déjà plus de 150 ans mais ce sont **dans les années 1960 et 1970 que les principes de la fabrication additive moderne sont élaborés et font l'objet de dépôt de brevets et de preuves de concept** (la photo polymérisation et la fusion des poudres notamment). Ces recherches s'enrichissent du développement d'autres technologies à la même période : le développement de la résine photo polymère par DuPont, de la commercialisation de la technologie laser dans les années 1960, de l'informatique et des logiciels CAO/FAO. Cela étant, la technologie ne trouve pas son marché et reste confidentielle.

Dans les années 1980/1990, de nouveaux développements sont réalisés qui donnent lieu à de nombreux **brevets et publications scientifiques : l'impression 3D en 1989 et le procédé par fusion laser au début des années 1990**. Encore une fois, les développements viennent s'encadrer dans le développement d'autres technologies numériques industrielles et bénéficient de facteurs économiques favorables tels que la baisse du coût des équipements informatiques et des logiciels CAO/FAO. Cependant, la présence de freins importants tels que les coûts unitaires de production, le choix limité des matériaux et la fiabilité des machines limitent les applications au prototypage rapide et à la réalisation de maquettes.

Les développements se poursuivent dans les années 2000 avec la commercialisation du procédé de fusion par électron et le développement de logiciels spécifiques à la fabrication additive. Le développement d'Internet permet la large diffusion de modèles et de machines en version open source accessibles au grand public. De plus, l'expiration de nombreux brevets lance la compétition sur les différents marchés potentiels : le manufacturing mais également le médical, la formation, les loisirs, l'architecture, etc. C'est dans les secteurs aéronautique, médical et dentaire que la fabrication additive s'est le plus développée [24].

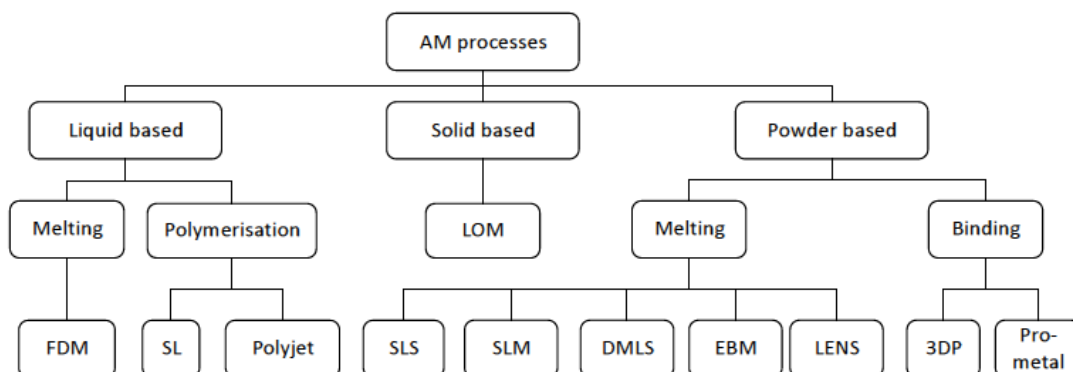


Figure 5 : Classification des technologies de fabrication additive

La fabrication additive intéresse de nombreux industriels car le procédé permettrait de **produire de toutes petites séries pour répondre aux demandes croissantes de personnalisation des produits** par les consommateurs ce que l'on appelle dans le jargon professionnel la *mass-customization* [25].

La fabrication additive ou impression 3D est la technologie la plus emblématique des nouvelles technologies de fabrication mises sur le devant de la scène par les promoteurs de l'industrie du futur, notamment parce qu'elle serait accessible à n'importe quel consommateur. Ce dernier pourrait ainsi fabriquer à la demande des pièces de remplacement pour son usage quotidien ce qui limiterait les déchets et donc serait très positif pour l'environnement. Par ailleurs, elle est associée au développement des fab lab devenus des lieux emblématiques de nouvelles formes de travail collectif, de créativité et de partage des données au travers des applications open source.

La technologie aurait donc enfin trouvé son marché et sa croissance devrait s'envoler dans les prochaines années [23].

Les technologies pour la réalité virtuelle et augmentée

La réalité virtuelle regroupe des méthodes et outils qui visent à immerger les individus dans des environnements totalement virtuels. La réalité augmentée regroupe des outils et méthodes qui visent à intégrer des informations virtuelles dans le monde réel (entretien avec un expert du domaine). Les éléments historiques présentés ci-dessous sont issus de [21] et d'entretiens menés avec des experts du domaine.



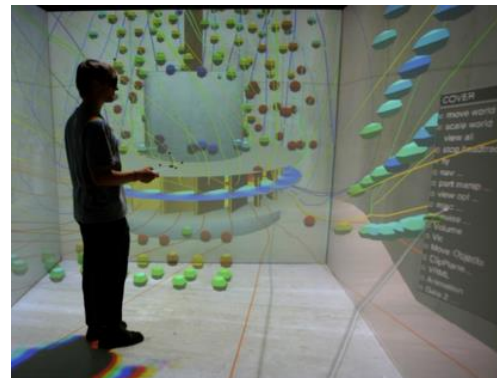
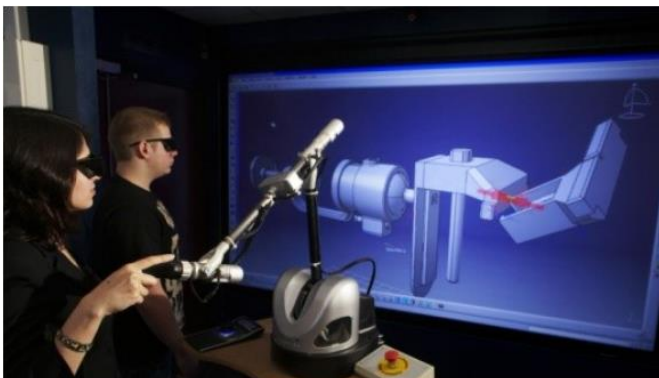
Les premiers principes de la réalité virtuelle remontent au début des années 1960 avec un équipement appelé Sensorama qui utilisait la lumière, le son, le mouvement et même les odeurs pour plonger le spectateur dans des quartiers de la ville de New York sans bouger de son fauteuil.

Plusieurs inventions dans les années 1960 et 1970 contribuent au développement des technologies de réalité virtuelle telles qu'on les connaît aujourd'hui. Cela étant, la plupart des recherches ne débouchent pas sur des applications directes principalement en raison des capacités des ordinateurs, bien trop faibles, et de leur coût important.

Le Sensorama et d'autres équipements similaires serviront néanmoins à concevoir les **simulateurs d'avion qui se développent dans les années 1970.**

Dans les années 1980, la NASA développe des équipements moins coûteux en s'appuyant sur les technologies LCD. Des start-ups développent des équipements et logiciels spécifiques pour la réalité virtuelle. L'augmentation des capacités des ordinateurs, leur miniaturisation et la diffusion des ordinateurs de bureau permettent le lancement d'applications commerciales au début des années 1990.

A la fin des années 1990, les potentiels des deux technologies pour la conception et la fabrication de produits commencent juste à être explorés [21]. 10 ans plus tard, la réalité virtuelle et la réalité augmentée se sont considérablement développées en particulier dans le secteur du cinéma et du divertissement [22]. **Dans l'industrie, ce sont les secteurs les plus en pointe comme l'automobile, l'aéronautique et le médical qui l'ont intégré dans leur processus de conception et de fabrication.** Les interfaces et équipements sont multiples et de taille de plus en plus réduits (mini cave - environnement immersif en 3D -, bras haptique, casques de réalité virtuelle, hologrammes, exosquelette, ...).



Les usages sont nombreux dans l'industrie. Dans l'atelier, l'usage de tablette en réalité augmentée pour la maintenance des machines se développe assez rapidement. L'ergonomie utilise également la réalité virtuelle pour la conception des postes de travail. En conception de produits, des environnements de réalité virtuelle et augmentée de hautes technologies sont utilisés principalement par les très grandes entreprises industrielles type automobile.

Cela étant, il existe encore des difficultés et verrous scientifiques à lever. Les technologies pour les casques de réalité virtuelle sont matures mais là c'est l'interface avec l'homme qui n'est pas optimale. Les résolutions d'écran ne sont pas non plus suffisantes et sont gênantes pour l'usage quotidien. La capacité des ordinateurs et la miniaturisation des composants électroniques en particulier embarqués permettront la réalisation d'équipements moins chers, plus compacts et de plus grande qualité.

Les systèmes d'information pour l'entreprise étendue

Les systèmes d'information peuvent être définis comme des systèmes de logiciels pour la gestion des entreprises, comprenant différents modules support à l'organisation industrielle tel que la planification, la production, les ventes, le marketing, la distribution, la comptabilité, les finances, les ressources humaines, la gestion de projets, la gestion des stocks, les services et la maintenance, le transport et la vente en ligne [27]. Ils visent l'intégration et l'extension des différents processus industriels au-delà de leurs frontières respectives, qu'ils se situent au niveau intra-entreprise ou au niveau inter-entreprise. L'entreprise industrielle, dans un contexte de mondialisation toujours plus accrue, a besoin d'avoir accès de manière intégrée à l'ensemble des informations disponibles pour piloter les différentes opérations et ce à un niveau global. Les systèmes d'information doivent donc s'adapter en permanence aux évolutions technologiques, organisationnelles et commerciales des entreprises.

Les systèmes d'information pour les entreprises émergent au début des années 1960 principalement dans les activités administratives. Il s'agit d'automatiser des tâches répétitives telles que la comptabilité, la facturation, les registres de vente, etc. Ils permettent également le stockage de ces données et remplace ainsi progressivement les supports papiers. Ce sont des systèmes fermés sur eux-mêmes. **A la fin des années 1960, des systèmes d'information spécifiques aux opérations industrielles font leur apparition en lien avec le développement des capacités des ordinateurs notamment en termes de stockage et de mise en réseau d'un ensemble de machines. Ils vont gérer notamment les nomenclatures des composants et produits et la gestion/prévision des stocks.**

Dans la décennie suivante, plusieurs systèmes d'information se développent tels que les *Materials Requirement Planning* (MRP) puis au début des années 1980 des *Manufacturing Resources Planning* (MRP-II) [11]. La maîtrise de l'information est considérée très tôt comme un élément essentiel de la stratégie de l'entreprise [11, 19]. **Dans les années 1990, émergent les *Enterprise Resource Planning* (ERP)** qui sont des systèmes d'information lourds et complexes intégrant des bases de données et des modules de gestion opérationnels supports à la gestion des ressources humaines et au management de la qualité. **Dans les années 2000, les ERP de seconde génération (ERP-II) intègrent l'ensemble de la chaîne de valeur** avec le réseau des fournisseurs puis les consommateurs avec les ERP de troisième génération ERP-III. Le concept d'entreprise étendue émerge alors dans la littérature pour décrire ces réseaux intra et inter-entreprises dans un contexte de processus industriels mondialisés. De nombreuses entreprises cessent d'intégrer de manière verticale l'ensemble des opérations pour s'inscrire dans des réseaux horizontaux et devenir des assembleurs de sous-systèmes fabriqués partout dans le monde.

La littérature distingue six grandes catégories de systèmes d'information : Enterprise Resource Planning (ERP), Supply Chain Management (SCM), Manufacturing Execution System (MES), Customer Relationship Management (CRM), Product Lifecycle Management (PLM) and Business Intelligence (BI). Les CRM et BI sont destinés aux activités administratives. L'historique de chacun de ces systèmes est détaillé dans [27].

Le développement de la capacité de ces systèmes d'information a été démultiplié par l'arrivée d'Internet dans les années 1990 et le Web 2.0 au début des années 2000. Le développement des systèmes d'information va de pair avec le développement de dispositifs embarqués intégrant du logiciel et du réseau capable de transmettre de l'information à chacun des systèmes d'information : *RFID Systems, Object and Vehicle Location Systems, Order Tracking Software, Web/Cloud Services, Internet of Things* [28]. Il a permis notamment la diffusion de systèmes permettant la traçabilité des marchandises dans la logistique avec les puces RFID. Le produit devient alors intelligent ce qui signifie que 1) il possède une identité unique, 2) il est capable de communiquer efficacement avec son environnement, 3) il stocke des informations à son sujet, 4) possède un langage pour afficher ses caractéristiques et ses spécifications, 5) il est capable de participer ou de prendre des décisions le concernant [28].

Dans d'autres publications, l'intégration des systèmes d'information avec l'ensemble de la chaîne de valeur au niveau mondial nécessite le développement d'une **sorte de méta système d'information entièrement connecté à Internet : e-Manufacturing** [29, 30]. Ce méta-système couvre l'ensemble des activités de production de biens et de services en ligne comprenant la conception de produits, le pilotage de la production et la surveillance, la gestion de la supply chain, la maintenance et le service après-vente via Internet [29]. Son développement résulte directement des transformations portées par l'Internet à savoir la digitalisation, la globalisation, le nomadisme, le travail collaboratif et la gestion de projets associés, l'immédiateté de l'accès à l'information.

La description de ce méta-système d'information appelé e-Manufacturing rappelle par bien des aspects le concept d'industrie du futur. Le concept émerge néanmoins une dizaine d'année avant celui-ci [30]. Selon [29], chaque technologie du numérique répond à un mode de production industriel spécifique en lien avec l'état du marché et les besoins des consommateurs.

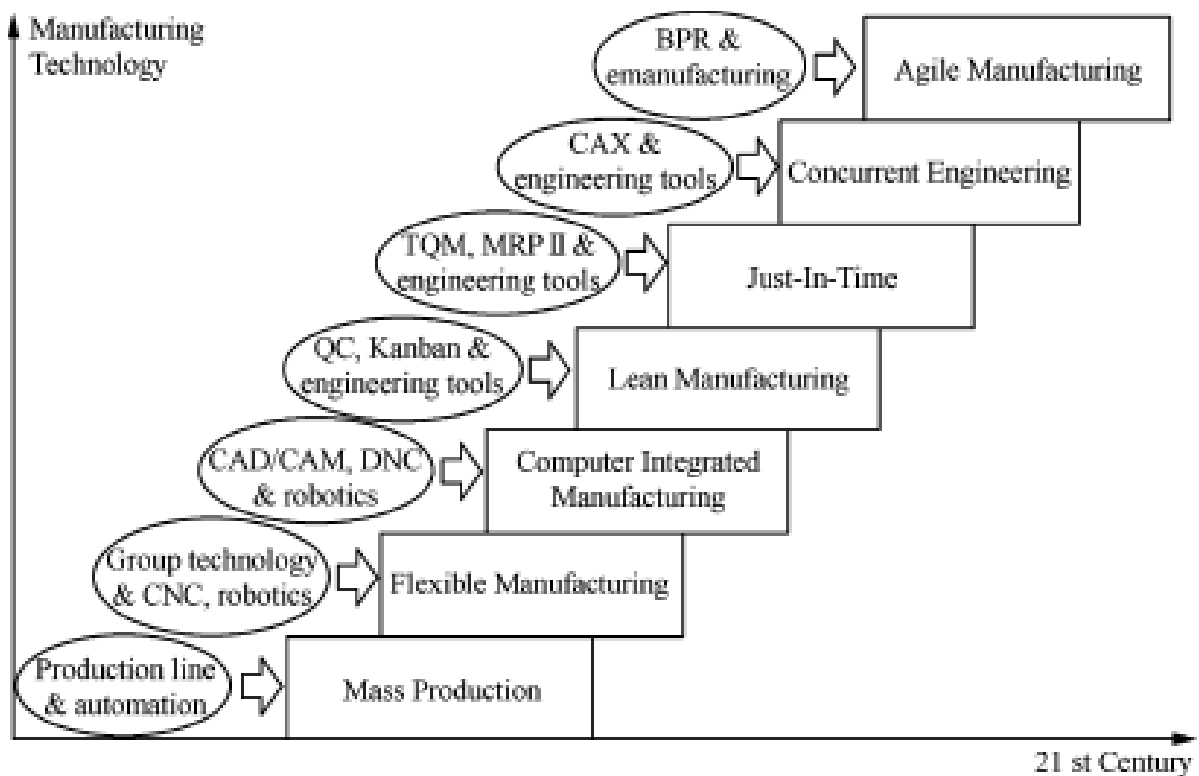


Figure 6 : Development in manufacturing technology

Les systèmes cyber-physiques et l'Internet des objets

Le terme **Cyber-Physical Systems (CPS)** est relativement récent puisqu'il émerge en 2006 aux USA lors d'un workshop organisé par la National Science Foundation (NSF) [31]. Il connaît ensuite un développement exponentiel puisqu'une analyse du nombre de publications scientifiques en lien avec le thème montre qu'entre 2000 et 2015, 4236 articles ont été publiés dont la moitié entre 2010 et 2015 (requêtes effectuées dans la base de données Science Direct avec les mots-clés « cyber-physical systems » et cyber-physical systems et manufacturing ») [32].

Les CPS sont définis comme des systèmes physiques et d'ingénierie dont les opérations sont pilotées, contrôlées, coordonnées et intégrées au moyen de systèmes informatiques communicants [32]. Ils font converger le monde physique et le monde virtuel en associant étroitement technologies numériques pour la production, l'informatique et les télécommunications.

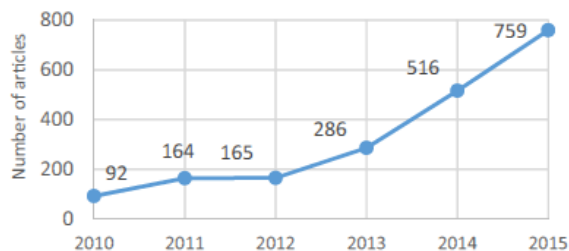


Figure 7 : Nombre d'articles publiés entre 2010 et 2015 sur le thème des CPS

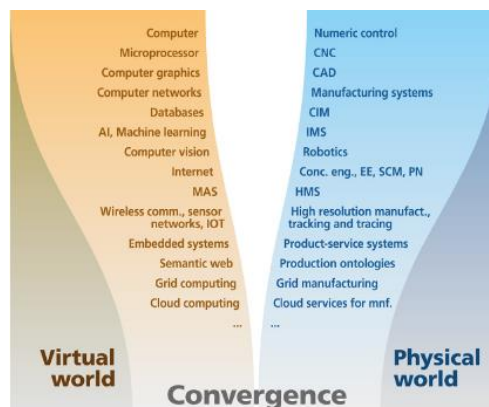


Figure 8 : Interactions entre les cyber-systèmes, les technologies du numérique et le manufacturing

Les CPS sont également étroitement liés à l'*Internet of things* (IoT) ou produits intelligents selon le vocabulaire utilisé. Il s'agit de systèmes embarqués dans des produits qui permettent de collecter et de transmettre des données partout dans le monde via des réseaux sans fil. Les données vont ensuite être traitées et transformées en information à forte valeur ajoutée pour le pilotage des processus industriels. La capacité de traitement de grands volumes d'information est en lien direct avec les développements informatiques autour du big data, du data mining et du data analytics. L'architecture de ces systèmes est d'une très grande complexité et fait l'objet de recherches approfondies (11, 12, 31, 33, 34, 35). **Ces nouveaux systèmes, voire systèmes de systèmes, représentent l'industrie du futur dans ce qu'elle a de plus radicale par rapport aux modes industriels précédents.** Les investissements technologiques sont colossaux et nécessitent des transformations organisationnelles et de *business models* très importants.

Plusieurs publications scientifiques insistent sur **le long chemin qu'il reste à parcourir avant de voir des industries réellement « du futur »** (12, 31, 32) ! Concernant plus spécifiquement les CPS, un certain nombre de verrous scientifiques ont été identifiés, leurs difficultés évaluées ainsi que les délais de résolution de ces verrous (Figure 10).

THE NEW TECHNOLOGY STACK

Smart, connected products require companies to build and support an entirely new technology infrastructure. This “technology stack” is made up of multiple layers, including new product hardware, embedded software, connectivity, a product cloud consisting of software running on remote servers, a suite of security tools, a gateway for external information sources, and integration with enterprise business systems.

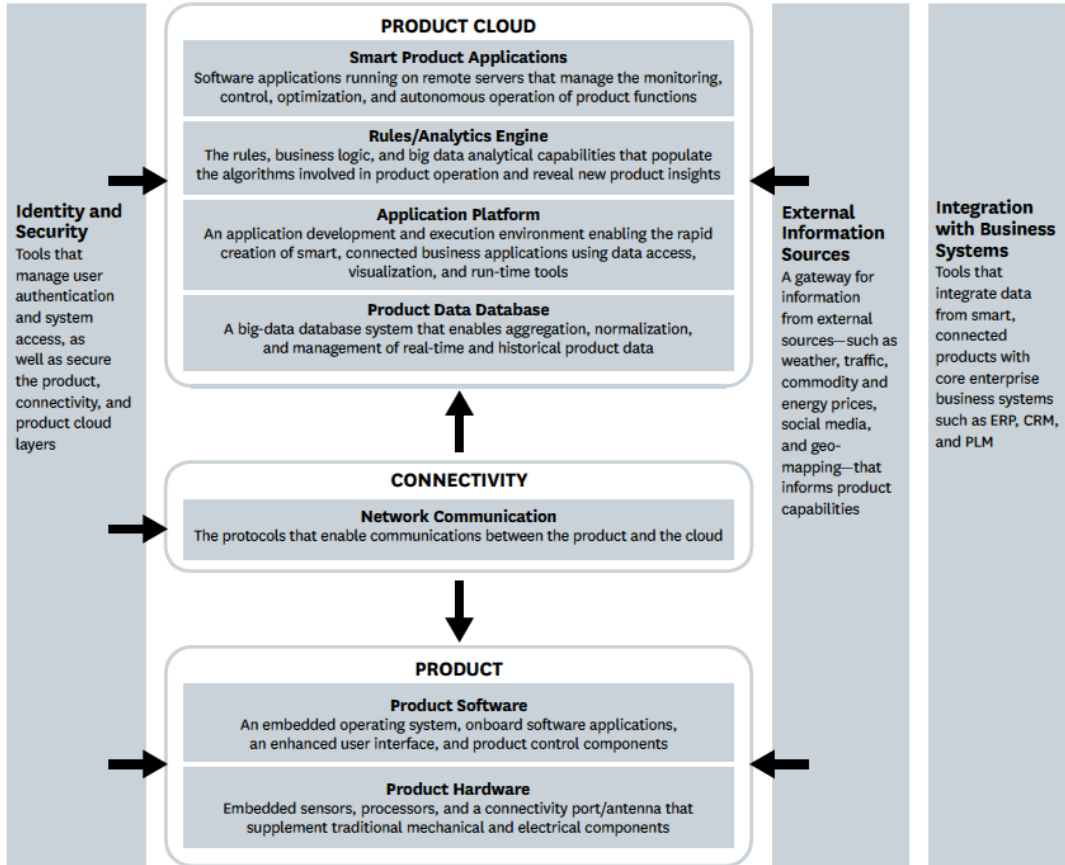


Figure 9 : Exemple d'architecture nécessaire au développement des produits intelligents

Area	Key Challenges	Difficulty	Priority	Maturity in
CPS Capabilities	Real-time control of CPS systems	High	High	4-7 years
	Real-time CPS SoS	High	Medium	3-5 years
	Optimization in CPS and their application	High	Medium	4-7 years
	On-CPS advanced analytics	Medium	High	3-5 years
	Modularization and servification of CPS	low	High	3-5 years
	Energy efficient CPS	Medium	Medium	3-5 years
CPS Management	Lifecycle management of CPS	Medium	Medium	5-8 years
	Management of (very) large scale CPS and CPS-SoS	High	High	5-8 years
	Security and trust management for heterogeneous CPS	High	High	5-8 years
CPS Engineering	Safe programming and validation of CPS SoS	High	High	5-10+ years
	Resilient risk-mitigating CPS	High	High	5-10+ years
	Methods and tools for CPS lifecycle support	High	High	3-7 years
	New operating systems and programming languages for CPS and CPS SoS	Medium	Low	3-6 years
	Simulation of CPS and of CPS-SoS	Medium	High	3-6 years
CPS Infrastructures	Interoperable CPS services	Medium	High	2-5 years
	Migration solutions to emerging CPS infrastructures	Medium	High	3-6 years
	Integration of heterogeneous/mobile hardware and software technologies in CPS	Low	Medium	2-4 years
	Provision of ubiquitous CPS services	Medium	Medium	3-5 years
	Economic impact of CPS Infrastructure	High	High	3-6 years
CPS Ecosystems	Autonomic and self-* CPS	High	Medium	7-10+ years
	Emergent behavior of CPS	High	Medium	7-10+ years
	CPS with humans in the loop	High	High	2-5 years
	Collaborative CPS	Medium	Medium	5-8 years
CPS Information Systems	Artificial intelligence in CPS	High	High	7-10+ years
	Cross-domain large-scale information integration to CPS infrastructures	Medium	Low	6-9 years
	Transformation of CPS data and information analytics to actionable knowledge	High	High	4-8 years
	Knowledge-driven decision making/management	High	Medium	6-10+ years

Figure 10 : Défis scientifiques majeurs des CPS

Les CPS, entre autres technologies associées tel que l'loT et compte-tenu des spécificités de chaque processus industriel adressé, répondent à des transformations profondes auxquelles les entreprises industrielles doivent faire face : personnalisation des produits, délais, coûts, qualité, etc. qui nécessitent des systèmes de production toujours plus réactifs et à forte valeur ajoutée capable de répondre à toutes les demandes (fournisseurs ou client final) dans des délais extrêmement courts. La maîtrise de l'information est une donnée stratégique cruciale pour l'entreprise. Elle ouvre également de nouveaux *business models* tels que les systèmes produits-services qui peuvent générer de nouvelles sources de gains pour les entreprises.

Robotique et cobotique

Sur le plan historique, c'est en 1961 que naît le premier robot, nommé Unimate 001. Il est utilisé sur les lignes d'assemblage de General Motors et, à l'aide d'un bras articulé, et de « quelques lignes de codes », permet de déplacer des pièces de plus de 150 kg. À partir de cette date et jusque dans les années 1980 se met en place la course à la robotique. Des entreprises de robotique spécialisées dans les peintures et les opérations de soudage se créent aux États-Unis : American Machine and Foundry, Tralfa, Vicarm, etc. (36,37)

La seconde génération des robots commence à être dotée de capteurs qui les rendent capables de réagir face à une situation donnée (néanmoins préalablement identifiée dans leur programme). C'est donc assez tardivement, au milieu des années 1970, avec la naissance des micro-ordinateurs, que les robots commencent à devenir intelligents, et que les chaînes de production robotisées se mettent en place (Nissan, 1972). Des langages spécifiques comme le Robot Basic (1984) font leur apparition. Les robots apprennent à adapter leur comportement à leur environnement, et les plus avancés d'entre eux s'avèrent capables de modifier leur programme. (36,37)

Le terme « cobotique » est un néologisme issu des mots « robotique » et « collaboration » né en 1999. Mais « *ce n'est pas seulement un néologisme, c'est la réalisation d'une nécessité industrielle : qu'un opérateur et qu'un robot puissent partager le même espace de travail* » (J.L Imhof, directeur France des robots Kuka). (36,37)

La cobotique désigne la robotique collaborative, ensemble des techniques permettant la conception et la réalisation de machines automatiques destinées à assister l'homme en collaborant directement avec lui, et non en le remplaçant. La spécificité de la cobotique par rapport à la simple robotique est donc de viser l'interaction entre un être humain et un système robotique. Il ne s'agit pas de substituer le « cobot » à l'opérateur mais de créer une complémentarité entre l'homme et la machine. La cobotique se justifie tout particulièrement quand une tâche requiert à la fois l'esprit d'analyse et la technique de l'homme (savoir-faire, bon sens, capacité de discernement face aux risques et aux erreurs) et l'habileté du robot (force et précision sans stress ni fatigue malgré la répétition des tâches).

Plus largement, la cobotique peut permettre d'améliorer les conditions de travail — face à la répétitivité d'une tâche sur une chaîne d'assemblage par exemple — ou encore prévenir l'exposition directe de l'homme à des environnements dangereux — dans des zones contaminées par des produits chimiques notamment. La cobotique a donc notamment pour vocation de libérer l'opérateur de ses missions les plus pénibles, les plus difficiles et les plus périlleuses afin qu'il se concentre exclusivement sur des activités à plus forte valeur ajoutée nécessitant davantage de compétences et de réflexion. À titre d'exemple, un « cobot » peut présenter à l'homme une pièce donnée sous un certain angle avant de le laisser l'ajuster.



Figure 11 : Exosquelette chez Audi – Noonee



Figure 12 : Cobot Rethink Robotics

Ce sont aussi les troubles musculo-squelettiques (TMS) que la cobotique entend empêcher. Elle est donc une technologie clé de l'usine du futur car elle peut permettre de combiner performance, flexibilité, sûreté, tout en assurant la place de l'homme au centre de son modèle. Par exemple, la société Noonee commercialise un cobot permettant de soutenir l'opérateur depuis 2014. Le produit est utilisé par les constructeurs automobiles européens sur les chaînes de production.

À la différence d'une application robotique, une application cobotique a la particularité d'être guidée manuellement, d'être limitée en force et en énergie, d'être contrôlée en termes de vitesse et de distance, d'être susceptible de s'arrêter automatiquement dans certaines circonstances prédéterminées. Elle démultiplie la force de l'opérateur humain mais reste dépendante de l'intention, du geste et du comportement de l'utilisateur.

Par ailleurs, la cobotique est aussi davantage à la portée de petites et moyennes industries que la robotique. En effet, elle rend envisageable la construction de sites de production de taille modeste et d'une grande flexibilité, potentiellement à proximité de zones d'habitation.

Finalement, on peut distinguer trois formes de systèmes cobotiques. Les premiers rassemblent un opérateur et un robot télé-opéré, commandé entièrement à distance. Les deuxièmes se caractérisent par une « co-manipulation » : homme et machine travaillent en équipe, « main dans la main », quand ce n'est pas l'homme qui manipule directement le robot. Enfin, la troisième forme de système cobotique touche aux exosquelettes, des robots que l'homme va directement « porter » afin de minimiser ses efforts.

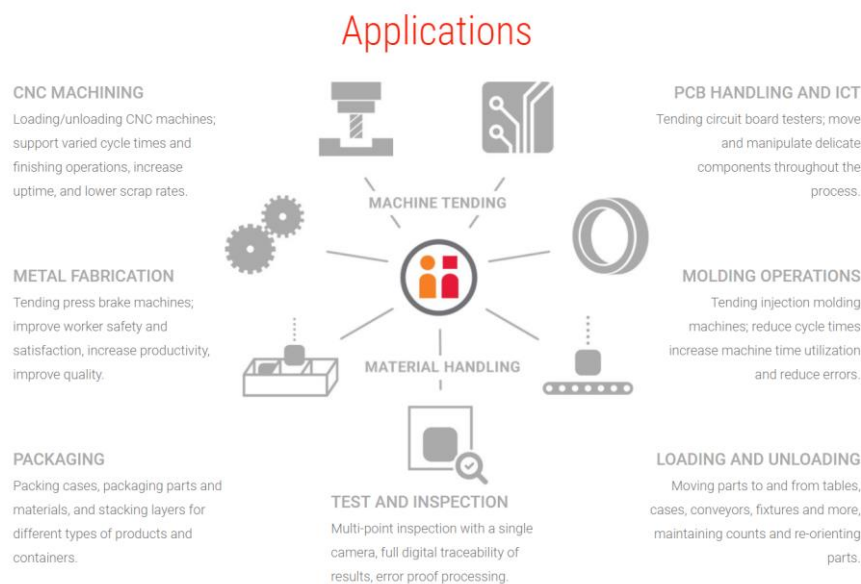


Figure 13 : exemples d'applications des cobots Rethink Robotics

2.3. Focus sur le modèle nord-américain et les stratégies des leaders du numérique

L'Allemagne a été la première à se lancer dans la course vers l'industrie du futur. Angela Merkel a officiellement donné en 2011 le coup d'envoi du programme national stratégique : « Industrie 4.0 ». En effet, les acteurs allemands avaient pris conscience que plusieurs menaces émergeaient et étaient susceptibles de bousculer le leadership national en matière d'équipements industriels haut de gamme. L'une des menaces anticipées était relative à la position des géants américains du numérique (GAFA notamment, Google Amazon Facebook et Amazon).

Bien que ces acteurs soient issus des services au consommateur final (B2C), ils sont susceptibles de s'insinuer progressivement dans le jeu industriel grâce à leur maîtrise de la relation avec le client final. Ainsi, il nous a paru opportun dans le cadre de l'étude de réaliser un focus sur les enseignements du modèle nord-américain et des stratégies des leaders du numérique afin de vérifier si les craintes des acteurs allemands étaient fondées in fine et si ces acteurs issus de nouveaux horizons étaient susceptibles d'apporter des approches originales en matière de prise en compte de facteurs liés au développement durable.

Nous avons mené cette analyse à deux niveaux.

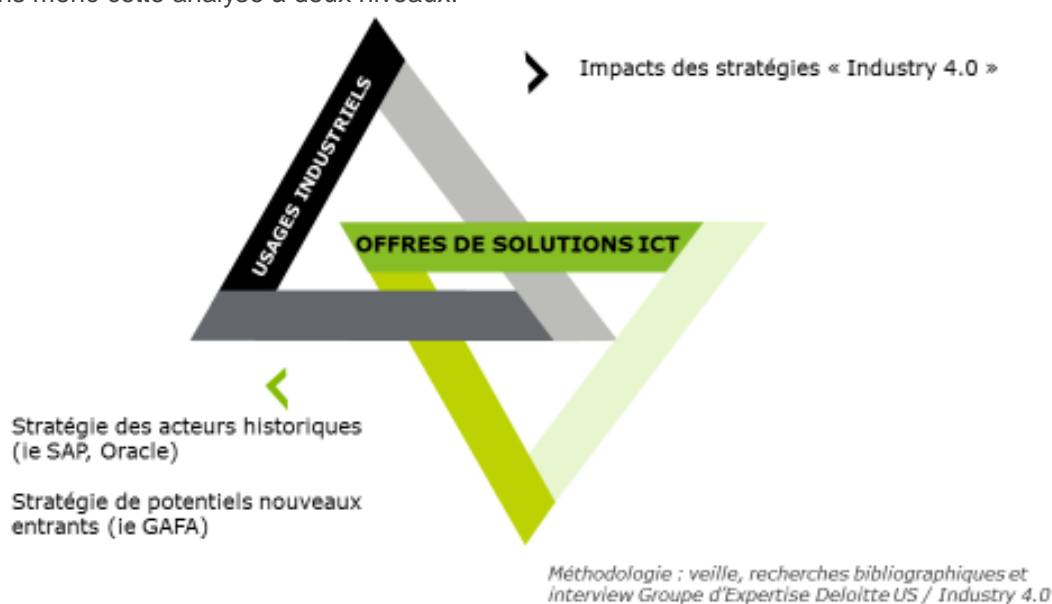


Figure 14 : Principaux enseignements issus du modèle nord-américain et des stratégies des leaders numériques : une analyse à deux niveaux

2.3.1. Stratégies « Industry du futur » : L'ère de la reconquête industrielle. Quels impacts en matière d'environnement ?

L'industrie américaine connaît depuis plusieurs années un certain renouveau industriel avec le retour d'unités industrielles sur le sol national. A titre d'exemple, Apple fait maintenant fabriquer une partie de ses ordinateurs de bureau haut de gamme sur le territoire américain, le Chinois Lenovo va fabriquer des ordinateurs et des tablettes en Caroline du Nord et le Chinois Keer, va déplacer une partie de ses machines à filer le coton en Caroline du Sud, dans une région où cette activité historique avait quasiment disparu.

Plusieurs facteurs ont contribué à restaurer la compétitivité du territoire en matière de gains de productivité industrielle. Les hausses de salaires ont été fortement contenues sur les dix dernières années, le dollar jusqu'à récemment était historiquement faible ; « Les États-Unis sont devenus l'un des pays développés où les salaires ont le moins augmenté, en fait, ils n'ont pratiquement pas bougé en dollars constants depuis 25 ans ». En parallèle les États-Unis ont connu une forte diminution des prix de l'électricité, engendrée par la production issue des gaz de schiste. En outre, les investissements en matière de robotisation permettent d'anticiper une baisse moyenne du coût du travail de l'ordre de 16 % d'ici 2025¹⁵.

Par ailleurs, le soutien de l'industrie est devenu un enjeu national, notamment sous l'administration Obama. Aux États-Unis comme dans l'ensemble des pays développés, la révolution numérique au sein des industries permet aux entreprises de monitorer de nombreux indicateurs et de mieux maîtriser leur chaîne de production.

¹⁵ The Robotics Revolution: The Next Great Leap in Manufacturing. September, 23 2015

Les industriels sont ainsi capables de gérer au mieux leur consommation énergétique : Optimisation des temps d'utilisation des appareils, maintenance prédictive et amélioration des trajets via de la logistique.

Très clairement, la prise en compte des enjeux environnementaux n'a pas été un moteur des stratégies nord-américaines de ré-industrialisation ces dernières années. C'est un effet de bord des stratégies de recherche de gains en matière de productivité.

Néanmoins si l'on se place dans une perspective globale, les experts estiment que le fait de faire revenir des unités industrielles sur le sol américain a nécessairement impacté la balance environnementale nationale. Des impacts positifs ont pu être mesurés tels que ; *le déploiement d'unités industrielles avec des contraintes réglementaires plus exigeantes (vs pays dans lesquels les unités avaient été délocalisées), abaissement des émissions liées aux transports (production locale vs importations) et une diffusion des technologies comme l'Internet des Objets et la robotisation qui permettent une optimisation de la gestion des ressources (énergie et matière).*

Cependant, la réindustrialisations a été fortement soutenue par l'abaissement des coûts énergétique du fait de l'exploitation des gaz de schistes. Ainsi, le bilan environnemental global même s'il ne peut pas être précisément mesuré à ce stade semble plutôt négatif.

De manière générale, la prise de conscience des enjeux de développement durable au sein des démarches « industrie du futur » ne semble pas encore avoir émergée aux Etats-Unis.

Stratégies « Industry 4.0 » : L'ère de la reconquête industrielle. Quels impacts en matière environnementale ?

Usine TESLA en Californie

Description :

L'usine a été racheté pour 42 millions de dollar à Toyota et Tesla en 2010 afin de subvenir au besoin de Tesla en termes de production automobile. L'usine dispose aujourd'hui de 6 000 employés et d'une production de 80 000 véhicules par an, le PDG souhaiterait d'ici 2018 atteindre une production de 500 000 véhicules.

Une modernisation de l'usine :

L'usine a subi de nombreux changements pour pouvoir satisfaire la production des Tesla et notamment de **nombreuses automatisations des chaînes de production. L'usine est désormais la plus robotisée au monde avec 160 robots spécialisés dont 10 faisant partis des plus gros au monde et un millier de petits robots.** Un objectif serait de produire des véhicules en moins d'une minute dans les prochaines années.



De l'usine au service :

Tesla utilise son propre réseau de distribution contrairement aux autres constructeurs automobiles. De plus Tesla est capable de mettre à jour à distance ses véhicules. En analysant chaque jour les données émises des voitures. Tesla est capable de proposer bien plus qu'une simple usine mais aussi tout un catalogue de services.

Figure 15 : Industrie du Futur chez Tesla

2.3.2. Stratégie des leaders du numériques vis-à-vis de l'industrie du Futur

À date, les leaders du numérique se concentrent sur des stratégies visant à réduire leur empreinte environnementale par des mesures relativement classiques ; *Améliorer la longévité des produits (lutter contre l'obsolescence), réduire la consommation d'énergie des data centers, optimiser le développement logiciel grâce notamment à de l'écoconception de code, diversification des sources d'énergie pour alimenter les systèmes de cloud et de data centers, démarche RSE, recyclage des matériaux, choix de fournisseurs écoresponsables...*

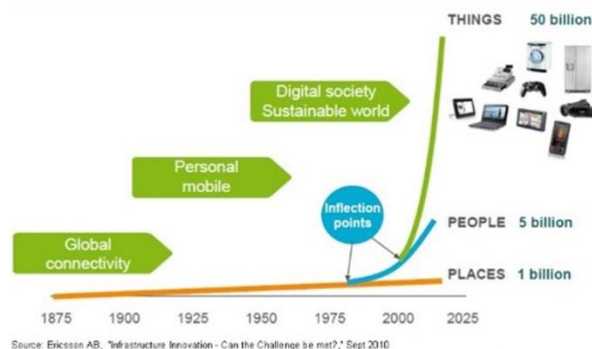
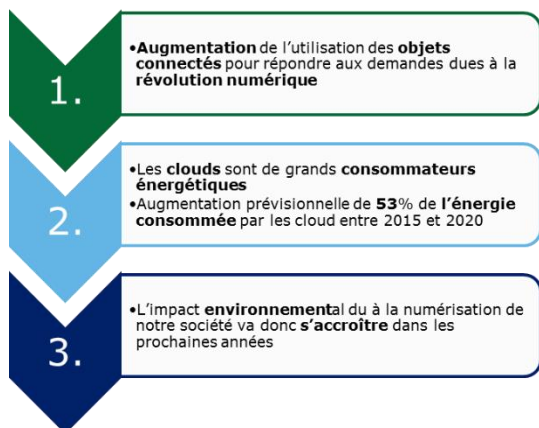


Figure 16 : Evolutions à venir

En 10 ans, les acteurs du numériques ont investis en cumulé près de 15 milliards de dollars pour promouvoir l'usage des énergies renouvelables pour l'alimentation électrique des *data centers*.

Les acteurs type GAFa ne semblent pas à ce stade avoir de volonté stratégique de pénétration des secteurs industriels. La dynamique Industrie du futur ne semble pas faire partie des priorités de leurs feuilles de route à moyen terme. « Les GAFa et autres leaders du numérique B2C bien que membres actifs du syndicat, ne sont jamais représentés au sein des groupes de travail « Usine du Futur » », *Remi Ferrand, Délégué Général de l'association Pascaline (ex. Syntec Numérique) lors d'une interview téléphonique.*

2.3.3. En synthèse

Les Etats-Unis connaissent une forte ré-industrialisation ces dernières années. Le volet environnemental n'est pas à ce stade un sujet de réflexion ni au niveau des entreprises ni au niveau fédéral. La balance énergétique est globalement impactée mais non quantifiée à ce stade.

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) bénéficient d'une image globalement « Green » qui est trompeuse mais peu sujet à la critique à l'heure actuelle.

Les effets de l'adoption de solutions TIC modifient les organisations, les chaînes de valeur et le traitement des tâches : l'impact environnemental des nouveaux processus intégrant les TIC est modifié, voire déporté, mais pas nécessairement supprimé. Souvent les impacts se situent à des endroits très éloignés du processus équipé ou à des échelles de temps nouvelles (long terme, fin de vie, ...). **Le seul consensus qui existe est que la diffusion des TIC au sein des processus modifie l'impact environnemental global par rapport aux états initiaux (i.e. avant TIC) mais cela peut être à la hausse comme à la baisse. Les GAFa n'ambitionnent pas actuellement de pénétrer le monde industriel mais prennent conscience de leur empreinte énergétique dans le cadre des solutions Cloud et lancent des initiatives pour disposer d'une image Green (initiatives internes et surtout pression sur leurs fournisseurs).**

2.4. Conclusions de la revue technologique

Ce travail est une première approche des technologies numériques pour l'industrie et des évolutions des modes de production industriels qu'elles ont pu générer. La complexité des technologies numériques pour l'industrie et leur intrication avec d'autres technologies nécessitent des travaux plus importants pour espérer avoir une représentation plus précise de ces évolutions. Cela étant, quelques conclusions peuvent déjà être faites.

La première conclusion de cette revue technologique est la **polysémie du vocabulaire « numérique »**. Il ne recouvre pas les mêmes réalités selon les types de documents : littérature grise ou publications scientifiques. On constate en mettant en perspective ces deux types de publications que **les technologies du numérique sont présentes depuis plus d'un demi-siècle dans l'industrie et ont progressé de manière régulière pour arriver aujourd'hui à ce nouveau mode de production qu'est l'industrie du futur. Plusieurs auteurs soulignent la convergence de différentes technologies issues de l'informatique, des télécommunications et des technologies de production.** Cela n'enlève en rien le caractère « disruptif » de certains aspects de l'industrie du futur (comme les systèmes cyber-physiques) mais le replacer dans une perspective historique aide à comprendre le phénomène et à le relativiser.

La seconde conclusion porte sur leur diffusion dans l'industrie. **En France, l'intégration des technologies numériques se fait surtout dans les secteurs d'activités historiquement innovants tels que**

l'automobile, l'aéronautique et l'aérospatial. Les PME/PMI françaises suivent mais avec plusieurs années de décalage en raison des investissements très importants et de leurs besoins respectifs : tous les secteurs d'activité ne sont pas au même niveau de développement industriel et n'ont pas forcément nécessité d'installer des systèmes aussi sophistiqués pour croître. Pour l'industrie du futur, les entreprises françaises de taille moyenne, tout comme leurs homologues allemandes, sont encore très en-deçà du potentiel de développement promis par les différentes études. Comme l'ont souligné plusieurs académiques, il reste encore de nombreux verrous scientifiques et techniques pour généraliser l'industrie du futur.

La troisième conclusion porte sur la question de **l'impact environnemental. Il n'est pas véritablement traité aujourd'hui ni par la littérature grise ni par les publications scientifiques** mais pour des raisons différentes. Pour la littérature grise, la question environnementale est un bénéfice indirect de l'intégration de ces technologies et ne peut être que positif au final (au sens du gain directement engendré chez l'industriel). Il n'est pas question de donner une image négative des conséquences d'une telle intégration. Les principales inquiétudes portent plutôt sur les questions de sécurité des systèmes ainsi que sur les qualifications des travailleurs. Pour les scientifiques, l'évaluation environnementale d'une technologie n'est pas simple à faire. En effet, la question de la mesure est fondamentale. Aujourd'hui, il faut une thèse pour estimer la consommation énergétique d'un équipement et envisager sa re-conception pour en réduire la consommation. Evaluer celle d'un atelier à l'aune de ses équipements cyber-physiques demande de nombreux travaux de recherche complémentaires (efficacité énergétique, matières, eau, etc.).

3. Revue bibliographique environnementale

3.1. Méthodologie de collecte et d'analyse des documents

Comme pour le volet technologique, une revue bibliographique a été conduite afin de déterminer le niveau de connaissances actuelles sur les impacts environnementaux de l'Industrie du futur. Des encadrés contenant des enseignements tirés des entretiens menés dans le cadre de cette étude viennent compléter les remarques issues de la bibliographie environnementale.

Une liste préliminaire de sources bibliographiques a été identifiée, basée :

- Sur les connaissances des membres de l'équipe projet ;
- Et sur une recherche bibliographique utilisant les mots-clés présentés ci-dessous (en français et en anglais). Les technologies considérées ont été développées selon les sous-catégories déjà précisées en 2.1.1.

Tableau 4 : Mots-clés retenus pour la recherche bibliographique

Mots-clés environnementaux		Technologie considérée
LCA	X	CAO/FAO
Life Cycle		FABRICATION ADDITIVE (type de FAO)
Environmental analysis		RÉALITÉ VIRTUELLE – RÉALITÉ AUGMENTÉE
Enviromental impacts		SYSTEME D'INFORMATION
Energy efficiency		SYSTEMES CYBER-PHYSIQUES
GhG emissions		
Carbon		

Les bases de données utilisées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Bases de données utilisées pour la recherche bibliographique

Base de données	Contenu
Science Direct	Plus de 2 000 revues en sciences de l'ingénieur, sciences de la vie et médicales, sciences humaines, de l'éditeur ELSEVIER.
Scopus	Base de données de références bibliographiques en sciences de l'ingénieur, sciences de la vie et médicales et sciences humaines ELSEVIER.
Springer Link	Plus de 1 500 revues en sciences et techniques et en sciences humaines et médicales SPRINGER et KLUWER.
Wiley	Revue en sciences et techniques et en sciences humaines et médicales WILEY en texte intégral depuis 1999.
Web of Science	Base de données de références bibliographiques et Journal of Citation reports. Archives depuis 1991.
Google Scholar	Moteur de recherche de documents à vocation académique : articles scientifiques, thèses, livres, résumés ou des rapports techniques dans plusieurs domaines de recherche.
ACM	Publications de l'Association for Computing Machinery.
IEEE	Base de données dans le domaine de l'ingénierie électrique et électronique.
Business Source Complete	Base de données de publications dans le domaine des affaires et du commerce.

Base de données	Contenu
HAL	Archive ouverte pluridisciplinaire pour la diffusion d'articles scientifiques et de thèses, issus de laboratoires ou d'établissements de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Environ 250 publications ont ainsi été identifiées, puis un travail de tri a été effectué, permettant d'évincer les publications qui ne répondaient pas à la problématique et aux objectifs de l'étude. Ce travail de sélection a d'abord été fait sur le titre des articles, puis sur le résumé ou l'abstract. Par ailleurs, lorsque des articles étaient redondants ou trop similaires à d'autres déjà identifiés, le choix a été fait de ne garder que le plus pertinent d'entre eux, selon l'exhaustivité de la méthodologie annoncée, les sources de la publication.

Enfin, le périmètre temporel de la recherche a été délimité à l'année 2008 et ultérieurement. D'après l'étude ADEME « Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : état des lieux et enjeux pour la prospective » menée par Deloitte en 2016¹⁶, le sujet des impacts environnementaux du numérique de façon générale était encore trop peu mature avant cette date.

59 documents jugés pertinents ont ainsi été identifiés et analysés, au moyen d'une grille d'analyse sous format de tableau. Ils sont listés en Annexe I.2. Dans la suite de ce chapitre, les numéros entre crochets font référence à l'ID du document identifié dans cette Annexe.

L'analyse faite dans les trois sections ci-après est à distinguer de la façon suivante :

- Dans la section 3.2 sont étudiées les publications selon un axe d'analyse temporel, afin d'évaluer l'essor du sujet de façon générale.
- Dans la section 3.3 est effectuée une analyse des publications selon les points méthodologiques mis en œuvre. Analyser les tendances et contrastes en termes de méthodologies utilisées peut permettre d'apporter de bonnes indications sur le niveau de maturité du secteur en termes d'environnement, ainsi que sur le niveau de confiance que l'on peut attribuer aux différents résultats identifiés.
- Dans la section 3.4 est abordée la question-même des impacts environnementaux de l'Industrie du futur, notamment au moyen de focus sur des technologies ou types d'études en particulier.

3.2. Les impacts environnementaux du numérique dans l'industrie, un sujet encore peu investigué

Une des premières tendances analysées a été l'évolution du nombre de publications pertinentes identifiées en fonction de l'année, montrée sur le graphique ci-dessous.

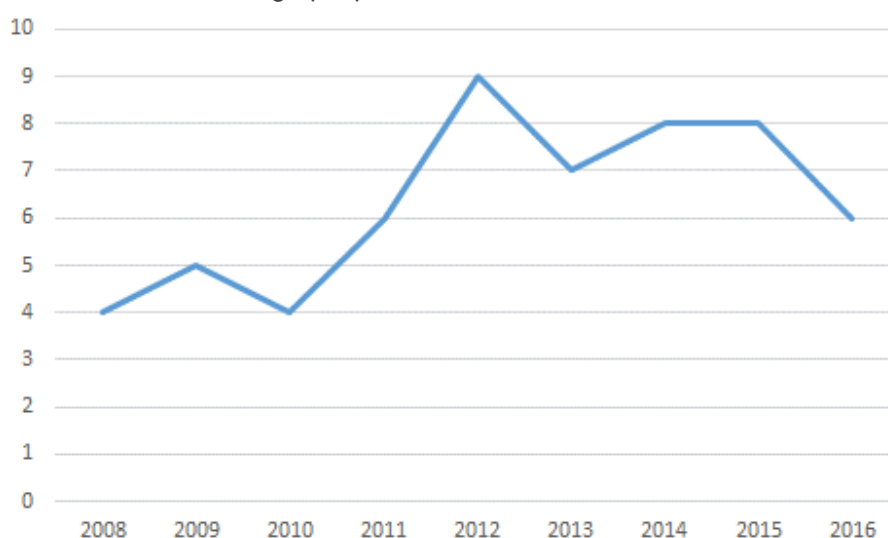


Figure 17 : Evolution du nombre de publications pertinentes identifiées au cours de l'étude, entre 2008 et 2015

¹⁶ Accessible via <http://www.ademe.fr/potentiel-contribution-numerique-a-reduction-impacts-environnementaux>

On observe une croissance relativement importante du nombre de publications pertinentes identifiées depuis 2008. Avec des variations en fonction des années, le sujet du numérique dans l'industrie apparaît dans l'absolu comme étant de plus en plus étudié. On passe ainsi de 4 publications identifiées en 2008 à 8 en moyenne depuis 2013.

Note : Le total des publications de ce graphique est égal à 58, contre 59 publications répertoriées au total. Nous avons souhaité inclure dans la liste finale la publication [1], qui, datant de 2001, ne présente pas les dernières évolutions technologiques. Néanmoins, elle présente un panorama presque exhaustif des enjeux numériques.

Il convient de rappeler que le choix des publications s'est effectué au regard de leur pertinence par rapport aux objectifs de la présente étude. Cela a exclu de fait certains articles, et ces statistiques d'évolution donnent plutôt une tendance qu'une vision exhaustive du nombre de publications.

Il est intéressant de remarquer que **l'intérêt pour le sujet environnemental reste encore relativement limité**, mais fluctue en parallèle de facteurs non scientifiques ou académiques. Le sujet de l'industrie du futur se trouve particulièrement étudié depuis 2011, date à laquelle l'Allemagne lance son plan *Industrie 4.0*, suivie la même année par les États-Unis puis par la France (en 2013), la Corée (en 2014) et la Chine (2015)¹⁷. Il s'agit donc d'un sujet relativement nouveau, et malgré la conjoncture de questionnement sur l'impact de l'industrie en général (par exemple lors des COP, lors desquelles les acteurs du privé et de l'industrie, les BINGOs (*Business and Industry Non Governmental Organisations*), ont vu leur possibilité d'action augmenter au fil des années), peu d'articles ou de rapports s'appliquent déjà à étudier plus précisément l'impact environnemental de la numérisation dans l'industrie.

3.3. Des approches méthodologiques hétérogènes et souvent incomplètes

Notre recherche bibliographique n'a pas été retrainte à une recherche d'articles utilisant seulement des méthodologies formalisées, telles que l'analyse de cycle de vie. Le choix des mots-clefs a permis de balayer un spectre plus large d'études du lien entre numérique et environnement dans l'industrie.

Comme pour l'étude que nous avons menée en 2016 sur le « Potentiel de Contribution du Numérique à la Réduction des Impacts Environnementaux », nous avons ainsi identifié trois principales méthodologies liées à l'évaluation des impacts environnementaux du numérique dans l'Industrie.

Tableau 6 : Axes d'analyse des impacts environnementaux du numérique

Méthodologie	Description
Analyse multi étapes	Prise en compte des étapes du cycle de vie du système étudié. Une approche « cycle de vie » incluant non seulement l'usage mais également les phases amont (production) et aval (fin de vie) permet d'éviter l'omission d'impacts délocalisés par exemple.
Analyse Multi critères	Prise en compte de différents critères environnementaux, pour le système étudié. Une approche multi critères inclut non seulement les consommations d'énergie et/ou les émissions de GES, mais également les impacts en termes de consommations de ressources, d'émissions dans l'eau, les sols, etc. Une telle approche permet de prendre en compte les transferts de pollution d'un indicateur à un autre.
Analyse Multi impacts	Prise en compte de l'ensemble des impacts directs, indirects et systémiques du système étudié. Une approche multi impacts considère à la fois les impacts positifs du numérique (dématérialisation par exemple), mais également les impacts négatifs tels que les impacts directs liés aux consommations d'énergie des TIC, ou encore les effets rebonds potentiellement induits par ces technologies. Il s'agit d'une approche spécifique à l'évaluation environnementale des TIC.

Les deux premières méthodologies correspondent aux principes majeurs de l'analyse de cycle de vie (ACV). Sans appliquer la méthodologie ACV au sens des normes ISO 14040 et 14044, adopter ces principes permet

¹⁷ L'industrie du futur : une compétition mondiale. Thibaut Bidet-Mayer, La Fabrique de l'Industrie, 2016

d'avoir une vision exhaustive des impacts environnementaux d'un produit ou service, et d'éviter de créer des « zones d'ombres » relatives aux impacts oubliés des TICs.

Pour notre revue bibliographique, d'un point de vue méthodologique, nous avons donc considéré :

- Les méthodologies d'évaluation appliquées pour évaluer les impacts environnementaux du numérique, ce qui permet de juger du niveau de connaissances et de maturité du secteur sur le sujet ;
- Mais aussi le périmètre géographique des études, qui permet d'identifier si le sujet est mieux identifié et/ou étudié dans certaines régions du monde.

3.3.1. Un sujet prédominant dans les pays industrialisés

Le tableau ci-dessous présente le nombre de publications selon leur périmètre géographique d'analyse.

Tableau 7 : Périmètre géographique des publications

Nombre de publications	
Nord-américaine	6
Européenne	10
Mondiale	27
Autre / NA	14

De façon générale, le sujet est logiquement plus étudié dans les zones du monde où l'activité industrielle est significative. Il convient de préciser que si la provenance des auteurs reflète d'une manière générale le périmètre d'étude des publications, certains auteurs asiatiques, parmi les publications les plus récentes, s'emparent aussi du sujet (par exemple : [37, 38, 47], etc.).

Néanmoins, l'élément essentiel qui ressort de l'analyse géographique de ces études est qu'elles s'appliquent souvent à adopter un point de vue mondial. Peu de publications proposent des cas d'études spécifiques, rattachés à un pays. Ceci est probablement lié à **l'aspect majoritairement qualitatif des publications (cf. section suivante), avec encore peu de retours d'expérience précis. Les publications se bornent donc à présenter les effets liés à la technologie elle-même, sans nécessairement se projeter sur son application possible dans un pays ou contexte donné.**

3.3.2. Des méthodologies d'évaluation diverses

Le tableau suivant recense les méthodologies d'évaluation utilisées selon les études.

Tableau 8 : Recensement des publications selon le type de méthode d'évaluation utilisé

Type de méthode	Nombre de publications
ACV attributionnelle ISO	0
ACV attributionnelle simplifiée	14
Autre approche mixte/ Nouvelle méthode	16
Empreinte Carbone	12
MFA (Material Flow Analysis)	0
Analyse Input/Output	1
Évaluation qualitative	16

D'après le tableau ci-dessus, **environ 28 % des publications se basent sur des analyses qualitatives.** Il y a à peu près le même nombre d'études qui utilisent une approche mixte, ou une méthode *ad hoc*, adaptée aux besoins de chaque publication, en s'inspirant de plusieurs méthodes ou en inventant une nouvelle.

Par ailleurs, les publications citées ont rarement comme sujet initial l'étude des impacts environnementaux.

Cette répartition relativement équilibrée des méthodologies employées est aussi illustrée à travers le fait que les approches méthodologiques ne sont pas encore exhaustives au regard des approches multi critères / multi étapes : c'est par exemple le cas du bilan carbone ou de mesures d'efficacité énergétique, qui sont des évaluations monocritères. De fait, on remarque qu'il y a peu d'applications de la méthodologie d'ACV, et qu'aucune ACV appliquant de façon satisfaisante les principes des normes ISO 14040 n'a pu être identifiée. Cependant, ceci peut également être dû à une non-publication de tels travaux par souci de confidentialité.

Néanmoins, nous pouvons avancer que le profil des méthodologies employées montre que les travaux concernant l'impact environnemental du numérique dans l'industrie sont encore peu matures. En effet, pour une analyse opérationnelle des impacts environnementaux, les méthodes quantitatives permettant la reproductibilité des études sont plus appropriées.

Les trois sections suivantes sont consacrées à l'analyse plus précise des aspects méthodologiques de ces études.

3.3.3. Une couverture incomplète du cycle de vie

Le tableau suivant recense le nombre de publications selon les frontières des systèmes considérés.

Tableau 9 : Répartition des publications selon les frontières des systèmes considérés

	Nombre de publications
Mono-étape	14
Cycle de vie partiel	16
Cycle de vie complet	10
Autre / NA	19

Rares sont les publications présentant le cycle de vie complet des produits ou services étudiés (par exemple [10, 40, 42], etc.), du fait de l'absence de données liée à la nouveauté du sujet. Certaines publications proposent une méthodologie qui entend être la plus complète possible, mais n'ont pas la rigueur suffisante pour que celle-ci soit considérée comme exhaustive ([2, 4, 5, 6, 8, 56]). Cette rigueur se mesure à l'aune des précautions prises par les études dans leur méthodologie (selon l'exhaustivité des émissions mesurées, des ressources utilisées etc.). Pourtant, une couverture incomplète du cycle de vie traduit une vision incomplète de l'ensemble des impacts engendrés par l'utilisation d'une technologie numérique.

Dans les faits, la très grande majorité des articles se focalise sur la phase d'usage des technologies. La production et la fin de vie sont pour l'essentiel négligées. Les impacts de l'Industrie du futur en matière de fabrication et de fin de vie des nouveaux équipements constituent ainsi des zones d'ombres du bilan environnemental du numérique dans l'Industrie.

3.3.4. Un réflexe d'évaluation multi-critères non généralisé

La figure suivante distingue les études selon qu'elles soient mono indicateur, bi indicateurs et multi critères.

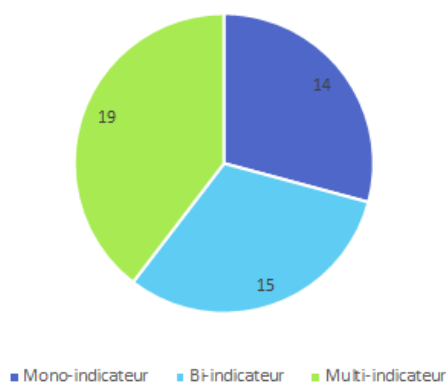


Figure 18 : Répartition du nombre de publications selon les types d'indicateurs environnementaux considérés (11 publications sont classées « Autre / NA »)

La majorité des documents analysés ne traitent qu'un ou deux indicateurs environnementaux, comme le montre la figure ci-dessus. Les indicateurs environnementaux considérés se limitent pour la très grande majorité à la consommation d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre, voire aux seules émissions de CO₂. Les études bi-indicateurs conjuguent le plus souvent les émissions de GES et les consommations d'énergie¹⁸. A l'inverse, les indicateurs d'épuisement de ressources ou de pollution des eaux (écotoxicité notamment) sont peu souvent considérés dans ces études, malgré les enjeux importants qu'ils comportent vis-à-vis des TICs¹⁶. Ce point avait par ailleurs déjà été identifié dans l'étude sur le potentiel de réduction des impacts environnementaux du numérique.

Note : Similairement aux sections précédentes, le critère mono, bi, multi indicateurs est difficilement applicable à certaines publications, ce qui explique un nombre de 11 publications incluses dans la catégorie « Autre / NA ». Ceci inclut notamment certaines publications appliquant une méthodologie qualitative.

3.3.5. Des impacts directs, indirects et systémiques encore mal identifiés

La grande majorité des publications s'intéressent principalement à l'analyse des impacts directs des technologies numériques : 42 d'entre elles (soit 71 %) considèrent les consommations d'énergie directes liées aux appareils électroniques utilisées. Ce sont la plupart du temps les impacts les plus aisément identifiables.

Certaines de ces études prennent en compte, en sus des effets directs, les effets indirects des technologies du numérique, c'est-à-dire dans la plupart des cas, les bénéfices associés à ces TICs (exemple : dématérialisation). Néanmoins, en l'absence de mesures spécialement dédiées à l'évaluation des impacts (par exemple, ce qui ressort des entretiens avec certains acteurs est l'absence de quantification des GES autres que le dioxyde de carbone), l'acuité ou la pertinence méthodologique de ces publications peuvent être remises en cause. L'évaluation des bénéfices indirects nécessiterait d'appliquer une approche exhaustive de type ACV de la technologie (par exemple pour les technologies relatives aux systèmes d'information, ou de conception assistée par ordinateur), ce que les études ne prennent pas nécessairement en compte lorsqu'il s'agit de technologies nouvelles. Cette identification des bénéfices est difficilement évaluable pour des technologies dont l'apport n'est souvent pas quantifiable.

En ce qui concerne les impacts systémiques (bénéfices à grande échelle ou effets rebonds), il est compliqué de déterminer ce qui découle de l'impact de la technologie en tant que tel ou ce qui est attribué au reste du système. Les problématiques de disponibilité des données ne permettent pas de tirer ces enjeux au clair. De fait, très peu d'études considèrent ces impacts.

De plus, certaines de ces technologies ont une logique qu'on pourrait qualifier de systémique en soi (c'est par exemple le cas des technologies citées dans les publications identifiées par les mots clefs « interoperability », « knowledge management » etc.). Ainsi, pour les mêmes raisons que pour les impacts indirects, ces bénéfices systémiques apportés par les TICs dans l'industrie sont difficilement évaluables de manière isolée.

Plus spécifiquement parmi les effets systémiques, les effets rebond ne sont pas évalués avec un recul suffisant. A part pour quelques publications « globales » ([1, 3, 8, 30, 33, 34, 35]), il n'y est pas fait référence.

Cette absence d'information sur les effets rebond, potentiellement non négligeables, représente une méconnaissance critique sur les impacts des TIC dans l'Industrie.

L'évaluation des impacts environnementaux est généralement faite projet par projet, ou procédé par procédé, ce qui rend difficile l'évaluation générale au niveau de l'entreprise. Au niveau des projets ou des procédés, les études d'impact environnemental sont globales, et incluent plusieurs axes d'amélioration, dont l'introduction de technologies numériques. Il est donc difficile, voire impossible, d'isoler les impacts liés directement à ces technologies.

Il ressort donc des entretiens une absence de prise en compte précise de ce type d'impacts, mais également des effets directs et des effets rebond, même pour les acteurs les plus avancés sur le sujet ; par exemple, le groupe Saint-Gobain a un objectif de réduction des émissions de CO₂ à l'horizon 2025, mais cet objectif n'est pas redescendu au niveau des différents projets de transformation numérique menés par le groupe (en ce sens il n'est pas possible d'isoler la part du numérique dans la réduction ou l'augmentation des émissions de CO₂).

Encadré 2 : Enseignements complémentaires des entretiens réalisés

¹⁸ Dans la mesure où il existe un niveau de corrélation important entre ces deux indicateurs, la vision qu'offre cette combinaison est incomplète.

3.4. Des tendances difficiles à généraliser d'une étude à l'autre

Les technologies relevées dans l'étude bibliographique sont issues d'une liste de mots clefs présélectionnés. Le tableau suivant présente la répartition des publications selon les technologies investiguées. Par souci de visibilité, certaines technologies ont été regroupées (par exemple, la catégorie « systèmes d'information » recoupe l'ERP, le PLM etc.).

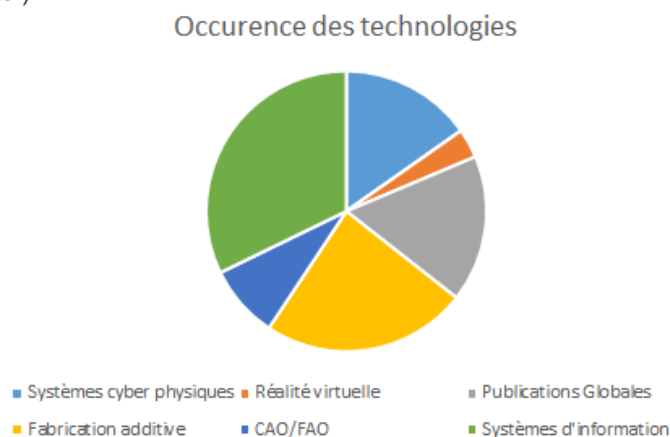


Figure 19 : Occurrence des technologies dans les articles et rapports revus

D'après la figure ci-dessus, on constate que les systèmes d'informations et la fabrication additive sont les technologies les plus couvertes, parmi la cinquantaine de publications retenues dans l'analyse bibliographique. Les publications dites « globales », ayant une vision macroscopique des enjeux environnementaux des TIC représentent également une part non négligeable des documents sélectionnés.

Au regard des entretiens réalisés, certaines technologies sont plus largement implantées dans l'industrie que d'autres. C'est par exemple le cas de l'ERP. D'autres technologies bénéficient d'un intérêt particulier des industriels, et sont poussées par les plans Nouvelle France Industrielle, comme on peut le voir pour la fabrication additive.

Ce qui ressort d'une autre manière de ces entretiens c'est que mis à part certains projets pionniers qui cherchent à révolutionner les modes de fonctionnement avec un point de vue global, les industriels sont davantage à la recherche de solutions adaptées à des besoins spécifiques. Il n'existe ainsi pas de vision unique de l'industrie du futur, mais des visions individuelles en fonction des spécificités de secteurs, humaines ou de processus industriel.

Encadré 3 : Enseignements complémentaire des entretiens réalisés

3.4.1. Focus sur la fabrication additive

L'accent est mis ici sur la technologie identifiée comme étant la mieux décrite, du point de vue de ses enjeux environnementaux, d'après la revue bibliographique.

Avant toute chose, il convient de signaler que la fabrication additive est identifiée comme l'une des 7 grandes priorités d'actions du programme gouvernemental Nouvelle France Industrielle¹⁹. Il s'agit d'une technologie plus mature que certaines autres concernées par le champ de l'étude (par exemple ce qui touche à la réalité virtuelle). Ceci s'explique notamment par le fait qu'évaluer les impacts environnementaux de la fabrication additive est plus aisé que l'évaluation de technologies virtuelles et/ou transversales à toute une organisation. Ainsi, certaines de ces études (par exemple [16, 36]) voient la fabrication additive comme étant désormais incontournable dans les processus manufacturiers, surtout face à la croissance de la demande des consommateurs de personnaliser leurs produits. L'analyse des études abordant le sujet de la fabrication additive permet de faire ressortir trois bénéfices principaux :

- L'amélioration des matériaux de fabrication et de l'efficacité des ressources : ces améliorations sont observées à la fois dans les processus de production et dans les produits en tant que tels ;

¹⁹ Nouvelle France Industrielle, Construire L'industrie française du futur, DGE, 23 mai 2016

- L'extension de la vie du produit : via les approches techniques de la réparation, la re-manufacture, la remise en état ;
- La reconfiguration des chaînes de valeur : le travail se fera sur des chaînes de valeur plus courtes et plus simples, une production plus localisée, des modèles de distribution innovants et de nouvelles techniques de collaboration ; et aussi via une relation plus proche du consommateur à son objet, davantage personnalisé.

Néanmoins, les études n'ont pas encore intégré de façon systématique une approche quantitative multi critères, multi étapes et multi impacts comme méthodologie de référence. Certaines publications mettent en garde contre les effets négatifs de la fabrication additive, qui pourraient venir en creux des bénéfices mentionnés ci-dessus, à savoir une production sans réflexion préalable sur le lieu fabrication (et les schémas logistiques associés), une demande de personnalisation trop importante, et une durée de vie inférieure, pour compenser la personnalisation, menant à un niveau de consommation supérieur des ressources (voir notamment [12, 6, 31 ; 32]). De plus, la fabrication additive est très intensive en énergie, notamment pour le fonctionnement des lasers.

Le tableau suivant compile les principaux résultats des publications les plus pertinentes identifiées sur le sujet.

Tableau 10 : Publications les plus pertinentes sur la fabrication additive

Publications	Principaux résultats
Étude de Jeremy Faludi et al (2015) [17]	<p>Analyse de cycle de vie simplifiée, comparant fabrication additive (FA) et fabrication industrielle (FI) aux États-Unis.</p> <p>Une analyse multi effets montre que si la FA permet globalement de réduire drastiquement la quantité de déchets produite (1 à 2% de pertes, contre parfois plus de 40% pour la FI), elle consomme davantage d'énergie.</p> <p>L'impact environnemental dépend beaucoup du profil d'utilisation de l'imprimante :</p> <p>Le débit de production maximal permet d'amortir la contribution de l'appareil d'un facteur 10 dans les impacts environnementaux des pièces produites. Un débit faible et des opérations lentes peuvent accroître la consommation électrique</p> <p>La géométrie des pièces produites peut faire varier le bilan : la FA devient plus intéressante pour des géométries fines ou creuses que pour des formes pleines car elle permet de limiter fortement les pertes. Par ailleurs, la qualité des pièces produites par FA est moindre que pour les pièces industrielles classiques : ceci fausse la comparaison en faveur de la FA.</p> <p>La consommation d'électricité représente l'impact le plus prononcé pour les deux méthodes. La réduction de l'impact matière permise par la FA, en termes de déchets et pertes, est nuancée par la grande variabilité de la consommation d'énergie et son poids dans le bilan de cette technologie. Cette observation invite à centraliser et optimiser la fabrication additive.</p> <p>Cette étude montre ainsi que le bilan de la fabrication additive est fortement conditionné par les modalités d'utilisation de cette technologie.</p>
Étude de R. Huang et al., (2016) [18]	<p>Étude du potentiel de réduction de la consommation d'énergie et des émissions des avions de ligne aux États-Unis via la FA.</p> <p>La FA permet de produire des pièces plus légères :</p> <p>Réduction de la consommation de carburant de 6.4%</p> <p>Consommation moindre de matières premières</p> <p>À horizon 2050, si la technologie s'implante rapidement, on aurait pour l'industrie aéronautique commerciale des États-Unis :</p> <p>L'évitement de la production de 4080 t/an d'aluminium, 7600 t/an de titanium, 8110 t/an de nickel ;</p> <p>1,2 à 2,8 Millions de GJ économisés en cumulé ;</p> <p>de l'ordre de 92,1 à 215 Mt CO₂-eq économisés en cumulé.</p>
Étude de Kianian et al. (2015) [36]	<p>Étude de la FA comparativement à la FI dans l'industrie des maquettes aux États-Unis.</p> <p>A poids unitaire final fixe, la fabrication additive utilise 20 à 40 kWh/kg, alors que le moulage par injection utilise environ 1,8 kWh/kg. Cependant, le compromis entre</p>

Publications	Principaux résultats			
	consommation de matière première et électricité consommée lors de la fabrication est traduit dans cette étude en MWh/kg de produit final, en incluant également l'énergie « grise ²⁰ » des matériaux (cf. tableau suivant).			
	Etape Technologie	Extraction des matières premières (MWh/kg)	Fabrication (MWh/kg)	Total (MWh/kg)
	Fabrication industrielle	1156	74,4	1230
	Fabrication additive	505	525	1031
	En élargissant le périmètre de l'analyse, le bilan entre fabrication industrielle « conventionnelle » et fabrication additive apparaît en faveur de cette dernière. Ceci s'explique par la réduction des pertes, et donc la réduction des impacts liés à l'extraction matières.			
	En terme de matières premières utilisées, à nombre d'unités de produit final déterminé, la fabrication additive utilise 17 500 kg de matériau primaire, alors que le moulage par injection en utilise 50 000 kg, desquels 25 000 kg sont gaspillés.			

D'après les chiffres présentés ci-dessus, la fabrication additive peut apporter des gains environnementaux pertinents, notamment en termes de consommation de matières premières. Ces bénéfices peuvent dépasser le surcout énergétique, et ce dans plusieurs configurations d'étude. Cependant, malgré ces chiffres intéressants, le bilan environnemental de cette technologie doit être considéré à l'aune de son contexte d'utilisation.

3.4.2. Autres technologies abordées

Il n'a pas été possible d'effectuer une synthèse des impacts environnementaux potentiels des autres technologies couvertes dans cette étude, comme cela a été réalisé pour la fabrication additive. Ceci est dû à un manque de publications couvrant respectivement chaque technologie et/ou un manque de robustesse dans les méthodologies utilisées pour étudier ces technologies. Généraliser à partir des travaux existants comporterait un risque d'erreur trop important sur les véritables enjeux environnementaux associés à ces technologies.

Des éléments complémentaires sont malgré tout fournis ci-après pour chaque groupe de technologies mentionné à la **Figure 19**.

Concernant les systèmes d'informations, très peu de publications identifiées ont permis de chiffrer les impacts environnementaux parmi ces technologies. Certaines publications adoptent une approche qualitative [24, 48]. D'autres évoquent les systèmes d'informations en lien avec des approches quantitatives (empreinte carbone voire ACV par exemple : [50, 53, 54]), mais elles discutent surtout de l'apport théorique de logiciels qui permettent de centraliser de l'information en vue des étapes de collecte de données de l'ACV ou d'un Bilan Carbone. Leur impact en tant que tel n'est pas discuté dans ces publications. Il est d'ailleurs très indirect, et probablement difficile à isoler et à quantifier.

Cette seconde observation est également applicable aux technologies liés aux processus de conception comme la CAO ([22, 25, 26, 27, 55, 57]). Aucune publication ne mentionnant leurs apports environnementaux concrets n'a été recensée.

La réalité virtuelle [21] et les systèmes cyber-physiques sont des technologies encore trop récentes pour être étudiées de façon satisfaisante du point de vue environnemental. Ceci avait déjà été constaté dans la dernière étude ADEME sur le Numérique¹⁶. Une exception notable est la technologie des RFID [41, 42, 43]. L'étude [42] mentionne par exemple plusieurs cas (non-industriel cependant) où cette technologie a été bénéfique :

- La régulation du trafic par RFID à Singapour a réduit le trafic urbain de 45%, et Stockholm, elle a permis de diminuer les émissions de CO2 de 10 à 14 %.
- En 2001, une étude sur les déchets municipaux allemands ont montré que le système de facturation du traitement des déchets des ménages par RFID ont permis une diminution de 17% des déchets

²⁰ Energie consommée de façon indirecte par le produit ou service étudié, ici lors de la phase d'extraction des matières premières

totaux, et de 35% des déchets non-recyclés. Aux États-Unis, un système similaire a permis d'observer une diminution de 25 à 35% de la masse de déchets municipaux.

Ces exemples ne présentent néanmoins pas de vision exhaustive des enjeux environnementaux associés (notamment relatifs à l'épuisement des ressources minérales). À ce propos, on peut mentionner un article étudiant la collecte des ordures ménagères à Grenoble [10], optimisée grâce à l'installation de capteurs sur les poubelles. Le dispositif permet d'optimiser les déplacements des camions poubelles, et de générer des gains environnementaux intéressants, notamment en matière de gaz à effet de serre. Cependant, selon le scénario étudié, des transferts de pollution significatifs peuvent être induits vers l'indicateur d'épuisement des ressources, à cause de la fabrication des composants électroniques nécessaires pour la fabrication des capteurs²¹. À noter que ce type de transfert de pollution est souvent rencontré lorsque l'on étudie les impacts environnementaux des TIC selon une approche multi critères.

3.4.3. Focus sur les études « globales »

Sont qualifiées de « globales » les études faisant une analyse globale des impacts du numérique sur la société, dont l'industrie. Ceci comprend notamment les études SMART2020 (périmètre mondial) [2, 4, 8] et France 2020 (périmètre France) [11]. Ces études ont été effectuées entre 2008 et 2015, essayant d'évaluer les impacts en termes d'émissions de GES et les consommations d'énergie liées aux TIC à horizon 2020 voire 2030.

Elles ont été étudiées de façon détaillée dans l'étude ADEME Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : état des lieux et enjeux pour la prospective menée par Deloitte en 2016. L'analyse alors effectuée a mis en exergue certains manques méthodologiques dans les approches développées, à savoir :

- Méthodologie d'évaluation des impacts (ni complètement multi étapes ni multi critères) ;
- Hétérogénéité et manque de cohérence entre les différentes hypothèses adoptées ;
- Estimation des impacts à horizon 2020 ou 2030 plutôt « extrapolative » que prospective (pas d'effets de seuils ou d'approche systémique).

Malgré ces faiblesses, il est intéressant de confronter les résultats de ces différentes études, notamment au regard de ce qu'elles proposent pour le secteur industriel. À titre d'information, d'autres études ayant une vision globale/généraliste des impacts du numérique ont également été incluses dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11 : Principaux résultats des études portant sur les impacts environnementaux du numérique dans la société et dans l'industrie en particulier

Publications	Principaux résultats
Étude SMART2020 (2008) [2]	<p>À horizon 2020 dans le monde :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Émissions totales directes de GES du secteur des TICs : 1,4 GtCO₂éq • Émissions de GES évitées grâce aux TICs : 7,8 Gt CO₂éq dont 0,97 GtCO₂éq. dans l'industrie <p>Technologies considérées spécifiquement dans l'industrie : les <i>smart motors</i></p>
Étude DG ENV / BIO IS (2008) [3]	<p>Dans l'industrie : l'ajustement de la vitesse des moteurs pourrait permettre de réduire de 10% leur consommation d'énergie, permettant d'économiser 135 TWh en Europe en 2020.</p> <p>Pas de prise en compte des impacts induits par les variateurs de vitesse (matériaux et énergie nécessaires à leur fabrication, transport, recyclage, etc.)</p>
Étude SMARTer2020 (2012) [4]	<p>Dans l'industrie, à horizon 2020 dans le monde :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation des procédés industriels : 0,72 GtCO₂ éq économisées • Optimisation de la vitesse des moteurs : 0,53 GtCO₂ éq. économisées <p>Total 1,25 GtCO₂ éq. sur 9,1 Gt CO₂éq évitées en 2020</p>

²¹ Pour plus d'informations, une fiche de lecture a été dédiée à cette étude dans le rapport ADEME sur la *Contribution du Numérique à la Réduction des Impacts Environnementaux*.

Publications	Principaux résultats
Étude WWF/Ecofys (2008) [7]	Industrie : entre 100 et 1 530 MtCO ₂ éq économisées par les TIC dans le monde Technologies considérées : smart motors, automatisation des procédés
Étude SMARTer2030 (2015) [8]	Dans l'industrie, à horizon 2030 dans le monde : <ul style="list-style-type: none"> • 2,7 GtCO₂ éq. économisées grâce à l'Industrie du futur (sur un total de 12,1 GtCO₂ éq.) ; • 81 milliards de litres d'eau économisés grâce à l'Industrie du futur ; • 12 milliards de dollars/an en coûts d'opérations. Technologies considérées : virtual manufacturing, customer-centric production, circular supply chain, smart services
Étude France2020 Green IT (2010) [11]	Dans l'industrie française, à horizon 2020 : <ul style="list-style-type: none"> • Variateur de vitesse dans les moteurs industriels : 0,9 Mt CO₂ éq. économisées, sur un total d'émission françaises de 32 Mt CO₂ éq. Technologies considérées dans l'industrie : les <i>smart motors</i> Note : à horizon 2020, le numérique permettrait de réduire de 7% (32 MtCO ₂ éq) les émissions de GES de la France.

Une présentation plus ample de ces différentes études peut être trouvée dans le rapport ADEME publié début 2017 sur le numérique²², notamment en annexe avec des fiches de lecture d'environ trois pages chacune.

A la consultation de ces travaux, on note à propos du secteur industriel que :

- Le panel de technologies relatives à l'Industrie du futur est limité aux moteurs à variation de vitesse et de façon vague à l'automatisation des procédés. Ceci reflète la faible connaissance des impacts environnementaux des technologies du numérique appliquées au secteur industriel. Cependant, le sujet commence à émerger, comme le montre l'étude SMARTer2030 en 2015, qui considère un éventail de technologies plus large.
- Le secteur industriel, en France ou dans le monde, n'apparaît pas comme le poste majeur de réduction des impacts environnementaux permis par le numérique. Selon les études SMART2020, **moins de 15% des gains totaux potentiellement apportés par le numérique dans la société se trouvent dans le secteur industriel** (contre des gains plus intéressants dans les transports, les systèmes énergétiques ou le bâtiment).

Comme dit précédemment, il faut garder en tête que les limites méthodologiques des études SMART excluent de considérer ces chiffres comme étant robustes et réutilisables dans d'autres contextes. Cependant, ils permettent d'estimer quelle est la position de l'Industrie du futur dans le secteur des TIC de façon générale.

3.5. Conclusions de la revue environnementale

Cette étude bibliographique permet de mettre en exergue certains manques de la recherche sur les impacts environnementaux de la numérisation dans l'industrie, à savoir :

- Comme abordé précédemment, les limites de cette revue bibliographique sont intrinsèques à l'absence de recul des publications sur le sujet. L'essor de l'industrie du futur est encore récent, et d'une manière concomitante l'étude de ses impacts environnementaux l'est également et donc peu traitée ;
- À la suite de cette remarque sur la nouveauté du sujet, on peut également relever que l'évaluation des impacts se fait encore beaucoup à travers des études ne présentant pas l'exhaustivité possible des méthodes d'analyses (par exemple pas d'analyse ACV complète : les études actuelles se focalisent sur les gains directs en énergie / GES permis chez l'industriel sans quantifier les impacts engendrés par la technologie numérique en elle-même lors de ses phases de fabrication, transport, fin de vie, etc.). Aucune étude recensée ne concilie de façon correcte les trois axes d'analyse

²² ADEME (2016), Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : <http://www.ademe.fr/potentiel-contribution-numerique-a-reduction-impacts-environnementaux>

mentionnés précédemment, à savoir les critères multi étapes, multi critères et multi impacts. En particulier, les sujets suivants méritent d'être investis :

- Mieux prendre en compte le cycle de vie complet des technologies, et notamment les impacts associés aux phases amont (fabrication) et aval (fin de vie) ;
 - Utiliser un panel plus large d'indicateurs (ne se limitant pas qu'aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'énergie), tels que les impacts sur l'épuisement des ressources et les indicateurs de toxicité ;
 - Étudier l'ensemble des impacts directs et indirects, et notamment les impacts associés aux effets systémiques et rebond.
- Cependant, évaluer les impacts environnementaux des TIC reste encore difficile à l'heure actuelle tant ces technologies sont transversales et disséminées dans l'ensemble de la société, secteur industriel compris. C'est par exemple le cas des nouveaux systèmes d'informations informatiques, couche logicielle qu'il est compliqué d'isoler pour en évaluer les impacts environnementaux ;
 - Enfin, il existe un certain nombre de technologies sur lesquelles la recherche ne s'est pas encore vraiment penchée (c'est par exemple le cas de l'Internet des objets avec 3 publications répertoriées : [37, 38, 39] ou la réalité virtuelle sur laquelle une seule publication se concentre exclusivement [21]).

Néanmoins, ce manque d'informations général peut être partiellement dû aux enjeux de confidentialité et de secret industriel. Ceci limite la dissémination des informations sur le bilan environnemental de ces technologies de façon générale. Industrie, recherche et pouvoirs publics doivent donc viser une meilleure collaboration à cet égard.

Afin de pouvoir se positionner sur les potentiels bénéfiques environnementaux que leur apporterait le numérique, **l'Industrie doit mieux s'appropriier ces notions**. Au vu de la diversité de technologies existantes, le bilan environnemental de l'Industrie du futur ne peut être généralisé à l'ensemble des technologies que ce terme couvre ; il **doit être étudié de façon spécifique pour chaque technologie**. Au niveau des connaissances actuelles, il semble ainsi **difficile de se prononcer sur l'impact environnemental global du numérique dans l'industrie**.

4. Cas d'école

La phase 2 de la mission a été consacrée à l'étude des cas d'école. Ils ont pour objectif d'illustrer la situation et les réalités chiffrées et non d'extrapoler. Chaque cas d'école est un exemple d'utilisation d'une technologie numérique dans un ou plusieurs secteurs industriels, qui doit objectiver de façon la plus quantitative possible les impacts économiques, environnementaux et sociaux / organisationnels de cette technologie.

L'exercice est à la fois prospectif (incluant les technologies peu matures aujourd'hui mais prometteuses) et rétrospectif (pour un bilan des technologies utilisées depuis quelques années).

4.1.1. Sélection des cas d'école

Un comité consultatif pour la sélection des cas d'école a été réuni le 2 mars 2017. Le comité consultatif a permis d'aboutir au choix de 10 cas d'école, parmi une liste de 18 cas proposés.

Le comité consultatif a regroupé les équipes de l'ADEME et de Deloitte Développement Durable, des experts académiques (Université de Valenciennes, G-Scop), et industriels (AFIM/AFNOR, Siemens, FIVES), un think tank sur les transformations numériques (FING), ainsi que des représentants d'instances publiques (DGE²³ et MTES²⁴).

Le tableau ci-dessous présente les cas d'école proposés au comité consultatif, qu'ils aient été retenus ou non ; la dernière colonne du tableau indique que le périmètre de chaque cas d'école a pu évoluer au cours de l'analyse.

²³ Direction Générale des Entreprises

²⁴ Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

Tableau 12 : Liste des cas d'école discutés par le comité de sélection du 2 mars 2017

Titre	Description	Evolution(s) ultérieure(s)	
Cas d'école retenus par le comité de sélection			
1	La simulation numérique d'une opération complexe ou dangereuse	La simulation numérique d'une opération complexe ou dangereuse sert à éviter une intervention humaine pour une opération dangereuse. On focalise ici sur les opérations de maintenance, qui sont « le dernier pré carré de l'humain », et comptent parmi les opérations les plus dangereuses sur site industriel.	Fusionné avec le cas 2 sous le nom « La simulation numérique du futur »
2	Le jumeau numérique industriel	Le jumeau numérique industriel virtualise les opérations de conceptions et de maintenance, et est utile sur l'ensemble du cycle de vie du produit / process, Le jumeau numérique sert à simuler la ligne de production du début à la fin.	Fusionné avec le cas 1 sous le nom « La simulation numérique du futur »
3	L'automatisation et la flexibilité de la chaîne de production (pour s'adapter à la demande)	La personnalisation de masse (ou <i>mass-customization</i>) est un processus par lequel une marque donne le moyen à ses clients de pouvoir personnaliser un produit ou un service afin que celui-ci devienne le plus unique possible, dans la mesure de la latitude laissée disponible par la production en série. Ce cas d'école cible l'adaptation de la chaîne de production pour produire en plus petites séries, selon une demande plus personnalisée. La prévision plus fine de la demande est un prérequis de cette adaptation.	Renommé « La personnalisation de masse de la chaîne de production »
4	Les outils numériques de mesure et contrôle de la production (capteurs de mesure)	L'optimisation des procédés industriels étudiée dans ce cas procède de trois étapes successives : 1/ La mesure des procédés de production, au travers d' <i>Intelligent Electronic Devices</i> , ou IED (automates, compteurs, appareils de mesure ayant un moyen de se connecter à l'extérieur) ; 2/ Un contrôle périphérique, qui est une couche intermédiaire (interface technique entre l'étape précédente et la suivante) ; 3/ L'analyse des données de production, via des algorithmes de calcul et des applications.	Renommé « L'optimisation des procédés industriels »

Titre	Description	Evolution(s) ultérieure(s)	
5	Le pilotage à distance du procédé industriel	Le pilotage à distance des unités de production concerne des processus où les données de production et les données client suivies sont nombreuses, et l'analyse qui en est faite est plus précise que par le passé. Les données utilisées servent pour le pilotage des procédés de fabrication.	
6	Business intelligence	L'informatique décisionnelle (en anglais <i>business intelligence</i> ¹) est l'informatique à l'usage des décideurs et des dirigeants d'entreprises. Elle désigne les moyens, les outils et les méthodes qui permettent de collecter, consolider, modéliser et restituer les données, matérielles ou immatérielles, d'une entreprise en vue d'offrir une aide à la décision et de permettre à un décideur d'avoir une vue d'ensemble de l'activité traitée.	Fusion des cas « gestion des stocks de matières via un progiciel de gestion intégré (ERP) » et « Le "big data" : extraction et analyse de données à fins d'optimisation des process industriels »
7	L'assistance aux opérateurs	La cobotique (ou robotique collaborative) est une branche émergente de la technologie qui vise à produire des robots assistant l'Homme, en automatisant une partie de ses tâches. Ce domaine est à l'interface des technologies cognitives et du facteur humain (comportement, décision, robustesse et contrôle de l'erreur), de la biomécanique ²⁵ et de la robotique.	Renommé « La cobotique au service des opérateurs »
8	La fabrication additive sable pour la fabrication de moules complexes	La fabrication additive sable désigne un procédé de fabrication par ajout de sable, la plupart du temps assistée par ordinateur. Elle est définie par l'ASTM comme la fabrication par empilement de couches successives, par opposition à l'usinage qui fonctionne par retrait de matière	
9	La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés	La technologie RFID permet d'identifier précisément chacune des pièces ou élément produit afin d'effectuer un suivi efficace.	Fusion avec le cas « La gestion de magasins d'usine / L'armoire RFID intelligente »
10	La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques	La maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle basée sur le franchissement d'un seuil prédéfini qui permet de donner l'état de dégradation du bien avant sa détérioration complète. On s'intéresse ici à son application dans le cas des moteurs électriques.	
Cas d'école non retenus par le comité de sélection			

²⁵ Biomécanique : modélisation du comportement et de la dynamique des mouvements.

Titre	Description	Evolution(s) ultérieure(s)
A La simulation numérique du moulage	La simulation numérique du moulage permet de réduire la durée de mise au point (retouche outillage) et d'avoir un taux de rebus réduit pour une fabrication grande série, en optimisant la conception du système d'alimentation.	Non retenu : il y a de moins en moins de moulistes en France, le marché ne semble pas très porteur.
B La fabrication additive métallique des pièces détachées ou innovantes	La fabrication additive métallique désigne un procédé de fabrication par ajout de métal, la plupart du temps assistée par ordinateur. Elle est définie par l'ASTM comme la fabrication par empilement de couches successives, par opposition à l'usinage qui fonctionne par retrait de matière.	Une étude du PIPAME vient de paraître sur le sujet, et une étude de la DGE est en cours sur la fabrication additive de pièces détachées.
C Le Product Lifecycle Management dans les projets partenariaux	Le product lifecycle management (« gestion du cycle de vie des produits ») désigne un cadre organisationnel et un ensemble de concepts, méthodes et outils logiciels dont le but est de créer et de maintenir les produits industriels tout au long de leur cycle de vie, depuis l'établissement du cahier des charges du produit et des services associés jusqu'à la fin de vie, en passant par le maintien en conditions opérationnelles.	Non retenu
D Le Building Information Model : maquette numérique open source pour la modélisation du bâti	Le Building Information Model (« modélisation des données du bâtiment ») est une technologie et des processus associés pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction. Le BIM facilite la faisabilité de projets conçus de bâtiments.	Non retenu
E Le variateur de vitesse dans les moteurs industriels	Un variateur ou un démarreur électronique est un convertisseur d'énergie dont le rôle consiste à moduler l'énergie électrique fournie au moteur. On s'intéresse ici à l'impact de l'intégration de ces variateurs dans les moteurs industriels.	Non retenu
F La dématérialisation de la documentation technique	La dématérialisation est la possibilité technique de transformer un document qui a une consistance physique en un support virtuel.	Non retenu

4.2. Étude des cas d'école

L'ensemble des cas d'école sont présentés en annexe de ce rapport, selon des fiches détaillées contenant les rubriques suivantes :

- Typologie ;
- Mise en œuvre ;
- Impacts économiques ;
- Impacts environnementaux ;
- Impacts sociaux ;
- Perspectives ;
- Sources.

4.3. Principaux enseignements des cas d'école

Chaque cas d'école est un exemple d'utilisation d'une technologie numérique dans un ou plusieurs secteurs industriels, qui doit objectiver de façon la plus quantitative possible les impacts économiques, environnementaux et sociaux / organisationnels de cette technologie.

L'exercice est à la fois prospectif (incluant les technologies peu matures aujourd'hui mais prometteuses) et rétrospectif (pour un bilan des technologies utilisées depuis quelques années).

4.3.1. Classements possibles des cas d'école

Deux catégories de cas d'école

Au terme de l'analyse, on peut distinguer finalement deux catégories de cas d'école :

1. **Cas d'école à périmètre restreint** : la technologie numérique étudiée ne porte que sur la fonction de production. Elle est une brique (largement) indépendante du reste de l'entreprise.

Son action se concentre sur le cœur de métier – le numérique optimise le procédé industriel (technologie numérique qui peut être très pointue mais qui reste cantonnée à l'étape de production) ;

2. **Cas d'école à périmètre étendu** : la technologie numérique étudiée est transverse à toutes les fonctions de l'entreprise. Elle « embarque » les différents métiers de l'entreprise dans des interactions toujours plus poussées.

Son action impacte la totalité des opérations – le numérique change le modèle d'affaires de l'entreprise (intégration de plusieurs étapes du cycle de vie de l'entreprise au-delà de la seule production).

Trois tableaux de synthèse

Hiérarchisation des cas d'école par grandes catégories d'impact

Le tableau ci-dessous indique pour chaque cas d'école son périmètre (restreint ou étendu), ainsi que les principaux impacts qui y sont associés (économiques, environnementaux et / ou sociaux).

Tableau 13 : Périmètre et principaux impacts des cas d'école étudiés

N°	Titre	Type de technologie	Périmètre	Principaux impacts
1	La simulation numérique 4.0	CAO / FAO Réalité virtuelle – Réalité augmentée	Étendu	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Environnementaux • Sociaux (sécurité)
2	La personnalisation de masse de la chaîne de production	Systèmes cyber-physiques Robotique – Cobotique	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Sociaux (nouveaux métiers)
3	L'optimisation des procédés par l'introduction de capteurs de mesure	Système d'information Systèmes cyber-physiques	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Environnementaux
4	Le pilotage à distance du procédé industriel	Système d'information Systèmes cyber-physiques	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Sociaux (nouveaux métiers)
5	Le business intelligence	Système d'information	Étendu	<i>Impacts non déterminés à date</i>
6	La cobotique	Robotique – Cobotique Réalité virtuelle – Réalité augmentée	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Sociaux (sécurité, pénibilité, nouveaux métiers)
7	La fabrication additive sable	CAO / FAO	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Environnementaux
8	La traçabilité des flux et des produits	Systèmes cyber-physiques	Étendu	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques
9	La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques	CAO / FAO Systèmes cyber-physiques	Restreint	<ul style="list-style-type: none"> • Économiques • Environnementaux

Zoom sur les impacts environnementaux

Le tableau ci-dessous a été construit à partir de la grille simplifiée d'évaluation des impacts environnementaux, située dans la rubrique « typologie » de chaque fiche cas d'école. Les bénéfices et préjudices environnementaux les plus forts sont à retrouver dans les cas d'école pour lesquels l'un des principaux impacts est d'ordre environnemental (voir tableau précédent).

Les bénéfices environnementaux présentés dans le tableau ci-dessous sont des bénéfices potentiels, permis en théorie par la technologie mais non nécessairement mesurés en pratique par les industriels, et spécifiques à chaque secteur (cf. Tableau 15). Par ailleurs, dans la majorité des cas, les nouvelles technologies sont introduites en industrie pour des raisons de productivité, et le bénéfice environnemental s'entend donc à l'unité produite, et non à l'échelle globale de l'usine ou de la chaîne de production.

Les préjudices environnementaux, quant à eux, correspondent aux impacts directs des technologies étudiées : ils sont donc à la fois actuels (ils se produisent dans tous les cas) et génériques (à peu près les mêmes pour tous les secteurs).

Tableau 14 : Evaluation qualitative de certains impacts environnementaux pour l'ensemble des cas d'école

N°	Titre	Indicateurs	Bénéfices potentiels	Précisions sur les bénéfices potentiels	Préjudices (impacts directs)	Détails sur les préjudices environnementaux
1	La simulation numérique 4.0	Énergie	+++	Phase d'usage : Consommations et émissions mieux maîtrisées du fait de la simulation numérique en amont.	-	<ul style="list-style-type: none"> Phases de fabrication et fin de vie : consommation d'énergie et de ressources des équipements de simulation numérique (<i>hardware</i>) Phase d'usage : consommation d'énergie des équipements informatiques supplémentaires liés aux logiciels de simulation (<i>software</i>)
		Ressources	+++		-	
		Polluants (air, eau, sol)	++		0	
2	La personnalisation de masse de la chaîne de production	Énergie	+	Phase d'usage : L'automatisation de chaînes de production de petites séries permet une optimisation globale de la phase de production, et une	-	<ul style="list-style-type: none"> Phases de fabrication, d'usage et fin de vie : consommation d'énergie et de ressources des robots ou nouvelles machines
		Ressources	+		-	
		Polluants (air, eau, sol)	0		0	

N°	Titre	Indicateurs	Bénéfices potentiels	Précisions sur les bénéfices potentiels	Préjudices (impacts directs)	Détails sur les préjudices environnementaux
				réduction des consommations.		
3	L'optimisation des procédés par l'introduction de capteurs de mesure	Énergie Ressources Polluants (air, eau, sol)	+++ ++ ++	<u>Phase d'usage</u> : Consommations et émissions mieux maîtrisées du fait de leur suivi fin. Tous les secteurs sont concernés.	-- -- 0	• <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des capteurs et instruments de mesure
4	Le pilotage à distance du procédé industriel	Énergie Ressources Polluants (air, eau, sol)	++ + +	<u>Phase d'usage</u> : Le pilotage centralisé permet une optimisation globale des consommations, notamment d'énergie.	- 0 0	• <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie des logiciels de pilotage à distance
5	Le <i>business intelligence</i>	Énergie Ressources Polluants (air, eau, sol)	+ ++ +	<u>Stockage et phase d'usage</u> : L'utilisation de données internes et externes permet d'optimiser les flux, notamment de matières.	-- - 0	• <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie des logiciels de <i>business intelligence</i>
6	La cobotique	Énergie Ressources Polluants (air, eau, sol)	+ + 0	Les bénéfices environnementaux de la cobotique sont limités.	- -- 0	• <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des cobots
7	La fabrication additive sable	Énergie Ressources Polluants (air, eau, sol)	+ +++ +	<u>Phase d'usage</u> : Le principal bénéfice concerne l'économie de matière, notamment pour la fabrication de pièces complexes.	- - 0	• <u>Phases de fabrication et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des imprimantes 3D et des consommables (résines)

N°	Titre	Indicateurs	Bénéfices potentiels	Précisions sur les bénéfices potentiels	Préjudices (impacts directs)	Détails sur les préjudices environnementaux
				Le bénéfice énergétique doit se mesurer sur l'ensemble du cycle de vie des pièces fabriquées. Ainsi, certaines pièces fabriquées en impression 3D ont un impact positif sur les consommations énergétiques du système dans lequel elles s'intègrent (ex. injecteurs à gaz en métallurgie)		<ul style="list-style-type: none"> <u>Phase d'usage</u> : consommation d'énergie des imprimantes 3D
8	La traçabilité des flux et des produits	Énergie	+	<u>Phase d'usage</u> :	--	<ul style="list-style-type: none"> <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des puces et capteurs RFID
		Ressources	++	Optimisation globale, mais limitée, des flux.	--	
		Polluants (air, eau, sol)	+	Maitrise des émissions, <u>tout au long du cycle de vie, et notamment en fin de vie.</u>	0	
9	La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques	Énergie	+++	<u>Phase d'usage et maintenance</u> :	-	<ul style="list-style-type: none"> <u>Phase d'usage</u> : consommation d'énergie des logiciels de pilotage des moteurs
		Ressources	0	Le bénéfice potentiel est proportionnel aux consommations énergétiques des moteurs électriques, dans l'industrie.	0	
		Polluants (air, eau, sol)	0		0	

Présentation des cas d'école par secteurs industriels (indicateur de consommation énergétique)

Le Tableau 15 présente une évaluation des potentiels de réduction des consommations d'énergie de chaque technologie étudiée dans les cas d'école dans les secteurs industriels choisis pour l'étude. Le potentiel a été évalué selon deux paramètres : la consommation énergétique du secteur, et les bénéfices potentiels sur l'indicateur de consommation énergétique (indicateur repris du Tableau 14). Ce potentiel est mesuré selon 4 niveaux :

- **Potentiel fort (de réduction des consommations énergétiques)** : le secteur est moyennement ou fortement consommateur d'énergie, et la technologie présente des bénéfices potentiels importants (+++) ;
- **Potentiel moyen** :
 - Le secteur est fortement consommateur d'énergie, et la technologie présente des bénéfices potentiels faibles (+) ;
 - Le secteur est moyennement consommateur d'énergie, et la technologie présente des bénéfices potentiels moyens (++) ;
 - Le secteur est faiblement consommateur d'énergie, et la technologie présente des bénéfices potentiels forts (+++) ;
- **Potentiel faible** : le secteur est moyennement ou faiblement consommateur d'énergie, et la technologie présente des bénéfices potentiels faibles (+) ;
- **Non applicable** : la technologie n'est pas applicable au secteur.

Le nombre d'emploi des secteurs a également été indiqué, afin d'illustrer le volume de salariés concernés par les mutations des secteurs.

Secteur	Abréviation utilisée
Production et distribution d'électricité, gaz, air conditionné	Prod. et Distrib. Énergie
Agroalimentaire	Agroalimentaire
Métallurgie	Métallurgie
Fabrication de produits en caoutchouc, plastique et autres produits minéraux non métalliques	Caoutch., plastiques
Industries chimiques et pharmaceutiques	Chimie
Construction mécanique	Mécanique
Construction électrique et électronique	Electrique, électronique
Construction de véhicules automobiles et d'autres matériels	Automobile
Construction. navale et aéronautique, armement	Aéronautique, naval
Industrie textile, du cuir et de l'habillement	Textile, cuir
Industrie du papier et du carton	Papier-Carton
Industries diverses	Divers

Il ressort de cette évaluation que les secteurs industriels où l'utilisation des technologies numériques considérées dans le cadre de l'étude présente le potentiel le plus fort en terme de réduction des consommations d'énergie sont « Production et distribution d'électricité, gaz, air conditionné », « Agroalimentaire », « Métallurgie », « Fabrication de produits en caoutchouc, plastique et autres produits minéraux non métalliques », « Industries chimiques et pharmaceutiques » et « Industrie du papier et du carton ».

Tableau 15 : Potentiels de réduction des consommations d'énergie permis par les différentes technologies dans les secteurs industriels

Secteur	Prod. et Distrib. Énergie	Agroalimentaire	Métallurgie	Caoutch., plastiques	Chimie	Mécanique	Électrique, Électronique	Automobile	Aéronautique, naval	Textile, cuir	Papier-Carton	Divers	
Consommation France 2014 (ég. ktep) ²⁶	-	4 383	8 770	4 953	9 970	401	563	737	322	253	2 893	957	
Emplois France 2016 (milliers) ²⁷	174	502	379	165	216	173	108	195	152	101	172	261	
N°	Technologie	Bénéfice potentiel ²⁸											
1	Simulation 4.0	+++	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen		Potentiel moyen	Potentiel moyen
2	Personnalisation de masse de la chaîne de production	+		Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen			Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible		Potentiel faible
3	Optimisation des procédés industriels	+++	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel fort	Potentiel moyen
4	Pilotage à distance des procédés industriels	++	Potentiel moyen										Potentiel faible
5	Business intelligence	+	Potentiel moyen	Potentiel moyen		Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible		Potentiel faible
6	Cobotique au service des opérateurs	++		Potentiel moyen		Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible
7	Fabrication additive sable	+						Potentiel faible		Potentiel faible	Potentiel faible		Potentiel faible
8	Traçabilité des flux et des produits	+	Potentiel moyen			Potentiel moyen	Potentiel moyen			Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible	Potentiel faible
9	Maintenance prévisionnelle des moteurs électriques	+++	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel fort	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel moyen	Potentiel fort

²⁶ Insee et Agreste (2015), Enquête annuelle sur les consommations d'énergie de l'industrie.

²⁷ Acoos (2017), La masse salariale et les effectifs salariés du secteur privé au premier trimestre 2017.

²⁸ Repris du Tableau 14, indicateur de consommation énergétique uniquement.

4.3.2. Enseignements pour l'ensemble des cas d'école

Des enjeux et des difficultés autour de la donnée

Contexte : "data is the new oil"

Les entreprises industrielles, comme aujourd'hui l'ensemble des entreprises, font face à un enjeu d'extraction, d'analyse et d'appropriation de la donnée. Il existe ainsi une course à l'acquisition de données (données de production notamment) et de puissance de calcul – autrement dit il existe des enjeux forts de mesure et d'analyse des données.

Les cas n°3 (optimisation des procédés par l'introduction de capteurs de mesure), n°4 (pilotage à distance du procédé industriel) et n°5 (*business intelligence*) portent tous les trois sur ces enjeux. Le cas n°5 peut être vu comme un prolongement du cas n°3, qui ne concerne que les données de production²⁹. *In fine*, l'enjeu est d'assurer une continuité des données de l'entreprise, dans une vision de l'entreprise comme un écosystème numérique capable d'agréger différentes fonctions internes et différentes parties prenantes externes.

À noter que pour ces cas d'école-là, les technologies aujourd'hui ne sont pas encore matures et sont plutôt réservées aux grands groupes :

- Parce qu'ils ont les moyens de les mettre en place (investissements de plusieurs millions d'euros par Air Liquide et Faurecia par exemple) ;
- Parce que ces technologies de la donnée sont surtout pertinentes pour les entreprises qui disposent de nombreux sites de production.

Les fournisseurs de services / solutions aux industriels ont tendance à pousser dans le sens de la mesure d'un maximum de données (SAP, Siemens, Schneider, Rockwell, Actemium, etc.). Au-delà de cette course à l'acquisition de données, l'enjeu réside dans la rationalisation de cette acquisition et en l'exploitation adéquate des données en fonction des besoins de l'entreprise.

Confidentialité des données

Les données économiques et sociales sont généralement disponibles, mais souvent confidentielles :

- Peu de données chiffrées sont diffusées en ligne (les communiqués de presse sont souvent davantage qualitatifs) ;
- L'industriel est encore à un stade de test vis-à-vis des technologies ciblées, et ne souhaite pas nécessairement communiquer sur ces expérimentations ;
- La validation du management et de la communication est très souvent nécessaire, même pour des données a priori non sensibles ;
- De plus il peut exister des enjeux concurrentiels, stratégiques ou syndicaux forts autour de la mise en place des nouvelles technologies, qui poussent les entreprises à la prudence (voir le contexte ci-dessus).

On peut noter, relativement à la confidentialité des données, une sorte de paradoxe entre :

- D'une part, la nécessité de partager certaines données avec les parties prenantes de l'entreprise (fournisseurs et clients notamment). Ceci est illustré par exemple par le projet Connect d'Air Liquide, qui pourrait mener à la création d'un portail d'échange d'informations pour les clients, ou à des solutions permettant de travailler en aval de la consommation, en synergie avec les utilisateurs finaux (par exemple à partir de données historicisées ou de mesures de facteurs externes tels que la météo, la circulation, etc.) ;
- D'autre part, une certaine culture du secret chez les acteurs industriels, qui peut se traduire par :
 - Des accords de confidentialité ;
 - Des besoins renforcés en cyber-sécurité.

Entre confidentialité et ouverture, la voie choisie par la plupart des industriels (et l'ensemble des fournisseurs de service) est celle d'une harmonisation des formats de données. Il y a un mouvement en cours de

²⁹ Dans le cas d'école n°3 (optimisation des procédés par la mesure des données de production), l'entreprise décide de « placer le projecteur » à un endroit donné, sur telle ligne de production par exemple ; dans le cas d'école n°5 (*business intelligence*), l'entreprise reconnaît qu'elle ne « sait pas exactement » où placer le projecteur.

standardisation des interfaces et des protocoles de communication utilisés par les systèmes impliqués dans l'usine (automates, équipements informatiques, etc.) et hors de l'usine. Chez Schneider Electric par exemple, à la demande des clients, les protocoles de données sont ouverts. Une fois que la donnée est extraite de l'équipement, elle ne sera pas traitée différemment par un système établi par un autre acteur du marché.

Une des missions de l'Alliance pour l'Industrie du futur est d'ailleurs de travailler sur la définition de standards pour les modèles européens d'industrie du futur (en coordination avec les autres parties prenantes européennes).

Disponibilité des données

Certaines données économiques et sociales, et la plupart des données environnementales souhaitées ne sont pas disponibles :

- La mesure d'impact peut être superflue, pour certaines technologies qui évoluent encore très vite (la fabrication additive sable par exemple ou la cobotique) ;
- La mesure d'impact est potentiellement coûteuse en termes de ressources financières, matérielles et humaines. Selon Schneider Electric, le coût des installations de mesure (de la consommation électrique uniquement) est variable :
 - Sur un tableau électrique neuf, la pose d'un capteur de mesure entraîne un surcoût de 10 %, sur des projets entre 100 000 € et 1 M€ en moyenne ;
 - Sur les sites existants, l'approche et le coût sont à évaluer au cas par cas ;
- La mesure des impacts environnementaux semble se justifier uniquement si ces impacts traduisent un coût économique significatif (une forte consommation d'énergie par exemple). Il faut un plan d'affaires pour investir, donc potentiellement fournir un effort de mesure qui pourra justifier ensuite d'un investissement.

Pourtant, la mesure est un préalable très souvent nécessaire à l'action, selon le précepte de management "what gets measured gets managed". Le déploiement est en cours, parfois dans une optique de *big data* (course à la mesure et l'analyse des données – voir le contexte ci-dessus).

Isolation des données

Les données environnementales et sociales (en particulier) restent difficiles à isoler :

- Les cas d'école apportent une confirmation à la revue bibliographique environnementale : il est difficile voire impossible d'isoler les impacts liés directement aux technologies numériques. Par exemple, il n'est pas possible d'isoler la part du numérique dans la réduction ou l'augmentation des émissions de CO₂ d'un groupe industriel ;
- Ceci est vrai a fortiori pour les cas d'école à périmètre étendu.

Une prédominance des critères et des impacts économiques

La plupart des entreprises ont conscience des enjeux de long terme sur les aspects environnementaux et sociaux, mais n'en font pas des éléments d'aide à la décision.

Les gains financiers (directs attendus ou mesurés) restent le facteur principal motivant les industriels à implanter des solutions numériques. Les autres facteurs (sociaux, environnementaux) ne sont pas recherchés de prime abord, mais sont observés dans un second temps et valorisés a posteriori.

La « hiérarchie » des critères d'investissement est pour tous les secteurs industriels à peu près la suivante :

1. Sécurité ;
2. Productivité ;
3. Autres critères (organisationnels, sociaux, environnementaux, etc.).

La question de la transition écologique est cloisonnée (par rapport au sujet du numérique) :

- Elle n'est pas traitée à un niveau stratégique pour l'entreprise ;
- Elle est approchée principalement par les risques, la norme, la qualité, la maîtrise des coûts.

Les montants investis (CAPEX) pour les projets de transition numérique peuvent être significatifs :

Tableau 16 : Montants du Capital Expenditure (CAPEX) présents dans les cas d'école étudiés

N°	Titre	Exemples	CAPEX
1	La simulation numérique 4.0	Solvay (Belle-Etoile)	300 k€
		Solvay (Chalampé)	30 M€
		EDF	1 M€ / réacteur
2	La personnalisation de masse de la chaîne de production	Georges Pernoud	780 k€ / robot
3	L'optimisation des procédés par l'introduction de capteurs de mesure	SNCF (télé-relève)	175 k€
		Schneider (capteurs)	100 k€ - 1 M€
4	Le pilotage à distance du procédé industriel	Air Liquide	20 M€
5	Le business intelligence	Faurecia	10 M\$
6	La cobotique	-	60 – 150 k€ / cobot
7	La fabrication additive sable	Fonderie Boutté	750 k€
8	La traçabilité des flux et des produits	Engie	<ul style="list-style-type: none"> • 3 – 11 € / tag • 100 € / objet connecté
9	La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques	-	-

Concernant le financement des investissements, l'information manque pour la répartition en fonds propres, dette et subventions. Sur l'ensemble des cas d'école, nous n'avons recensé que deux entreprises étudiées ayant bénéficié d'aides publiques :

- Georges Pernoud (cas d'école n°2 – personnalisation de masse) a reçu une aide de la Région Rhône-Alpes, ainsi qu'une subvention européenne ;
- La fonderie Boutté (cas d'école n°7 – fabrication additive sable) a reçu une aide de la Région Hauts-de-France (à hauteur de 100 k€) et une subvention de la BPI/PR1 « programme faisabilité » (à hauteur de 100 k€ également).

Certains acteurs remontent également des difficultés de financement, comme les fabricants français de cobots, qui peinent à industrialiser leurs produits. A ce jour, il n'existe aucune filière spécialisée pour accompagner le financement de projet de cobotique.

De réels impacts sociaux

Quoique difficiles à quantifier, les impacts sociaux du numérique sont réels, au moins à trois niveau :

- Sur les conditions de travail ;
- Sur l'organisation du travail ;
- Sur les ressources humaines (nouveaux métiers et gestion du personnel).

Les impacts du numérique sur l'emploi sont évoqués plus loin comme un « point de vigilance ».

Effets du numérique sur les conditions de travail

Le numérique est généralement reconnu comme un facteur d'amélioration de la sécurité au travail et réduction de la pénibilité des tâches. Plusieurs exemples issus des cas d'école le prouvent :

- **Cas d'école n°1 (simulation numérique)** : le projet Walkinside de Total a été conçu en particulier pour les opérations de maintenance complexes et/ou dangereuses : il permet d'améliorer la sécurité des opérateurs au travail en les préparant à ce type d'opérations ;
- **Cas d'école n°2 (personnalisation de masse)** : dans l'entreprise Georges Pernoud, le nombre d'opérations manuelles a diminué. Les opérateurs ne déplacent plus les palettes et les blocs d'acier, et ne participent plus au chargement des machines ;
- **Cas d'école n°6 (cobotique)** : la cobotique va permettre d'améliorer les conditions de travail des personnes en éliminant les tâches difficiles et répétitives, qui peuvent entraîner des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) ou accidents du travail. Chez Safran, dans le cadre du Programme de développement de l'ergonomie (mis en œuvre depuis 2013 et qui associe entre autres des solutions cobotiques) :
 - Les TMS ont baissé de 43 % depuis le début du programme ;
 - Les accidents du travail sur la manutention manuelle ont baissé de 49 % depuis le début du programme.

Effets du numérique sur l'organisation du travail

Le numérique a eu et continue d'avoir de forts impacts en termes d'organisation du travail. Le numérique change potentiellement en profondeur la culture des entreprises industrielles, à commencer par les plus grosses d'entre elles, parce qu'il casse les silos qui existent :

- A l'intérieur de l'entreprise. La mise en place d'un ERP est un bon exemple d'une transformation numérique de l'intérieur, dans la mesure où le logiciel change la manière de partager les informations opérationnelles entre les départements et les filiales de l'entreprise :
 - Entre les départements : par exemple, auparavant les stocks étaient mesurés différemment entre les différents services (l'approvisionnement, la production, la comptabilité) ; avec un ERP il n'y a plus qu'une seule mesure du stock ;
 - Entre les filiales : par exemple, auparavant les directions nationales étaient puissantes ; avec un ERP, l'information est accessible à toutes les filiales, ce qui a cassé des murs de pouvoir en interne. La mise en place d'un ERP tend ainsi à favoriser la transparence entre les différentes filiales.
- Entre l'entreprise et ses fournisseurs et clients. De nombreuses entreprises soulignent le potentiel du numérique à relier directement les lignes de fabrication aux clients et aux fournisseurs de l'entreprise. Ceci implique d'intégrer le e-commerce, et de rendre les produits de plus en plus personnalisables par les consommateurs finaux : il existe une véritable demande des industriels pour aller en ce sens. Ainsi, les solutions numériques ne répondent pas seulement aux enjeux manufacturiers de l'entreprise, mais ont vocation à changer toute la chaîne du fournisseur au consommateur, et par conséquent à refondre toute l'organisation de l'entreprise.

Effets du numérique sur les ressources humaines

Evolution des métiers

Avec le déploiement du numérique dans les entreprises, de nouveaux métiers sont apparus et de nouvelles directions ont été créées.

Nouveaux métiers. Chez Valeo par exemple, le poste de *data scientist* a été créé en janvier 2016 : il s'intéresse aux nouvelles façons de communiquer aux clients et a pour champ d'étude l'ensemble des données générées tout au long du processus de production (traçabilité, *supply chain*, cycle de vie, commercialisation, etc.). Des postes similaires ont été créés chez Saint-Gobain, qui n'a pas créé de direction numérique en raison de la culture très décentralisée du groupe. Dans l'entreprise Georges Pernoud, de nouveaux métiers de programmation des machines et des robots sont apparus, pour lesquels l'industriel souligne la difficulté de recrutement de personnel compétent et formé. Enfin dans les usines où sont déjà

présents des cobots, le métier des opérateurs a changé puisque les cobots assistent les opérateurs dans leurs tâches sur les lignes de production.

Nouvelles directions. Chez Air Liquide, une direction digitale mondiale a été créée, ainsi qu'un Innovation-lab (l'i-lab). Ce laboratoire concentre des personnes créatives qui ne sont pas nécessairement des ingénieurs, et travaille de façon transversale avec diverses équipes du groupe, notamment sur le test de nouvelles technologies. Le numérique va ainsi de pair avec de nouvelles méthodes de travail, plus collaboratives.

Dans les deux cas, des formations sont proposées en interne par les entreprises et des besoins sont remontés pour des formations externes (initiales et continues).

Gestion du personnel

Le numérique est reconnu presque unanimement comme un des moyens dont disposent les entreprises industrielles pour :

- Attirer les talents : il y a un enjeu dans l'industrie de se recentrer sur l'humain, de lui redonner sa place pour redorer l'image de l'industrie ;
- Conserver les talents : le numérique peut réduire la pénibilité des tâches et créer plus de confort pour les employés, à condition que les employés soient formés aux nouveaux outils numériques.

L'étude publiée récemment par le Syntec Numérique, sur la base d'entretiens téléphoniques auprès d'entreprises du secteur industriel, confirme ces deux points : « D'une part, la transformation numérique du secteur industriel est un levier important qui va permettre d'attirer progressivement les jeunes générations dans l'industrie du futur (selon 71 % des entreprises interrogées). Ces jeunes auront été formés aux nouveaux outils et aux nouveaux modes de travail et de collaboration. D'autre part, pour près d'une entreprise sur deux, la mise en place d'un plan de transformation numérique impose de développer les compétences et savoir-faire des collaborateurs en place. Mais paradoxalement, ces entreprises sont encore peu nombreuses (13 %) à avoir véritablement déployé un plan de formation des collaborateurs pour les accompagner dans la transformation numérique de leurs métiers. En définitive, elles devront accélérer la formation des collaborateurs pour tirer pleinement partie de leur stratégie de transformation. »³⁰

D'aucuns soulignent que l'entrée du numérique à tous les niveaux se fait notamment grâce à la présence de certaines personnes pilotes, qui testent les nouveaux outils et contribuent (souvent) à lever les réticences initiales.

Les cas d'école n'ont pas permis d'analyser certains effets plus fins du numérique sur les conditions de travail des opérateurs, comme par exemple : une possible aliénation des opérateurs, une éventuelle intensification du contrôle des tâches (jusqu'au « flicage »), ou un potentiel appauvrissement du travail. Il est clair que le numérique n'a pas que des aspects positifs sur les conditions de travail, à savoir l'amélioration de la sécurité et la réduction de la pénibilité des tâches ; selon un membre de l'Alliance pour l'Industrie du Futur, il y a même actuellement une transition « d'une phase où la machine assiste l'homme vers une phase où l'homme assiste la machine ». Il existe donc aussi des menaces sur les conditions de travail dans l'usine du futur, qui demanderaient à être approfondies.

Encadré 4 : Quelles conséquences sociales du numérique au-delà des gains en sécurité et en pénibilité ?

Des impacts environnementaux largement méconnus

Les difficultés de disponibilité et d'isolation des données évoquées ci-avant concernent en particulier les données environnementales. Peu d'informations chiffrées ressortent des cas d'école.

Les points d'analyse qui ressortent sont donc avant tout qualitatifs :

- A. Quand il y en a, les bénéfices environnementaux correspondent quasi-systématiquement à une amélioration du procédé industriel.** La réduction des consommations d'énergie ou de matières, ou la baisse des rejets polluants (dans l'eau, l'air, le sol) sont un « effet collatéral » des améliorations mises en œuvre pour gagner en productivité. Par exemple, en optimisant le débit de gaz circulant

³⁰ Syntec Numérique (2016), Enquête direction métiers – 3^e trimestre 2016 : « La transformation numérique du secteur de l'industrie »

dans un réacteur chimique, la simulation numérique peut entraîner un léger gain en termes de consommations énergétiques. Plus marginalement, les bénéfices environnementaux peuvent être la conséquence de technologies numériques, comme la mise en veille automatique de certains robots ou machines ;

B. L'indicateur environnemental le plus suivi est celui de la consommation énergétique :

- a. Il est le plus suivi parce qu'il est le plus facile à suivre (via sa facture d'électricité ou de gaz), et parce qu'il a une traduction directe en coût économique ;
- b. Certains cas d'école montrent des baisses significatives de consommation énergétique, comme le cas n°2 (personnalisation de masse – exemple de Ford réduisant d'environ 30 % la consommation énergétique d'une usine), ou le cas n°3 (optimisation des procédés industriels – exemple de Siemens réduisant de 20 % les consommations de son usine d'Amberg) ;

C. Les autres indicateurs environnementaux sont rarement suivis :

- a. La consommation de matières l'est dans un seul cas d'école, le n°7 (fabrication additive sable) ;
- b. Les rejets de polluants (dans l'eau, l'air, le sol) ne le sont jamais, même si dans certains cas d'école il y a un bénéfice environnemental potentiel (qui n'est pas quantifié) : par exemple dans le cas d'école n°8 (traçabilité des flux), la mise en place de 500 capteurs de RFID active dans le terminal méthanier de Montoir de Bretagne permet en cas de fuite de couper l'arrivée de méthane en moins de 10 secondes – en cas d'incident, ceci réduit donc le temps de fuite ;
- c. Dans de nombreux cas, les acteurs interrogés ont l'intuition que la technologie numérique qu'ils mettent en œuvre n'a pas d'impact sur ces indicateurs, à leurs yeux secondaires. Pour l'entreprise Georges Pernoud par exemple, qui fabrique des moules industriels, l'investissement dans des robots automatisant la chaîne de production n'a pas d'impact sur la consommation de bruts d'acier en entrée de chaîne ;

D. Il y a dans certains cas un enjeu de durée de vie des équipements industriels :

- a. Soit que les technologies numériques mises en œuvre mobilisent des équipements dont la durée de vie est mal connue, et sans doute améliorable :
 - i. Capteurs : la durée de vie des équipements de mesure est variable, souvent autour d'une dizaine d'années, et selon un constructeur interrogé (Editag) il existe une forte demande du marché pour travailler sur la durée de vie de ces produits ;
 - ii. Imprimantes 3D sable : les technologies d'impression évoluent rapidement, si bien que les machines produites sont rapidement obsolètes en termes de performance ;
- b. Soit au contraire que les technologies numériques permettent un allongement de la durée de vie des équipements :
 - i. Moteurs électriques : la maintenance prévisionnelle est par essence une solution d'allongement de la durée de vie des moteurs (voir cas n°9) ;
 - ii. *Business intelligence* : l'analyse croisée de multiples données, à la fois internes et externes à l'entreprise, débouche potentiellement sur des corrélations permettant d'allonger la durée de vie des équipements³¹.

E. Dans les cas d'école étudiés, il n'y a pas d'analyse d'impact environnemental menée par les industriels en amont de l'investissement, à l'exception du cas d'école n°8 (traçabilité des flux), où l'entreprise Engie réalise pour chaque projet une étude concernant l'exposition des travailleurs aux ondes électromagnétiques ;

³¹ Exemple (fictif) : si l'analyse croisée des données de production, météorologiques et boursières permet d'anticiper la demande au plus juste, les lignes de production peuvent être ralenties dans les phases de creux et fonctionner ainsi sur une période plus longue.

F. Concernant les impacts environnementaux directs des technologies étudiées, ils correspondent principalement aux consommations d'énergie et de matière, ainsi qu'aux rejets de polluants (dans l'eau, l'air et le sol) des technologies tout au long de leur cycle de vie : fabrication des équipements, consommations directes en phase d'usage des équipements et des logiciels³², fin de vie des équipements. On peut noter que les impacts environnementaux directs sont :

- a. Toujours difficiles à évaluer :
 - i. Notamment faute de données disponibles ;
 - ii. Particulièrement pour les technologies des cas d'école à périmètre étendu (*type business intelligence*) ;
- b. Parfois négligeables au regard des impacts environnementaux des procédés industriels eux-mêmes : c'est le cas du projet Connect d'Air Liquide, où les consommations électriques des logiciels de pilotage à distance sont négligeables par rapport aux consommations énergétiques de la production de gaz industriels ;
- c. Parfois plus conséquents, toujours au regard des impacts des procédés industriels eux-mêmes. Le bilan environnemental de certaines technologies est ainsi plus incertain, notamment celui des technologies qui impliquent le déploiement d'équipements nouveaux, comme des capteurs (cas n°3 d'optimisation des procédés industriels), des cobots (cas n°6 de cobotique) ou des puces RFID (cas n°8 de traçabilité des flux de produits). Pour ces technologies-là, il existe un arbitrage entre :
 - i. Les impacts environnementaux directs, qui représentent un préjudice certain (consommation d'énergie, épuisement de ressources fossiles, etc.) ;
 - ii. Les bénéfices environnementaux, qui ne sont que potentiels (sur les mêmes indicateurs environnementaux ou d'autres).

4.3.3. Enseignements différenciés pour les deux catégories de cas d'école

En règle générale, on peut affirmer que :

- **Les cas d'école à périmètre restreint** mobilisent des technologies numériques qui optimisent le processus de production (conduite fine des procédés). Ce sont eux qui portent les impacts économiques et environnementaux les plus forts ;
- **Les cas d'école à périmètre étendu** mobilisent des technologies numériques qui ne jouent pas directement sur le processus de production (simple extraction de données). En revanche, dans la mesure où ces technologies s'étendent à l'ensemble de l'entreprise, ce sont ces cas d'école qui portent les impacts sociaux les plus forts (exception faite du cas « cobotique »).

Cas d'école à périmètre restreint

Les cas d'école à périmètre restreint sont ceux dont les impacts économiques et environnementaux sont les plus significatifs et les plus facilement déterminables.

Impacts économiques. Dans la mesure où le numérique est mis en place dans l'industrie d'abord pour gagner en productivité, les impacts économiques les mieux connus sont à ce niveau-là, et peuvent être significatifs. Le meilleur cas d'école illustrant ces gains est le cas d'école n°2 (personnalisation de masse de la chaîne de production) : ce cas suppose une forte automatisation qui se traduit par des gains importants de productivité.

- Dans l'entreprise Georges Pernoud, qui produit des moules industriels, l'automatisation / personnalisation a permis des gains de productivité de 30 % entre 2006 et 2013 ;
- Le constructeur automobile Ford a optimisé une de ses chaînes de production pour réduire le temps de développement des modèles de 40 %, tout en permettant une personnalisation accrue ;

³² Les consommations indirectes comme celles des centres de données (*data centres*) n'entrent pas dans les impacts environnementaux directs.

- Enfin l'entreprise allemande Optima, qui produit des bouteilles de parfum individuellement identifiables, a doublé sa productivité en passant de 60 à 120 pièces par minute en mettant en place des chaînes de production personnalisées.

Impacts environnementaux. La baisse des consommations énergétiques est parfois significative (en lien avec les gains de productivité), parfois plus difficile à quantifier ou incertaine (fabrication additive sable par exemple).

Pour les cas d'école à périmètre restreint, les impacts et les enseignements peuvent différer légèrement selon les secteurs, mais ils restent comparables.

Cas d'école à périmètre étendu

Les cas d'école à périmètre étendu sont ceux dont les impacts sociaux sont les plus significatifs (voir l'analyse précédente), exception faite du cas « cobotique ».

Par nature, les technologies des cas d'école à périmètre étendu sont typiquement celles de l'industrie du futur, donc transverses :

- Aux différentes fonctions de l'entreprise : les impacts vont au-delà de l'étape de production (et pour cette raison sont difficiles à isoler) ;
- A toutes les étapes du cycle de vie (plus systématiquement que pour les cas d'école à périmètre restreint).

Les impacts économiques et environnementaux sont donc plus difficiles à évaluer pour les cas d'école à périmètre étendu. Un bon exemple est le cas n°5, *business intelligence*, dont les impacts restent encore indéterminés. Autrement dit, certains grands groupes industriels mettent en place des solutions de *business intelligence*, souvent avec l'aide voire sur l'insistance des principaux fournisseurs de ces solutions (SAP, Siemens, Schneider, etc.) ; mais à date il n'est pas certain que ces outils permettront une optimisation des coûts ou une réduction des impacts environnementaux. Les entreprises sont encore dans une phase d'expérimentation et n'ont pas de résultat tangible à date.

Pour les cas d'école à périmètre étendu, les enseignements à tirer sont plutôt spécifiques à chaque secteur. Par exemple, la simulation numérique 4.0 n'a pas le même usage selon les secteurs :

- Dans l'industrie chimique, elle peut servir à modéliser une réaction, ou l'ensemble d'un site de production (pour assurer la continuité de la production – cas de Solvay à Chalampé) ;
- Dans l'industrie automobile, elle peut servir à modéliser une chaîne de production pour optimiser les cadences (cas de Volkswagen à Wolfsburg) ;
- Dans l'industrie pétrolière, elle peut servir à former les opérateurs d'une plateforme à une intervention dangereuse (cas de Total en Angola).

Ainsi le seul point commun est technologique, au sens d'exploitation d'une puissance de calcul pour modélisation informatique.

4.3.4. Points de vigilance pour l'ensemble des cas d'école

Impacts sur l'emploi

Il existe une tendance lourde à la baisse des effectifs dans l'industrie française, dans laquelle le numérique joue un rôle paradoxal. D'un côté, le numérique peut être dans certains secteurs un facteur de relocalisation des emplois : cette promesse en tout cas est faite par les promoteurs de l'industrie du futur, à commencer par les pouvoirs publics. Le numérique comme facteur du maintien de l'emploi est une affirmation qui ressort également de plusieurs cas d'école :

- De la part de PME :
 - Georges Pernoud (cas d'école n°2 – personnalisation de masse). Les quatre robots installés entre 2006 et 2017 ont permis un gain global de productivité de l'ordre de 30 %, pour un

- nombre de salarié passé de 30 à 100. Ainsi les gains de productivité ont-ils permis de maintenir le site de production et de développer l'emploi en France ;
- La fonderie Boutté (cas d'école n°7 – fabrication additive sable). L'investissement sur la machine de Fabrication Additive Sable (FAS) a permis de sauver l'entreprise. Le marché de la fonderie est extrêmement concurrentiel. Boutté s'est servi de la machine de FAS pour repositionner son activité ;
- De la part de grands groupes :
 - Faurecia (cas d'école n°5 – *business intelligence*). Faurecia intègre différentes solutions évoquées dans les autres cas d'école pour concevoir ce qu'ils appellent une « Entreprise Digitale ». Le premier déploiement de ce modèle l'usine numérique a eu lieu à Columbus, aux Etats Unis, pour ensuite être généralisé aux 77 usines du groupe d'ici fin 2017 ;
 - Safran (cas d'école n°6 – cobotique). L'investissement réalisé dans la prévention des risques en général, et en particulier pour la mise en place de cobot, permet pour 1 € investi de générer des gains sur le long terme estimés à 2,20 € ;
- Dans les deux cas, ces investissements ont permis aux entreprises, selon elles, de rester compétitives au niveau international et ainsi de maintenir les emplois.

Mais d'autre part, les nouvelles technologies (numériques) sont une cause directe de gains de productivité, ce qui signifie : soit des suppressions de postes à volume produit constant, soit un maintien des postes existants pour une augmentation du volume produit. L'automatisation des tâches est permise avant tout par le numérique, même s'il est difficile d'isoler la part exacte du numérique dans les évolutions d'effectifs.

Inversement, certains acteurs interrogés (comme la SNCF – cas d'école n°3) déclarent que la tendance à la baisse des effectifs est générale, elle est indépendante de la mise en place de solutions numériques. Or pour effectuer le même travail avec moins de personnel, il est nécessaire de mettre en place de nouvelles solutions : ainsi le numérique est-il une conséquence, et non une cause de la baisse des effectifs.

Cause ou conséquence, des exemples existent dans tous les secteurs de l'industrie, qui montrent une corrélation forte entre le développement du numérique et la réduction de l'emploi industriel. On peut citer notamment les secteurs suivants :

- L'industrie chimique, où il y a eu une forte réduction des effectifs depuis les années 1980, dans l'objectif de réduire les coûts et rester compétitif par rapport aux concurrents étrangers. Un groupe comme Solvay a vu son chiffre d'affaires passer de 5 à 12 milliards d'euros entre les années 1980 et aujourd'hui, le nombre d'employés diminuant quant à lui de 45 000 à 12 000. Sur un des sites du groupe, depuis les années 1980 et pour un même niveau de production, les employés sont passés de 3 000 à 800 personnes ;
- En cimenteries, l'ordre de grandeur est d'un facteur 10 : les effectifs sont passés d'environ 300 à une trentaine de salariés par site, à volume produit équivalent.

Les suppressions de postes sont moins importantes quand :

- Le secteur ou l'entreprise sont dynamiques, connaissent une phase de croissance. Le cuisiniste Schmidt, par exemple, explique que : « En 2009, nous avons inauguré une usine de 23 000 mètres carrés qui employait 200 personnes, dont 70 dans les ateliers et le reste en support. Celle que nous sommes en train de construire actuellement emploiera 120 salariés seulement, pour un volume de production comparable. Dans les entreprises qui n'ont pas la chance de connaître la même croissance, les machines ont tendance à remplacer les hommes »³³ ;
- La transformation numérique ne touche pas le cœur du procédé industriel. Air Liquide par exemple, au cours de son projet « Connect » de pilotage à distance des sites industriels, a associé les quelques suppressions de postes sur les sites à des mobilités, des créations de postes en centrale ou des départs non remplacés.

Enfin, il faut noter également que les suppressions de postes ciblent prioritairement les opérateurs dont la sécurité au travail est la plus menacée : ce processus est à l'œuvre depuis plusieurs décennies dans l'industrie lourde. Ainsi dans l'industrie chimique, dans le secteur forges et fonderie ainsi que dans d'autres industries de première transformation, toutes les opérations dangereuses ont été en grande partie robotisées.

³³ Anne Leitzgen [Présidente du Groupe Schmidt] (2016), Automatiser en renforçant le rôle de l'homme

Certes, le numérique n'est qu'un des facteurs explicatifs du recul de l'emploi industriel : il n'est pas le seul et il est difficile d'isoler sa part exacte. Mais d'un point de vue quantitatif, le bilan du numérique semble globalement défavorable aux pays industrialisés. Et dans la dynamique mondiale de l'emploi, le numérique ne tend pas seulement à réduire l'emploi industriel dans les pays industrialisés (en contribuant fortement aux gains de productivité réalisés par les entreprises) ; il accélère aussi le développement de l'emploi industriel dans les pays à faibles coûts du travail. En effet, la capacité actuelle d'échanger de grandes quantités d'informations d'un bout à l'autre du monde à un coût très faible a rendu possible la délocalisation des activités industrielles des pays développés vers les pays en développement.

Si le numérique a ainsi contribué à un mouvement de balancier de l'emploi industriel entre les pays développés et les pays en développement, il se pourrait maintenant qu'il se traduise, d'ici à 2020 puis au-delà, par une perte nette d'emplois industriels au niveau mondial. Selon le rapport du World Economic Forum publié en janvier 2016³⁴, « les tendances actuelles pourraient aboutir à un impact net de plus de 5,1 millions d'emplois supprimés sur la période 2015-2020 ». Selon les calculs de l'étude, 7,1 millions d'emplois pourraient être perdus entre 2015 et 2020, dont près de 4,8 millions dans le secteur tertiaire (emplois de bureau et administratifs) et 1,6 million dans l'industrie (fabrication et production) ; près de 2 millions d'emplois seraient créés grâce au numérique dans divers secteurs économiques, au rang desquels l'industrie ne figure pas.

Impacts indirects sur l'environnement

Effets rebond

Si les impacts directs des technologies numériques déployées sont parfois connus ou peuvent être estimés (voir ci-dessus), les effets rebond en revanche sont systématiquement inconnus et très difficiles à évaluer. On appelle « effet rebond » les impacts environnementaux de 2^e ou 3^e ordre des technologies évaluées. Ces effets rebond peuvent être :

- **Directs** : apparaissent lorsqu'une baisse du coût de l'énergie induit des réductions de prix qui déclenchent une augmentation de la demande pour le bien coûtant le moins cher ;
- **Indirects** : quand une ressource est utilisée de manière plus efficace et que son prix descend, les ressources financières dégagées induisent la consommation d'autres produits ;
- **Structurels** : apparaissent lorsque la baisse des prix de l'énergie induit une réduction des prix des biens intermédiaires et finaux dans toute l'économie, et provoquent des changements structurels dans les modes de production et les habitudes de consommation.

Il n'existe pas d'étude sur les effets rebond des technologies numériques dans l'industrie, ni d'exemples issus des cas d'école où ces effets rebond seraient évalués (même approximativement).

Relativité des bénéfices environnementaux

Ceci étant, on peut noter que les bénéfices environnementaux présentés par certaines des technologies numériques étudiées sont toujours relatifs. En effet, l'étude ne compte que des cas d'école qui s'inscrivent dans un modèle de croissance de la production : les entreprises étudiées produisent autant avec moins, ou plus avec autant, mais elles ne produisent pas moins. Dans de nombreux cas, les rendements sont améliorés et les consommations unitaires de matière ou d'énergie sont réduites, mais en valeur absolue ces consommations continuent à progresser. Autrement dit, les gains de productivité (illustrés notamment par les cas d'école n°2 et n°5 – voir ci-dessus) s'accompagnent toujours d'une hausse des volumes produits. Il n'y a pas de « changement de modèle » de ce point de vue-là.

³⁴ World Economic Forum (2016), The Future of Jobs. Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution

5. Recommandations : concilier transition numérique et transition écologique, au cœur de l'usine du futur

L'analyse des cas d'école a renforcé les grands enseignements de l'analyse bibliographique. Aujourd'hui, il est clair que le lien entre transition numérique et transition écologique et énergétique dans l'industrie est largement insuffisant, et qu'il n'existe pas de réelle dynamique pour le développer, malgré une bonne compréhension des enjeux par les acteurs concernés. Pour faire évoluer cette situation et construire le chemin vers une usine du futur responsable des points de vue environnementaux et sociaux, des recommandations sont proposées. Une première version de ces recommandations a été présentée le 5 juillet 2017 à Paris lors d'un atelier co-organisé par l'ADEME, la FING, Mines ParisTech, TelecomParisTech et Deloitte, ce qui a permis d'échanger avec les parties prenantes (notamment des industriels) et d'enrichir les leviers identifiés afin de faire converger industrie du futur, transition numérique et transition écologique et énergétique.

Les recommandations pour concilier transition numérique et transition énergétique et écologique au cœur de l'usine du futur sont réparties selon trois axes prioritaires :

- **SAVOIR. Comblar le manque actuel de connaissances et de données** sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques au sein de l'industrie (cf. section 5.1) :
 - ➔ Recommandation n°1 - Proposer des indicateurs simples, à destination des industriels, pour l'évaluation environnementale et sociale des technologies numériques dans l'industrie ;
 - ➔ Recommandation n°2 - Développer la collecte des données environnementales et sociales des technologies numériques dans l'industrie, en s'appuyant notamment sur les acteurs du numérique (lancement de travaux dédiés de type ACV ou monographie selon le type de technologie concernée, etc.) ;
 - ➔ Recommandation n°3 - Favoriser la capitalisation des connaissances sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques de l'usine du futur au sein d'un centre de ressources regroupant données et retours d'expérience ;
- **VOULOIR. Faciliter l'engagement des acteurs du numérique** et des industriels dans une transition numérique responsable (cf. section 5.2) :
 - ➔ Recommandation n°4 - Renforcer l'expertise environnementale au sein des acteurs de l'Industrie du Futur, notamment l'Alliance Industrie du Futur ;
 - ➔ Recommandation n°5 – Impliquer davantage les acteurs du numérique dans l'amélioration de la performance environnementale de leur produits et services ;
 - ➔ Recommandation n°6 - Accompagner la mutation des emplois d'aujourd'hui et de demain pour associer enjeux environnementaux et enjeux numériques.
- **POUVOIR. Adapter les règles de financement de l'usine du futur** en corrélant transition numérique et transition écologique de manière plus systématique (cf. section 5.3) :
 - ➔ Recommandation n°7 - Faire évoluer les outils financiers existants, notamment en intégrant des critères d'éco-conditionnalité aux aides publiques à la transition numérique dans l'industrie.

Enfin, une dernière recommandation traite d'un enjeu transversal essentiel (cf. section 5.4), pour :

- À court et moyen terme, impliquer un nombre suffisant d'acteurs - fournisseurs de technologies, industriels, financeurs, académiques - dans la transition vers une usine du futur responsable ;
- À plus long terme, pérenniser et développer les résultats obtenus, et accompagner une transformation profonde des modèles économiques et de production des industriels, condition nécessaire pour assurer une réelle adéquation entre transition numérique (industrielle) et transition écologique et énergétique.
 - ➔ Recommandation n°9 - Articuler les ambitions nationales et européennes à court, moyen et long terme sur les sujets du numérique et de la transition énergétique et écologique.

5.1. SAVOIR. Comblent le manque actuel de connaissances et de données sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques au sein de l'industrie

La question du savoir est centrale. Sans données, sans connaissances plus précises, il est impossible d'orienter le développement de l'usine du futur sur un chemin vertueux. Il est également impossible de faire de l'argument écologique, social, un élément de différenciation pour les entreprises.

Or aujourd'hui, les connaissances disponibles sont peu nombreuses et disséminées. Pour améliorer cette situation, plusieurs axes de travail complémentaires sont à explorer pour :

- Favoriser l'amélioration des connaissances ;
- Capter l'information existante ; et
- Capitaliser et valoriser l'ensemble de ce savoir.

Afin de pérenniser cette approche, c'est une véritable culture de la donnée qu'il faudrait développer auprès des industriels.

Recommandation n° 1 Proposer des indicateurs simples, à destination des industriels, pour l'évaluation environnementale et sociale des technologies numériques dans l'industrie

Nous avons vu précédemment que de telles évaluations n'existent pas (ou presque) pour les technologies concernées. Un prérequis indispensable consiste donc à définir leur cadre méthodologique. Il s'agirait notamment d'identifier **des indicateurs simples, à destination des industriels qui implémentent des solutions numériques**, sur certains sujets prioritaires tels que l'efficacité énergétique, l'efficacité matière, l'emploi, la santé et la sécurité des employés. Ces indicateurs :

- Pourraient être adaptés à partir d'indicateurs de référentiels classiques tels que la *Global Reporting Initiative* (GRI) ou le programme *World Class Manufacturing* (WCM). Pour les indicateurs sociaux, l'ADEME pourrait s'appuyer sur l'expertise d'acteurs tels que l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) ou l'Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail (ANACT) ;
- Permettraient de mesurer les impacts environnementaux des technologies numériques déjà en place dans les usines (approche *ex-post*), ainsi que les impacts des technologies dans lesquelles l'entreprise pourrait investir (approche *ex-ante*). Au-delà de l'accès aux financements, ils seraient le socle de nouveaux outils d'aide à la décision, dans le cadre d'un investissement industriel.

Une consultation auprès des industriels, de différentes tailles et de différents sous-secteurs, serait nécessaire afin de comprendre les données et indicateurs déjà collectés et analysés, ceci afin d'une part de se baser autant que possible sur des éléments déjà disponibles auprès des entreprises, et d'autre part de suggérer « l'abandon » de certains indicateurs sociaux et environnementaux qui ne sont pas pertinents ou redondants³⁵.

A noter que certaines recommandations élaborées dans le cadre d'une précédente étude pour l'ADEME sur le « Potentiel de Contribution du Numérique à la Réduction des Impacts Environnementaux »³⁶ sont valables pour le secteur industriel. Il s'agit notamment de la nécessité de développer un cadre méthodologique d'évaluation des impacts environnementaux propre aux technologies du numérique. Pour accélérer le travail de recherche nécessaire à ce pas méthodologique, une mutualisation des travaux serait indispensable entre industriels, via les fédérations et syndicats professionnels (GIMELEC, etc.).

Recommandation n° 2 – Développer la collecte des données environnementales et sociales des technologies numériques dans l'industrie, en s'appuyant notamment sur les acteurs du numérique (lancement de travaux dédiés de type ACV ou monographie selon le type de technologie concernée, etc.)

Il s'agit bien de systématiser le recours à l'analyse environnementale (ex-ante et ex-post) de l'implémentation d'une nouvelle technologie numérique au sein d'une industrie. Cela nécessite un effort de sensibilisation et de communication, une coordination de l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, et le développement d'un modèle qui permette simultanément de préserver la confidentialité de l'information et la qualité de l'analyse qui en est faite.

Plusieurs pistes peuvent être envisagées, avec des objectifs différents mais complémentaires.

³⁵ Par exemple, l'indicateur de productivité de la main-d'œuvre relève d'une logique productiviste, qui méconnaît ou néglige les impacts sociaux ou environnementaux qui y sont pourtant liés.

³⁶ <http://www.ademe.fr/potentiel-contribution-numerique-a-reduction-impacts-environnementaux>

En ce qui concerne les données existantes, **les projets financés par de l'argent public** pourraient constituer une première source d'information, en introduisant par exemple des clauses de mise à disposition des données (sous conditions de confidentialité). Un premier exemple consisterait à analyser les projets accompagnés dans le cadre de l'Appel à Projets « Industrie du Futur » lancé par BPI France au sein de l'action « Projets industriels d'avenir » (PIAVE) du Programme d'Investissements d'Avenir (clôture le 30 juin 2016).

Une autre source d'information réside dans **les projets pour lesquels les acteurs du numérique (également appelés entreprises de l'offre** tels que les prestataires de services et solutions à destination des industriels comme Actemium, Fives, Rockwell, SAP, Schneider Electric, Siemens, etc.) **disposent des fiches techniques**, publiques ou non.

En ce qui concerne **les technologies « à périmètre restreint »**, telles que la cobotique, la fabrication additive ou la personnalisation de la chaîne de production, il serait important de **financer la réalisation d'études d'impacts environnementaux**, en incluant l'analyse des effets rebonds et en croisant les résultats avec une analyse socio-économique, en partenariat avec les acteurs du numérique. En effet, ces technologies sont celles qui sont les plus faciles à délimiter, dans le cadre d'une analyse de cycle de vie (ACV).

Pour ce type de projet, les ACV consécutives³⁷ semblent plus appropriées que les ACV attributionnelles³⁸, dont la définition du périmètre reste complexe pour les technologies numériques.

En ce qui concerne les **technologies « à périmètre étendu »**, telles que la simulation numérique ou le *business intelligence*, il semblerait nécessaire, dans un premier temps, d'**approfondir leur étude sous forme de monographie dédiée**, au travers d'un partenariat privilégié avec une entreprise industrielle. Ceci permettrait au commanditaire de l'étude d'avoir accès à certaines données aujourd'hui confidentielles, ou bien d'en mesurer d'autres. De nombreux entretiens seraient menés à tous les niveaux de l'entreprise, pour affiner les impacts (qualitatifs) du numérique au sein de l'entreprise.

Dans les deux cas, une étape préalable consisterait à prioriser les technologies à étudier, afin de cibler les cas d'études les plus prometteurs en termes de bénéfices environnementaux, ou pour qui les impacts négatifs sembleraient a priori importants, et qui permettraient de travailler avec un maximum de données.

Afin de valoriser les résultats obtenus, les pouvoirs publics pourraient **soutenir la mise en place de démonstrateurs**, vitrines d'une usine du futur vertueuse, dont les outils numériques seraient au service de la transition écologique et énergétique. Il est possible pour cela de s'appuyer sur l'Innovation Center for Operations à Saclay, qui sert de démonstrateur pour les technologies de l'usine du futur. Cela pourrait passer par exemple par le lancement d'un appel à projet dédié.

Bien entendu, l'émergence et le développement de cette culture de la donnée sont liés à la capacité de projection des industriels, dans la perspective d'une double valorisation de la donnée : à des fins industrielles (via une remontée stratégique des sujets de développement durable) et commerciales (via une volonté de différenciation des acteurs de l'offre technologique).

Cela implique enfin, en bout de chaîne, que le client/consommateur suive cette évolution, qu'il soit sensibilisé à l'impact des biens et services et qu'il dispose de marges de manœuvre pour influencer, à son échelle, les choix des industriels.

Recommandation n° 3 – Favoriser la capitalisation des connaissances sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques de l'usine du futur au sein d'un centre de ressources regroupant données et retours d'expérience

Dans l'optique d'une amélioration rapide de l'état des connaissances, la capitalisation et l'exploitation des données doivent être facilités.

Un premier pas en ce sens consisterait à **favoriser l'émergence d'un centre de ressources regroupant données et retours d'expérience**. Il s'agirait de :

- Créer un modèle permettant de collecter, analyser et partager cette information ;
- Garantir l'anonymisation de toute donnée sensible et la confidentialité de leur analyse ;

³⁷ Cette approche vise à évaluer les conséquences environnementales directement et indirectement attribuables au système étudié. Ce type d'approche est aussi appelé « basée sur le marché » ou « orientée effets ». Elle permet notamment de considérer les effets environnementaux sur l'économie liés à une décision, selon un périmètre plus ou moins large (par exemple : augmentation ou diminution marginale du fonctionnement de certains systèmes industriels liés au changement de stratégie d'une entreprise ou modifications structurelles du marché et de l'économie liées à une décision politique).

³⁸ Évaluation environnementale basée sur une approche descriptive du système étudié, tel qu'il est prévu de fonctionner. Ce type d'approche ne considère pas (ou peu) les interactions et les conséquences directes et indirectes que peut engendrer le système étudié sur le fonctionnement d'autres systèmes.

- Concevoir et réaliser les outils recensant les bonnes pratiques et les moyens de mise en œuvre (via la réalisation de fiches projets, et une plateforme web par exemple).

L'Alliance Industrie du Futur (AIF) a déjà labellisé de nombreuses initiatives estampillées « Vitrines Usine du futur » (20 entreprises labellisées en 2016), auxquelles il manque cependant une rubrique sur les impacts environnementaux. Par ailleurs l'AIF a mis en ligne courant 2017 une plateforme cartographique référençant les entreprises ayant mis en œuvre des projets relevant de l'usine du futur : <http://exemples-aif.industrie-dufutur.org/> . L'Alliance Industrie du Futur semblerait la structure la plus légitime pour organiser ce recueil, et le valoriser avec l'appui de l'ADEME.

Des chercheurs, notamment académiques, pourraient être associés afin de mener a posteriori des analyses (*deep learning*) et faire émerger des modèles et des recommandations sur la collecte et la structuration des données à venir.

5.2. VOULOIR. Faciliter l'engagement des acteurs du numérique et des industriels dans une transition numérique responsable

Recommandation n° 4 – Renforcer l'expertise environnementale au sein des acteurs de l'Industrie du Futur, notamment l'Alliance Industrie du Futur

Aujourd'hui, l'ADEME, opérateur de la Transition Énergétique, est peu présente voire quasi absente des principales structures qui portent le développement de l'usine du futur.

Un élargissement des parties prenantes de **l'Alliance Industrie du Futur à des experts environnement, dont l'ADEME**, aurait pour objectifs de faire entrer les enjeux des transitions écologique et énergétique dans les débats, d'influer sur les orientations stratégiques, voire de créer un groupe de travail dédié. L'Alliance Industrie du Futur ayant un rôle de labellisation des vitrines Usine du Futur, un autre axe de travail serait de travailler à l'inclusion dans la labellisation de ces vitrines de critères environnementaux, permettant de mettre en avant de nouvelles vitrines conciliant numérique et environnement avec un engagement de communication sur les coûts, le TRI (Temps de Retour sur Investissement), l'emploi, les consommations additionnelles et impacts indirects, etc.

Une meilleure formation et sensibilisation des chargés de mission « entreprises », au sein d'organismes de soutien à dimension régionale, permettrait d'aider les entreprises, notamment les PME/TPE, à mieux intégrer les enjeux environnementaux et sociaux au moment de leur mutation numérique. Il conviendrait par exemple d'intégrer les enjeux environnementaux dans des dispositifs de soutien régionaux tels que RobotStartPME, les appels à projets régionaux de BPI dans le cadre du Programme Investissements d'Avenir 3 ou encore les aides Usine du Futur des Conseils Régionaux.

Recommandation n° 5 – Impliquer davantage les acteurs du numérique dans l'amélioration de la performance environnementale de leur produits et services

Les pouvoirs publics pourraient accompagner les acteurs de l'offre technologique numérique dans leurs efforts pour réduire leur empreinte environnementale et augmenter la durée d'usage de leurs produits. Les fournisseurs de solutions numériques disposent en effet de leviers importants pour une meilleure prise en compte des impacts environnementaux - directs et indirects - de leurs produits et services, sur l'ensemble du cycle de vie.

Il serait également positif **d'associer ces acteurs, notamment via le Comité Stratégique de la Filière Numérique, dans l'ensemble des recommandations concernant l'amélioration de l'état des connaissances**. Cette implication leur permettrait par ailleurs de construire un argumentaire commercial différenciant, autour de ces aspects.

On pourrait par exemple s'inspirer de ce qui a été fait dans le domaine de la ville du futur (*smart city, smart grid*) :

- Dans une logique d'émergence d'une connaissance collective, transverse, au niveau national, territorial, et des filières ;
- En impliquant l'ensemble de la chaîne de valeur, et notamment les fournisseurs de solutions numériques innovantes, dans une perspective de différenciation ;

- Avec l'appui de réglementations favorisant la prise en compte des aspects environnementaux et sociaux.

Recommandation n° 6 – Accompagner la mutation des emplois d'aujourd'hui et de demain pour associer enjeux environnementaux et enjeux numériques

Le secteur industriel peine à recruter suffisamment de techniciens et d'ingénieurs formés aux nouveaux outils numériques, même en sortie de cursus. Il est donc important **d'encourager et de soutenir l'ensemble des initiatives**, publiques comme privées, visant à **renforcer l'apprentissage et la formation au numérique** des nouveaux entrants sur le marché de l'emploi (métiers de programmation de robots par exemple, ou de *data analysts*). Et bien sûr, dans les programmes traitant du numérique, les établissements d'enseignement supérieurs doivent être encouragés à **intégrer des notions de mesures d'impacts** sociaux et environnementaux.

En termes de formation continue, de la même manière, il s'agit d'apporter un support et une expertise technique aux centres de formation, afin d'**inclure un volet environnemental dans la formation des opérateurs de l'usine du futur**, via une gestion prévisionnelle des compétences.

A travers ces deux volets qui traitent de la formation des futurs salariés de l'usine du futur, quel que soit leur niveau hiérarchique, c'est **la question du traitement de la donnée environnementale et sociale** qui est posée. Comme nous l'avons vu dans l'analyse des cas d'écoles, l'un des enjeux clé pour les industriels concerne **la continuité de la donnée**, tout au long du cycle de vie, au-delà de l'étape de production. Cette continuité nécessite l'implication et la coordination de fonctions variées au sein des sites industriels, et en liaison avec les acteurs de la chaîne de valeur. Or la communication et la transmission d'informations entre services est aujourd'hui loin d'être optimale. Avec la multiplication rapide des données disponibles, il va donc devenir de plus en plus important que l'ensemble des salariés soient correctement **formés à l'extraction, l'analyse et à la communication de ces données**.

Enfin, en termes d'accompagnement direct des entreprises vis-à-vis de ces évolutions, l'ADEME pourra être force de propositions quant à l'**ajout d'une dimension environnementale et sociale au sein des dispositifs de soutien existants**, tels que les référents Usine du futur ou les référents numériques PME des conseils régionaux ou des CCI, et vice versa d'instiller du numérique dans des formations de type référent énergie dans l'industrie, référent ISO 50 001, etc.

5.3. POUVOIR. Adapter les règles de financement de l'usine du futur en corrélant transition numérique et transition écologique de manière plus systématique

Recommandation n° 7 – Faire évoluer les outils financiers existants, notamment en intégrant des critères d'éco-conditionnalité aux aides publiques à l'investissement industriel

Pour faciliter la mise en œuvre des recommandations précédentes, et mieux intégrer les enjeux de la transition écologique et énergétique dans la mutation numérique de l'industrie, la mise en œuvre de mécanismes financiers incitatifs est nécessaire. Or les industriels engagés dans une transition numérique disposent de nombreux modes de financement via des organismes publics (prêts, subventions...), il s'agirait donc de ne pas partir d'une feuille blanche, mais de se greffer en priorité sur l'existant, en y intégrant des critères d'éco-conditionnalité.

Une première étape consisterait à **cartographier les dispositifs existants de soutien nationaux et régionaux à la digitalisation de l'Industrie**, puis d'accompagner les financeurs dans la définition de ces critères d'éco-conditionnalité.

Concernant les dispositifs de financement propres à l'ADEME, il pourrait par exemple être mis en avant de manière plus explicite les technologies numériques dans les appels à projets dédiés à l'industrie (exemple : appel à projets Investissements d'Avenir Industrie éco-efficente), ceci afin de soutenir des projets permettant d'allier à la fois transition énergétique et écologique et transition numérique.

Enfin, une autre piste serait soit de **créer un accélérateur dédié à la thématique de la convergence numérique / environnement**, sur le modèle de l'incubateur au service de la loi de transition énergétique Green Tech verte lancé en septembre 2016, soit de s'adosser à cet incubateur en lui ajoutant un volet usine du futur. L'idée serait de favoriser l'émergence de startups qui, grâce à de nouvelles solutions, de nouveaux usages numériques permettraient :

- D'accélérer la mutation des industriels ;

- De faire émerger des pépites françaises susceptibles de s'imposer face à la concurrence internationale.

5.4. Relever les défis stratégiques pour construire une usine du futur responsable et durable

Recommandation n° 8 – Articuler les ambitions nationales et européennes à court, moyen et long terme sur les sujets du numérique et de la transition écologique

Les recommandations opérationnelles décrites précédemment permettent d'imaginer les premiers pas vers des technologies numériques industrielles mieux décrites d'un point de vue environnemental et social. Leur mise en œuvre est une condition nécessaire pour commencer à se projeter vers une usine du futur responsable. Mais ce n'est pas une condition suffisante.

Toutefois, l'absence de corrélation actuelle entre transition numérique et transition écologique et énergétique, dans le secteur industriel, interroge particulièrement, au regard des impacts environnementaux et sociaux de ce secteur. En toile de fond se pose la question du modèle économique de notre industrie, et de la volonté des différents acteurs impliqués - industriels et institutionnels notamment - de faire évoluer ce modèle.

En effet, l'industrie s'est toujours transformée avec la volonté d'améliorer sa productivité, et l'arrivée des technologies numériques n'échappe pas à la règle. Si certaines considérations sociales sont parfois intégrées, notamment en termes de sécurité des travailleurs, la rentabilité économique continue de primer sur les enjeux environnementaux et sociaux. Cet aspect est renforcé par la rapidité avec laquelle s'opère la transition numérique.

Les externalités environnementales et sociales - positives comme négatives - liées à la transition numérique sont quant à elles totalement éludées. Au niveau des institutions, les récents textes de loi sur la transition écologique sont pour le moins discrets sur le volet industriel, et il n'existe aucun lien entre les projets de développement de l'usine du futur et de transition écologique.

Pour faire évoluer cette situation de manière positive, et créer un effet de levier fort pour la mise en œuvre des recommandations de cette étude, plusieurs orientations sont envisageables :

- Faire de l'usine du futur un levier de la transition énergétique, en incitant à une diminution de ses externalités négatives directes et indirectes (les technologies développées peuvent avoir un impact positif en étant utilisées dans le secteur des énergies renouvelables par exemple, ou négatif si l'on considère les consommations énergétiques de ces outils et les impacts de leur production). Cette orientation est fortement liée à la capacité des pouvoirs publics à inciter les industriels à moins consommer, en jouant notamment sur le prix de l'énergie ;
- Inclure les enjeux environnementaux et sociaux de la transition numérique de l'industrie au cœur des futures législations et réglementations écologiques et énergétiques, pour aller plus loin que les obligations actuelles ;
- Développer de nouveaux modèles économiques en lien avec l'économie circulaire, bénéficiant des nouvelles technologies numériques pour leur mise en œuvre (économie de fonctionnalité, écologie industrielle et territoriale) ;
- Développer une approche de monétarisation des externalités des activités industrielles, pour une meilleure prise en compte de l'impact du numérique sur ces externalités.

Le tableau de synthèse ci-dessous reprend les dix recommandations de cette étude, en les classant selon deux dimensions :

- Les recommandations à court terme, qui souvent insèrent l'action des pouvoirs publics dans des dispositifs existants ;
- Les recommandations à long terme, qui impliquent généralement de créer de nouveaux dispositifs.

Tableau 17 : Synthèse des recommandations de l'étude

	Recommandations de court terme	Recommandations de long terme
SAVOIR. Comblé le manque actuel de connaissances et de données sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques au sein de l'industrie	<ul style="list-style-type: none"> Recommandation n° 1 – Proposer des indicateurs simples, à destination des industriels, pour l'évaluation environnementale et sociale des technologies numériques dans l'industrie Recommandation n° 2 – Développer la collecte des données environnementales et sociales des technologies numériques dans l'industrie, en s'appuyant notamment sur les acteurs du numérique (lancement de travaux dédiés de type ACV ou monographie selon le type de technologie concernée, etc.) Recommandation n° 3 – Favoriser la capitalisation des connaissances sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques de l'usine du futur au sein d'un centre de ressources regroupant données et retours d'expérience 	<ul style="list-style-type: none">
VOULOIR. Faciliter l'engagement des entreprises de l'offre et les industriels dans une transition numérique responsable	<ul style="list-style-type: none"> Recommandation n° 4 – Intégrer l'expertise environnementale au sein des acteurs de l'Industrie du Futur, notamment l'alliance Industrie du Futur 	<ul style="list-style-type: none"> Recommandation n° 5 – Impliquer davantage les acteurs du numérique dans l'amélioration de la performance environnementale de leur produits et services Recommandation n° 6 – Accompagner la mutation des emplois d'aujourd'hui et de demain
POUVOIR. Adapter les règles de financement de l'usine du futur en corrélant transition numérique et transition écologique de manière plus systématique	<ul style="list-style-type: none"> Recommandation n° 7 – Favoriser l'évolution des outils financiers existants, notamment en intégrant des critères d'éco-conditionnalité aux aides publiques à la transition numérique de l'industrie 	<ul style="list-style-type: none">
Transverse. Relever les défis stratégiques pour construire une usine du futur responsable et durable	Recommandation n°8 – Articuler les ambitions nationales et européennes à court, moyen et long terme sur les sujets du numérique et de la transition écologique	

ANNEXES

ANNEXE I Bibliographie

I.1 Revue technique

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
1	Quelle politique industrielle dans la mondialisation ? dans Les entreprises dans la mondialisation, O. Montel-Dumont (Dir.), Cahiers français n°365, La documentation Française, pp. 56-62.	S. Guillou, L. Nesta	2011
2	Le recul de l'emploi industriel en France entre 1980 et 2007. Ampleur et principaux déterminants : un état des lieux, Economie et statistiques, n°438-440, 2010, pp. 273-296.	L. Demmou,	2010
3	Manufuture. A vision for 2020	Report of the high level group, European Commission	2004
4	Key Enabling Technologies	Final report, High Level Group, European Commission	2011
5	Etats Généraux de l'Industrie	DEHECQ Jean François	2010
6	Futurprod - Les systèmes de production du futur	D. Brissaud, Y. Frein, V. Rocchi	2013
7	La nouvelle France industrielle. Présentation des feuilles de route des 34 plans de la nouvelle France industrielle	Ministère du Redressement Productif	2013
8	What tracks for sustainable production systems in Europe?, Procedia CIRP 9-16	D. Brissaud, Y. Frein, V. Rocchi	2013
9	Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0	Final report of the Industry 4.0 Working Group	2013
10	Digitising European Industry. Reaping the full benefits of a Digital Single Market,	Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions	2016
11	How smart, connected products are transforming competition	M. E. Porter , J. Heppelmann	2014

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
12	Smart factories in Industry 4.0 : a review of the concept and of energy management approached in production based on the internet paradigm	F. Shrouf, J. Ordieres, G. Miragliotta	2014
13	Future industrial systems: best practices of the intelligent manufacturing ans services systems (IMS2) French research group	O. Cardin, F. Ounnar, A. Thomas, D. Trentesaux	2016
14	Sociologie du numérique	D. Boullier	2016
15	The French Connection	Teesdale Tools Limited	1976
16	Education and training for CAD in the auto industry	D. A. Field	2004
17	Latest developments in CIM	S. V. Nagalingam, G. C. Lin	1999
18	CIM – still the solution for manufacturing industry	S. V. Nagalingam, G. C. Lin	2008
19	Informatisation des industries manufacturières et intellectualisation de la production	P. Veltz	1986
20	CAD model based virtual assembly simulation, planning and training	M. C. Leu et alii.	2013
21	Virtual and augmented reality technologies for product realization	S. C-Y Lu, M. Shpitalni, R. Gadh	1999
22	Special issue of computer-aided design on virtual and augmented reality technologies in product design	D. Talaba, I. Horvath, K. H. Lee	2010
23	Design for additive manufacturing : trends, opportunities, considerations and constraints	M. K. Thompson et alii.	2016
24	Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry	S. M. Wagner, R. O. Walton	2016
25	Implementation of additive manufacturing technologies for mass customization	D. Deradjat, T. Minshall	2015
26	Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies	H. Paris, H. Mokhtarian, M. Museau, I. F. Ituarte	2016
27	Enterprise information systems state of the art : past, present and future trends	D. Romero, F. Vernadat	2016
28	Intelligent products in the supply chain – 10 years on	D. Mc Farlane et alii.	2012
29	e-Manufacturing : characteristics, applications and potentials	K. Cheng, R. Bateman	2008

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
30	e-Manufacturing-fundamental, tools, and transformation	J. Lee	2003
31	Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: prototype implementations and challenges	P. Leitao, A. W. Colombo, S. Karnouskos	2016
32	Cyber-physical systems in manufacturing	L. Monosteri et alii	2016
33	A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond	J. Qin, Y. Liu, R. Grosvenor	2016
34	Big data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems : a survey of the current status and future outlook	R. F. Babiceanu, R. Seker	2016
35	Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance	J. Davis et alii.	2012
36	Cahier de l'Observatoire FIVES des usines du futur	FIVES	2015
37	Transformer l'industrie par le numérique, livre blanc industrie du futur	Syntec numérique	2016

I.2 Revue environnementale

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
1	Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence	Commanditaire : OCDE Réalisation : F. Berkhout, J. Hertin, Université du Sussex	2001
2	SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age	Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : McKinsey & Company	2008
3	Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency	Commanditaire : CE DG INFSO Réalisation : BIO Intelligence Service (A. Béton, C. Des Abbayes, S. Iyama) IZM (L. Stobbe), E5 (S. Gallehr, L.G. Scheidt)	2008

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
4	GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future	Commanditaire : the Global eSustainability Initiative Réalisation : Boston Consulting Group	2012
5	SMART 2020 Germany Addendum: The ICT Sector as the Driving Force on the Way to Sustained Climate Protection	"Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : Boston Consulting Group"	2010
6	SPAIN2020 : ICT and Sustainability	Commanditaire : Club de Excelencia en Sostenibilidad Réalisation : Accenture	2012
7	The potential global CO2 reductions from ICT use - Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO2	Commanditaire : WWF Suède, HP Réalisation : Ecofys Italie (M. Buttazoni)	2008
8	#SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges	Commanditaire : Global e-Sustainability Initiative Réalisation : Accenture Strategy	2015
9	The case of Korea: the quantification of GHG reduction effects achieved by ICTs	Commanditaire : ITU Réalisation : Korea Radio Research Agency (S. Young Chung), Korea Association for ICT Promotion (D. Kuk CHeon), SK Telecom (H-E. CHang), H. Kwak (Ernst & Young Han Young)	2013
10	An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services	J. Bonvoisin, A. Lelah, F. Mathieux et D. Brissaud	2014
11	Green IT - France 2020	Commanditaire : Fédération Française des Télécoms, Alliance TiCS, Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication Réalisation : Boston Consulting Group	2010
12	Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle	M. Burkhart, J.C. Aurich	2015

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
13	Innovations technologiques et performance industrielle globale : l'exemple de l'impression 3D	Commanditaire : Conseil Économique Social et Environnemental	2015
14	Energy efficiency in U.S. manufacturing - The case of Midwest Pulp and Paper Mills	WRI (N. Aden, J. Bradbury, F. Tompkins)	2013
15	Are Intelligent Manufacturing Systems Sustainable?	André Thomas, Damien Trentesaux	2011
16	The potential of 3D printing to reduce the environmental impacts of production	C. McAlister, J. Wood	2014
17	Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment	Jeremy Faludi et al	2015
18	Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components	R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E. Masanet	2016
19	The Additive Manufacturing Sustainability Issue	C. Tuck Université de Nottingham	
20	Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing	F. Le Bourhis, O. Kerbrat, J-Y. Hasco et, P. Mognol.	2013
21	Visualization of environmental impacts for manufacturing processes using virtual reality.	W.W. Wits, F.J.A.M Van Houten,	2011
22	CAD Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA software and Guidelines for the Improvement	A. Morbidoni, C. Favi. M. Germani	2011
23	Standards Landscape and Directions for Smart Manufacturing Systems	Y. Lu, KC. Morris, S. Frechette	2015
24	Energy Cloud: real-time cloud-native Energy Management System to monitor and analyze energy consumption in multiple industrial sites	INESC-ID Lisboa (H. Sequeira, P. Carreira), ABB Corporate Research (T. Goldschmidt, P. Vorst)	2014
25	Virtual Prototyping: first practice of a European research group	Lionel Roucoules, Marten Toxopeus, Fabrice Mathieux, Tatiana Reyes, IonGrozav, Guillaume Thomann, Philippe Marin, Paolo Moriggi, Paolo Cobianchi	2014

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
26	Assessment of Energetic Leverage Effect Using a Virtual Prototype	Rebecca Ilsen, Christoph Herder, Jan C. Aurich	2015
27	Toward low-carbon construction processes: the visualisation of predicted emission via virtual prototyping technology	Johnny K.W. Wonga, Heng Lia, Haoran Wanga, Ting Huanga, Eric Luoa, Vera Li	2012
28	Environmental Impact Assessment Studies in Additive Manufacturing	Olivier Kerbrat, Florent Le Bourhis , Pascal Mognol, Jean-Yves Hascoët	2016
29	Environmental impacts of utilizing Mass customization : Energy and material use of mass customization vs. Mass production	R. Chin, D. Smithwick	2009
30	Additive manufacturing and its societal impact : a literature review in The international journal of advanced manufacturing technology	S.H;Huang, P. Liu, A. Mokusdar, L. Hou	2012
31	Energy inputs to additive manufacturing : does capacity utilization matter ?	M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft , R. Hague	2011
32	Environmental and health impacts of additive manufacturing	D.Rejeski,Y.Huang	2014
33	Additive manufacturing and sustainability : an exploratory study of the advantages and challenges	S.Ford, M.Despeisse	2016
34	Towards energy and resource efficient manufacturing : a processes and systems approach	Joost R. Duflou ,John W. Sutherland,David Dornfeld, Christoph Herrmann,Jack Jeswiet,Sami Kara,Michael Hauschild, Karel Kellens	2012
35	Resource consumption of additive manufacturing technology	B. Kianian	2012
36	Additive manufacturing technology potential : a cleaner manufacturing alternative	B. Kianian, T.C. Larsson	2015

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
37	Internet of things and BOM-based life cycle assessment of Energy saving and emission reduction of products	F.Tao, Y.Zuo, L.Daxu, L.Lv, L.Zhang	2014
38	Internet of things in product life-cycle management	F.Tao, Y.Wang, H.Yang, M.Zhang	2016
39	Internet of things in energy efficiency	F.Jammes	2016
40	Leveraging product development for a sustainable future : energy and resource efficiency in lifecycle analysis	M. Eigner, P. Schafer,H Apostolov	2013
41	Evaluation of the resource efficiency of RFID controlled supply chains	G.Reinhart, K.Reisten	2013
42	Environmental implications of RFID	V.Thomas	2008
43	Life cycle assessment of RFID implementation in the fresh food supply chain	E. Bottani M.Manfredi, G.Vignali, A.Volpi	2014
44	towards an energy management system of systems : an industrial case study	D.Mora, M.Taisch, A.W. Colombo	2012
45	Wireless sensors improve data center energy efficiency	US Department of energy	2010
46	Designing IT systems according to environmental settings : a strategic analysis framework	H.Zhang, L.Liu, T.Li	2011
47	A holistic approach to achieving energy efficiency for interoperable machining systems	T.Peng, X.Xu	2013
48	Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature	K.Bunse,M.Vodicka, P.Schönsleben, M.Brülhart, F.O. Ernst	2011
49	Measuring Application Software Energy Efficiency	E.Capra, C.Francalanci, S.Slaughter	2012
50	Life cycle simulation for the design of product-service systems	M.Garetti, P.Rosa, S.Terzi	2012
51	Energy Efficiency in the future internet : a survey of existing approaches and trends in energy aware fixed network infrastructures	R.Bolla, F.Davoli	2009
52	Strategies for minimum energy operation for precision machining	N.Diaz,M.Helu, A.Jarvis, S.Tonissen, D.Dornfeld, R.Schlosser	2009

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
53	A knowledge management perspective on environmental life cycle management - a manufacturing company example	H. Nilsson-Linden	2014
54	Product lifecycle management : sustainability and knowledge management as keys in a complex system	M.G. Trotta	2010
55	A sustainable machining approach by integrating the environmental assessment within the CAD/CAM CNC chain	H.Andriankaja,H.Le Douigou, B.Eynard	2015
56	Improving energy efficiency in CNC Machining	S. Pavanaskar	2014
57	collaborative design sessions of objects proposing energy-saving practices	F.Jégou, J.Liberman,G.Wallenborn	2009
58	simulation-based sustainable manufacturing system design	J.Heilala,S.Vatanen,H.Tonteri,J.Montonen,S.Lind,B.Jo hansson,J.Stahre	2009
59	Energy engineering in the virtual factory	P.Stoffels, W.M.Boussahel,M.Vielhaber,G.Frey	2013

ANNEXE II Cas d'école

II.1 Cas n°1 : La simulation numérique 4.0

Cas d'école n° 1 La simulation numérique 4.0

Typologie	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Impacts / Etapes</th> <th style="text-align: center;"><i>Amont : conception & pilotage</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Usage : production</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Aval : maintenance & fin de vie</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Energie</i></td> <td style="text-align: center;">+++</td> <td style="text-align: center;">++</td> <td style="text-align: center;">++</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Ressources</i></td> <td style="text-align: center;">+++</td> <td style="text-align: center;">++</td> <td style="text-align: center;">++</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Polluants (air, eau, sol)</i></td> <td style="text-align: center;">+++</td> <td style="text-align: center;">++</td> <td style="text-align: center;">++</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / - - / - - - : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Principalement l'industrie lourde • Exemple(s) d'entreprise(s) pour ce cas : Solvay, Total, EDF, Volkswagen 	Impacts / Etapes	<i>Amont : conception & pilotage</i>	<i>Usage : production</i>	<i>Aval : maintenance & fin de vie</i>	<i>Energie</i>	+++	++	++	<i>Ressources</i>	+++	++	++	<i>Polluants (air, eau, sol)</i>	+++	++	++
Impacts / Etapes	<i>Amont : conception & pilotage</i>	<i>Usage : production</i>	<i>Aval : maintenance & fin de vie</i>														
<i>Energie</i>	+++	++	++														
<i>Ressources</i>	+++	++	++														
<i>Polluants (air, eau, sol)</i>	+++	++	++														
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : Largement diffusée depuis deux à trois décennies, la simulation numérique « classique » répond à des enjeux de réduction des coûts et des délais de production, ainsi qu'à une recherche de la qualité du produit / procédé. La simulation numérique embrasse l'ensemble des étapes du cycle de vie, de la conception à la fin de vie, en passant par les étapes d'usage et de maintenance. Ce cas sur « la simulation numérique 4.0 » se focalise sur : <ul style="list-style-type: none"> ▪ La simulation des opérations complexes et dangereuses ; et ▪ Le cas particulier de « jumeau numérique industriel ». ➔ Dans les deux cas, la maquette numérique construite est dynamique, au sens où elle représente en permanence la situation de l'usine réelle. <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Exemple n°1 : Solvay.</p> <p>Le groupe Solvay a intégré la simulation numérique sur plusieurs de ses sites, dont :</p> </div>																

- Le site de Belle-Etoile, dans le Rhône : simulation d'une réaction chimique complexe de type gaz – liquide – solide. Techniquement, Solvay a répliqué sur ordinateur le fonctionnement hydrodynamique du réacteur.
- Le site de Chalampé, en Alsace : création d'un jumeau numérique du système de contrôle. Construit par Siemens, ce jumeau numérique a pour objectif d'assurer la bonne migration de l'ancien système de contrôle (RS 3 d'Emerson) vers le nouveau (PCS 7 de Siemens). Grâce au jumeau numérique des différents ateliers, les équipes de Solvay peuvent se rendre compte de modifications à effectuer sur certaines boucles de contrôles, ou encore visualiser d'éventuels impacts qui n'avaient pas été imaginés.

Exemple n°2 : Total.

Pour la formation de ses opérateurs sur une plateforme pétrolière en Angola, Total utilise désormais « Comos Walkinside », le simulateur 3D de réalité virtuelle développé par Siemens. Les opérateurs peuvent ainsi se former à distance à intervenir sur des plateformes pétrolières dangereuses ou qu'ils ne connaîtraient pas.

Exemple n°3 : EDF.

EDF va réaliser une première série de « jumeaux numériques » des réacteurs nucléaires français d'ici à 2020 afin d'améliorer à terme leur maintenance, et de mieux prévoir et maîtriser les arrêts des 58 réacteurs que l'entreprise exploite en France.

Exemple n°4 : Volkswagen.

Volkswagen a mis en place un système de simulation produit par Siemens dans ses usines de production de pièces automobiles : *Press Line Management*. Ce logiciel de simulation des presses mécaniques permet de modéliser la chaîne de production a priori et de suivre le bon déroulement des étapes de production.

- **Chronologie** : La première simulation numérique « civile » en physique théorique fût l'[expérience de Fermi-Pasta-Ulam](#) (1953). Depuis, elle a évolué parallèlement à l'informatique, au même rythme de croissance que la puissance des ordinateurs : du teraflop en 2005 (10^{12} opérations par seconde) à l'exaflop (10^{18}) en 2015.

Solvay – Belle-Etoile. La modélisation poussée de mécanique des fluides (modélisation de la répartition des fluides dans le réacteur) a nécessité 4 ans de recherche en collaboration avec des universitaires, entre 2012 et 2016.

Solvay – Chalampé. Le projet de migration d'un système de contrôle à un autre, grâce au jumeau numérique, a débuté en 2010 et doit s'étaler en 12 tranches jusqu'à 2023.

- Technique :

Les modélisations numériques sont utilisées par des éditeurs de logiciels de calcul numérique pour anticiper ou valider le comportement de pièces ou d'ensembles qui sont confrontés aux phénomènes. Pour cela, les codes de calcul deviennent multi physiques pour tenir compte de plusieurs effets simultanés sur un même élément, et les méthodologies de résolution s'intègrent dans une démarche de conception

globale d'un produit de type *Model-Based Systems Engineering* (MBSE). L'intérêt des éditeurs de logiciel est de miser sur la facilité d'usage, pour répondre à une demande d'autonomisation de leurs clients.

- Relations avec les parties prenantes :

Le travail de modélisation peut rester en interne, avec de plus en plus de grands groupes industriels qui disposent d'équipes d'analystes capables de mettre au point des outils de modélisation et de méthodologies de résolution adaptées à l'entreprise. Mais le positionnement de PME sur ce besoin va probablement favoriser, à terme, la disponibilité sous forme de modules des offres des éditeurs (modules qui pourront souvent être utilisables en ligne soit directement, soit via des prestataires capables d'accompagner et de valider la démarche).

De manière générale, les industriels utilisent des solutions technologiques fournies par des sociétés spécialisées (Siemens, Dassault Systèmes, etc.). La mise en place se fait en binôme avec le fournisseur de solution.

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non

Solvay – Belle-Etoile. L'objectif premier de la simulation numérique était de prédire les situations à risque (type bouchage du réacteur).

Solvay – Chalampé. L'objectif principal du jumeau numérique était d'assurer la continuité de la production : il répondait ainsi à une contrainte forte de l'usine de Chalampé, qui doit produire en continu (un seul arrêt tous les trois ans). Des objectifs secondaires, en termes de formation des opérateurs notamment, peuvent également être mis en avant.

Volkswagen. L'objectif initial de l'installation de la simulation numérique était de moderniser et d'améliorer le rendement des chaînes de production. C'est via la technologie de couplage électrique des circuits de production, qui a été installée pour permettre la simulation de la production, que la consommation énergétique a été réduite de 30 à 40% dans l'usine de Wolfsburg.

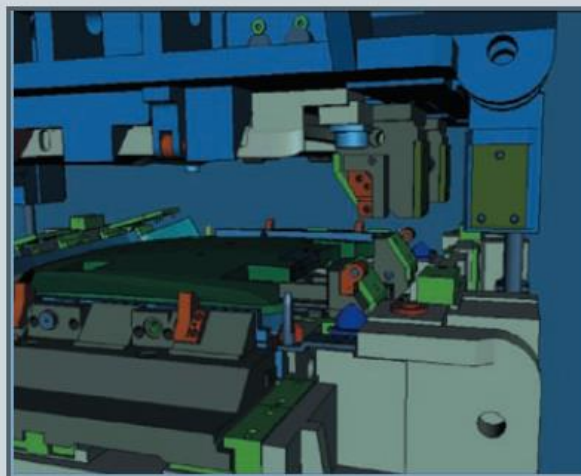


Image courtesy of Volkswagen AG, tool and die design Wolfsburg.

Figure 20 : Modélisation de la chaine de Volkswagen à Wolfsburg

Impacts économiques

- Evolution des volumes produits :

→ **Volkswagen.** Le logiciel de simulation numérique permet d'augmenter la cadence de production (+10 % selon Siemens), diminuer le temps de tests (-70 %), diminuer les coûts de design (-50 %) et diminuer le taux d'erreurs (-90 %).

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Solvay – Belle-Etoile : 300 000 €.

Solvay – Chalampé. 30 millions d'euros.

EDF. 1 million d'euros par jumeau numérique – coût inclus dans le budget du « grand carénage », estimé par EDF à 51 milliards d'euros sur la période 2014-2025 et censé permettre de prolonger la durée de fonctionnement du parc nucléaire français au-delà de 40 ans.

- Temps de retour sur investissement :

Cas d'école n° 1 La simulation numérique 4.0

	<p>Solvay – Belle-Etoile. L'arrêt du réacteur en 2009, sur le site de Belle-Etoile, avait causé 15 jours d'arrêt de production. Variables selon les hypothèses, les économies potentielles estimées par Solvay sont de l'ordre de 700 000 € par an, grâce à la simulation numérique de la réaction – soit un temps de retour sur investissement de moins d'un an.</p>
Impacts environnementaux	<ul style="list-style-type: none">• Evolution des consommations d'énergie : <p>Solvay – Belle-Etoile. En optimisant les conditions de réaction (à savoir le débit de gaz circulant dans le réacteur), la simulation numérique peut entraîner un léger gain en termes de consommations énergétiques.</p> <p>Volkswagen. La mise en place de ce système d'automatisation a nécessité la modernisation des chaînes de production, avec un ajustement des lignes de presse. Cet ajustement a visé à individualiser le pilotage de chaque partie de la machine, et à modifier l'alimentation électrique entre les pilotes principaux et les pilotes de transfert. C'est cet ajustement électrique qui a conduit à des économies d'énergie de l'ordre de 30 à 40 % sur l'usine de Wolfsburg. L'énergie émise par un circuit lorsqu'il ralentit est utilisé pour alimenter les autres circuits.</p> <ul style="list-style-type: none">• Evolution des rejets de polluants (air, eau, sol) : <p>Total. Le projet Walkinside permet d'intervenir plus rapidement en cas d'accident industriel, comme un départ de feu sur la plateforme pétrolière. Ceci peut entraîner une réduction des rejets de polluants (non quantifiables).</p> <ul style="list-style-type: none">• Impacts environnementaux directs de la technologie (numérique) implémentée : <p>Total. La modélisation logicielle en 3D implique un investissement informatique important qui, ajouté aux besoins de cyber-sécurité induits, implique une dépense énergétique significative.</p>
Impacts sociaux	<ul style="list-style-type: none">○ Evolution des conditions de travail (Sécurité) : <p>Solvay – Belle-Etoile. Les arrêts du réacteur demandaient une manipulation de produits dangereux pour relancer le processus, qui est ainsi évitée grâce à la simulation numérique.</p> <p>Total. Le projet Walkinside a été conçu en particulier pour les opérations de maintenance complexes et/ou dangereuses : il permet d'améliorer la sécurité des opérateurs au travail en les préparant à ce type d'opérations. Les sessions de formation sont notamment conçues à la manière de jeux vidéo (<i>gamification</i>), comme il apparaît ci-dessous.</p> <p>Volkswagen. Les modifications de la chaîne de production même ont été transparentes pour les opérateurs, qui ont continué à travailler sur les mêmes chaînes. En revanche, la planification de la production a été modifiée, nécessitant une formation à l'utilisation du logiciel <i>PLS</i> de Siemens.</p>



Figure 21 : Formation des opérateurs sur une plateforme Total en Angola

- Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place :

Solvay – Belle-Etoile. Un projet de formation des opérateurs a été mis en place pour utiliser le logiciel de simulation.

Solvay – Chalampé. La formation des opérateurs est un objectif secondaire du jumeau numérique : en effet, les doubles virtuels pourraient être utilisés pour des exercices d'entraînement et pour simuler des incidents.

Sources

- Christian Saguez, « Calcul intensif et simulation numérique », *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 4/2016 (Novembre 2016), p. 32-36.
- Transformer l'industrie par le numérique, Syntec Numérique, Avril 2016
- Eric Goncalvès da Silva. Méthodes et Analyse Numériques. Engineering school. Institut Polytechnique de Grenoble, 2007, pp.99
- François Costes, Méthodologies de simulation numérique en contexte industriel, NAFEMS France, Septembre 2013
- Siemens, Immersive Operator Training with COMOS Walkinside: <https://www.youtube.com/watch?v=19USyVRVW70>
- <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/chemicals-industry-value-chain.html>
- <http://www.usinenouvelle.com/article/creer-un-jumeau-numerique-de-son-usine.N367664>

Cas d'école n° 1 La simulation numérique 4.0

- <https://www.industrie-techno.com/solvay-et-siemens-dessinent-l-usine-du-futur-a-chalampe.40716>
- <http://www.lefigaro.fr/flash-eco/2016/11/30/97002-20161130FILWWW00256-edf-va-creer-un-jumeau-numerique-du-parc-nucleaire-francais.php>
- https://www.industry.siemens.com/topics/global/en/integrated-drive-systems/drive-train-references/videos/pages/reference-video_volkswagen.aspx
- http://longtermtec.com/wp-content/uploads/2013/12/MyPod_1018W12.pdf

II.2 Cas n°2 : La personnalisation de masse de la chaîne de production

Cas d'école n° 2 La personnalisation de masse de la chaîne de production

Typologie	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impacts / Etapes</th> <th>Amont : conception pilotage</th> <th>&</th> <th>Usage : production</th> <th>Aval : maintenance & fin de vie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energie</td> <td>-</td> <td></td> <td>++</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ressources</td> <td>-</td> <td></td> <td>++</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Polluants (air, eau, sol)</td> <td></td> <td></td> <td>+</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / - - / - - - : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Tous • Exemples d'entreprises pour ce cas : Georges Pernoud – Ford – Optima 	Impacts / Etapes	Amont : conception pilotage	&	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie	Energie	-		++		Ressources	-		++		Polluants (air, eau, sol)			+	
	Impacts / Etapes	Amont : conception pilotage	&	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie																
Energie	-		++																		
Ressources	-		++																		
Polluants (air, eau, sol)			+																		
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>La personnalisation de masse (ou <i>mass-customization</i>) est un processus par lequel une marque donne le moyen à ses clients de pouvoir personnaliser un produit ou un service afin que celui-ci devienne le plus unique possible, dans la mesure de la latitude laissée disponible par la production en série. Ce cas d'école cible l'adaptation de la chaîne de production pour produire en plus petites séries, selon une demande plus personnalisée. La prévision plus fine de la demande est un prérequis de cette adaptation.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Exemple n°1 : Georges Pernoud.</p> <p>La société Georges Pernoud fabrique des moules pour la production de pièces techniques. Elle a automatisé sa chaîne de production pour mieux répondre à la demande de ses clients (en moules plus complexes notamment).</p> <p>La société a investi dans des robots qui chargent les palettes de brut d'acier pour l'usinage des pièces. Une fois chargées, les machines sélectionnent et lancent le programme attaché au numéro de palette, et donc attaché au brut inséré.</p> <p>De plus, l'industriel adapte ses machines pour obtenir un magasin d'outils plus large que celui prévu initialement, à l'aide de robots qui changent les outils sur la machine. Ainsi, un plus grand nombre d'opérations peut être accompli sans l'intervention d'un opérateur.</p> </div>																				

Exemple n°2 : Ford.

L'entreprise a intégré des technologies visant à réduire le temps de développement de nouveaux modèles personnalisés et les coûts énergétiques.

Exemple n°3 : Optima.

La société allemande d'emballages Optima Consumer GmbH utilise des technologies Siemens sur sa chaîne de production de bouteilles de parfum, Optima Moduline. Ici, chaque produit sur la chaîne de production est identifiable et la machine adapte les étapes de fabrication grâce à cette identification.

- Chronologie :

Auparavant réservée à des productions en petite série ou à l'artisanat, le sur-mesure dans l'industrie se démocratise depuis le début des années 2000.

Georges Pernoud. La personnalisation des chaînes de production commence à partir de 2005 dans les usines de l'entreprise. Elle se poursuit aujourd'hui, avec l'achat d'une quatrième cellule robotisée en 2017 et la mise en place d'autres projets Industrie 4.0 (*Big data* pour la maintenance prédictive des machines, Internet des objets dans les moules et optimisation de la production).

Ford. L'investissement sur les chaînes de production de Ford date de 2013.

Optima. Optima et Siemens communiquent depuis 2015 sur la mise en place de cette ligne de production.

- Technique :

Georges Pernoud. Les robots, les machines et les parcours outils sont programmés en amont pour permettre un usinage automatique des pièces.

Optima. Chaque produit est marqué à l'aide d'une puce RFID (système similaires aux titres de transports en région parisienne par exemple) et un capteur reconnaît individuellement chaque produit pour que la machine effectue l'action individuelle programmée en amont.

- Relations avec les parties prenantes :

Georges Pernoud. La personnalisation des chaînes de production s'est faite en partenariat avec des PME, TPE et groupes locaux. La PME bénéficie aujourd'hui de soutien de l'Union Européenne (projet H2020, écosystème difficile pour une PME), de la région et du département pour leurs projets, dont la mise en place de la continuité de leur fil numérique.

Ford et Optima. Les solutions ont été mises en place à l'aide de Siemens.

- Objectifs visés :

Cas d'école n° 2 La personnalisation de masse de la chaîne de production

- Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
- Gains de productivité : Oui / Non
- Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
- Réorganisation du travail : Oui / Non
- **Autres** : Ouverture à de nouveaux marchés et clients

- Evolution des volumes produits :

Georges Pernoud. L'automatisation a permis un gain de productivité de 30 % entre 2006 et 2013, sur des machines produisant des moules pour petites séries industrielles (500 000 à 1 million de pièces par an). Ce gain de production est permis grâce à la production 24h/24 7j/7 des machines, sans temps de veille ou de pause. Les opérateurs n'ont plus besoin d'être à côté des machines pour le fonctionnement et pour une partie de la gestion des incidents.

L'ensemble de la démarche de la PME a permis au chiffre d'affaire de doubler entre 2005 et 2016.

Ford. Le temps de création d'un nouveau véhicule a été diminué de 40 % avec l'installation de la solution Siemens (de la création produit à la mise sur le marché), appelée In-Vehicle-Software management.

Optima. La productivité a doublé avec l'installation de la nouvelle machine, passant de 60 pièces par minute à 120 pièces par minute.

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Georges Pernoud : 780 000 euros par cellule robotisée, sachant qu'il y en a 4 depuis janvier 2017. Georges Pernoud a reçu une aide de la Région Rhône-Alpes.

- Evolution des coûts (OPEX) :

Georges Pernoud. En 2005, l'automatisation des moyens de production a permis de faire baisser le coût de production de 30 %. La réduction des coûts a été effectuée grâce à la réduction du besoin en présence homme, mais aussi grâce à l'augmentation des temps d'usinage hebdomadaire apporté par la robotisation ainsi que la palettisation qui a permis une augmentation du nombre de pièce usiné .

Ford. Economie de 100 millions \$ sur 3 ans par la mise en place de la technologie Siemens. Diminution de 30 % des coûts énergétiques sur la chaîne de production pour les nouveaux véhicules.

- Evolution des consommations de matières :

→ **Georges Pernoud.** La consommation de matières premières n'a pas été modifiée, qu'il s'agisse de la matière première des moules (acier) ou du lubrifiant utilisé pour le fonctionnement des machines.

Impacts économiques

Impacts environnementaux

Cas d'école n° 2 La personnalisation de masse de la chaîne de production

- Evolution des consommations d'énergie :

Georges Pernoud. Le rendement énergétique est meilleur que par le passé, avec moins de phases de veille pendant lesquelles les groupes hydrauliques fonctionnent toujours. La consommation globale a augmenté, mais relativement aux volumes produits, elle baisse.

Ford. Baisse d'environ 30 % des consommations.

- Impacts environnementaux de la technologie (numérique) implémentée :
 - Impacts directs :

→ **Georges Pernoud.** Les consommations énergétiques des robots eux-mêmes est marginale au regard de celles de la chaîne d'usinage. Le robot se déplace une quarantaine de minutes dans la journée, tandis que la chaîne d'usinage fonctionne plus de 20h dans la journée.

- Evolution du nombre d'ETP (à volume produit équivalent) :

Georges Pernoud. Les quatre cellules robotisées installées entre 2006 et 2017 ont permis un gain global de productivité de l'ordre de 30 %, pour un nombre de salariés passé de 40 à 75.

Ces métiers correspondent à de nouveaux métiers de programmation des machines et des robots d'une part, et des circuits journaliers de fonctionnement des outils en fonction des besoins de production.

L'industriel souligne la difficulté de recrutement de personnel compétent et formé, ce qui a freiné les embauches. Des représentants de la société ont été conviés au Sénat pour discuter de ces aspects positifs de la robotisation.

- Evolution des conditions de travail :
 - Sécurité :

→ **Georges Pernoud.** Les conditions de sécurité ont été grandement améliorées pour les opérateurs dont le nombre d'opérations a diminué. Ils ne déplacent plus les palettes et les blocs de métaux et ne participent plus aux changements des machines.

→ L'usine a été aménagée pour minimiser la présence de ces blocs qui sont situés dans des magasins spécifiques et manipulés par des robots, ce qui diminue le risque d'accidents.

- Pénibilité :

→ **Georges Pernoud.** Les salariés manipulent beaucoup moins les blocs d'acier et ont moins de tâches de surveillance ou de changement d'outillage sur les machines. Les emplois sont moins physiques et manuels.

- Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place :

Impacts sociaux

Cas d'école n° 2 La personnalisation de masse de la chaîne de production

	<p>Georges Pernoud. Les gains de productivité ont permis de maintenir le site de production en France. Les employés ont été formés aux nouveaux dispositifs, et de nouvelles personnes ont été embauchées et formées sur place.</p> <p>La préparation des palettes est un ancien métier qui existe toujours, mais l'industriel a des besoins énormes en programmation. Une personne est nécessaire à temps plein pour une des machines, et trois personnes pour les trois autres machines mais en parallèle.</p>
<p>Perspectives</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bonnes pratiques : <p>Georges Pernoud. Les technologies utilisées sont répliquables de manière simple dans d'autres structures, et font partie de l'état de l'art de l'usine numérique. Cependant, certains freins sont à lever, comme par exemple l'absence de fibre optique à l'usine en juin 2017 (environnement technico-économique de l'entreprise).</p> <p>Ford. La chaîne de production personnalisable est en cours de déploiement sur les nouveaux modèles du constructeur pour le marché nord-américain.</p>
<p>Sources</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Transformer l'industrie par le numérique</i>, Livre Blanc Industrie du futur, avril 2016 • <i>Tseng, M.M. et Jiao, J. (2001). Mass Customization, in: Handbook of Industrial Engineering, Technology and Operation Management</i> • http://www.symop.com/georges-ernoud-sas-les-robots-sauvent-lemploi/ • http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/mc/Documentsu20Brochures/DFFA-B10051-00-7600.pdf • Innovative Concepts for Modular Machine Building - Digitalization in the field https://www.youtube.com/watch?v=IDqRoNMtd9Q • https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00994825/document

II.3 Cas n°3 : L'optimisation des procédés industriels, par l'introduction de capteurs et l'analyse de données

Cas d'école n°3 L'optimisation des procédés industriels, par l'introduction de capteurs et l'analyse de données

<p>Typologie</p>	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1" data-bbox="824 1281 1805 1407"> <tr> <td data-bbox="824 1281 1126 1407"> <p>Impacts / Etapes</p> </td> <td data-bbox="1126 1281 1350 1407"> <p><i>Amont : conception pilotage</i></p> </td> <td data-bbox="1350 1281 1574 1407"> <p>&</p> </td> <td data-bbox="1574 1281 1805 1407"> <p><i>Usage : production</i></p> </td> <td data-bbox="1805 1281 2029 1407"> <p><i>Aval : maintenance & fin de vie</i></p> </td> </tr> </table>	<p>Impacts / Etapes</p>	<p><i>Amont : conception pilotage</i></p>	<p>&</p>	<p><i>Usage : production</i></p>	<p><i>Aval : maintenance & fin de vie</i></p>
<p>Impacts / Etapes</p>	<p><i>Amont : conception pilotage</i></p>	<p>&</p>	<p><i>Usage : production</i></p>	<p><i>Aval : maintenance & fin de vie</i></p>		

Cas d'école n°3 L'optimisation des procédés industriels, par l'introduction de capteurs et l'analyse de données

Energie		++	+
Ressources		-	-
Polluants (air, eau, sol)		+	

- + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental)
- - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental)
- Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Tous
- Exemples d'entreprises pour ce cas : SNCF – Schneider Electric – Siemens

- Description qualitative de la technologie implémentée :
 - Cadrage :

L'optimisation des procédés industriels étudiée dans ce cas procède de trois étapes successives :

1/ La mesure des procédés de production, au travers d'*Intelligent Electronic Devices*, ou IED (automates, compteurs, appareils de mesure ayant un moyen de se connecter à l'extérieur) ;

2/ Un contrôle périphérique, qui est une couche intermédiaire (interface technique entre l'étape précédente et la suivante) ;

3/ L'analyse des données de production, via des algorithmes de calcul et des applications.

Mise en œuvre

Exemple n°1 : SNCF.

A travers le projet Digi IO (Installation Outillages), le groupe SNCF met le digital au service de la performance de ses ateliers de maintenance ferroviaire. 825 équipements clés, ou machines vitales réparties dans les 10 technicentres français, sont connectés via des capteurs et intégrés à un système unifié de supervision³⁹.

Exemple n°2 : Schneider Electric.

Le groupe Schneider propose à ses clients des solutions d'optimisation de leurs consommations énergétiques. Par exemple :

³⁹ Les machines vitales aujourd'hui équipées de capteurs sont réparties en 10 grandes familles : installations de lavage, peinture, grenailage, levage, machines-outils, étuves, fours, compresseurs (compresseurs d'air qui alimentent l'ensemble du réseau d'air d'un site), bancs d'essai électroniques, etc.

- Dans l'industrie chimique, l'électricité est payée par rapport à la puissance maximum souscrite au réseau, car celle-ci définit la taille du transformateur. Un moyen de diminuer la facture pour l'industrie chimique est d'optimiser la gestion de la puissance. Des processus d'effacements peuvent être installés, et des indicateurs de performances peuvent être établis. Les acteurs du processus peuvent être alertés sur leurs pics consommation et prendre en conséquence les bonnes décisions ;
- Des opérations de découpage, de soudure, etc., peuvent connaître des problèmes de qualité de l'énergie : des microcoupures peuvent perturber le réseau et poser des problèmes de productivité. Les microcoupures ne se sentent pas nécessairement dans le fonctionnement de l'entreprise, mais un système de *monitoring* peut modéliser la forme de l'onde, et renseigner, plutôt que sur les prix, sur la disponibilité des installations.

Exemple n°3 : Usine d'Amberg de Siemens.

L'usine Siemens de Amberg a en charge une partie de la production des systèmes de contrôle et de surveillance, les produits SIRIUS et SIMATIC. Elle est également utilisée par Siemens comme un modèle d'efficacité et de compatibilité environnementale.

L'entreprise a ainsi mis en place dans cette usine un « Energy Analytics energy data management system », qui repose sur une installation massive de capteurs et d'analyse des données ainsi générées. L'usine sert de démonstrateur, Siemens commercialisant à présent cette technologie, en utilisant le centre d'analyse des consommations qu'elle a mise en place pour surveiller sa propre consommation de ressources et d'énergie pour ses clients.

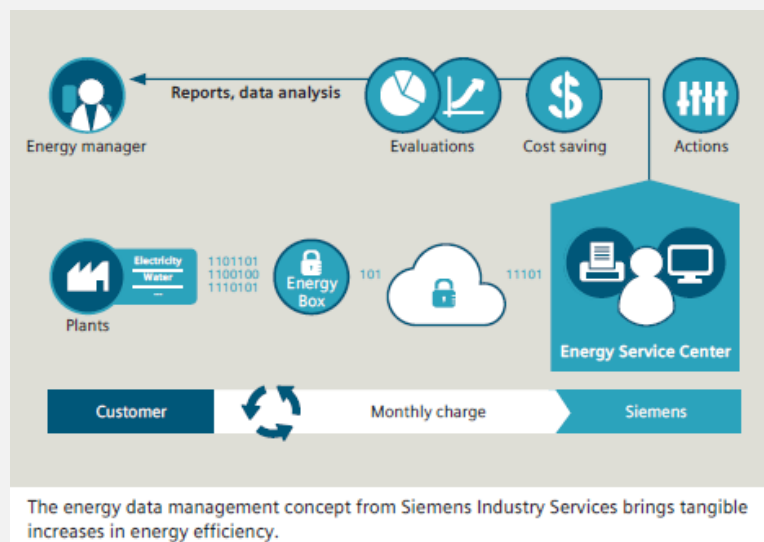


Figure 22 : Management des ressources énergétiques par Siemens

- Chronologie :

Cas d'école n°3 L'optimisation des procédés industriels, par l'introduction de capteurs et l'analyse de données

La mesure et le suivi des données de production (dont les consommations énergétiques) sont relativement anciens dans certains secteurs comme la métallurgie, et se sont diffusés depuis quelques années à l'ensemble des secteurs industriels. Le réflexe d'analyse des données, quant à lui, est plus récent (du fait du développement de nouvelles technologies et de l'augmentation continue des puissances de calcul).

SNCF. Le projet Usine du Futur de la SNCF a débuté il y a quelques années, et a reçu le label «Vitrine Industrie du Futur » en 2016. Cependant, la télé-relève est déployée depuis 20 ans environ, mais sans harmonisation entre les technicentres. Il y a encore peu de sites au sein desquels l'ensemble des installations sont supervisées, moyennant quoi le potentiel d'amélioration est important dans les prochaines années.

Schneider. Le développement des stratégies d'optimisation chez les clients du groupe a pris son essor depuis une dizaine d'années.

Siemens. Le projet d'installation à l'usine d'Amberg s'est tenu entre septembre 2012 et juin 2013.

- Relations avec les parties prenantes :

SNCF. Le projet DigiIO (SNCF) s'appuie sur l'expertise de nombreuses start-ups, PME et ETI françaises.

Schneider. Chez Schneider Electric, à la demande des clients, les protocoles de données sont ouverts. Une fois que la donnée est extraite de l'équipement, elle ne sera pas traitée différemment par un système établi par un autre acteur du marché.

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non

- Evolution des volumes produits :

La mesure et l'analyse des données de production n'a pas vocation à réduire les volumes produits, et peut même contribuer à les augmenter. Schneider Electric souligne que les industriels cherchent d'abord à produire ; puis, comme une production industrielle correspond à une consommation énergétique, l'objectif est d'augmenter l'intensité énergétique des procédés industriels (et non nécessairement de réduire les consommations énergétiques dans l'absolu).

Dans le cas de l'usine d'Amberg, le système de suivi et d'optimisation des consommations énergétiques et en matériaux a été mis en place dans le cadre d'une certification ISO 50 001. Le gain de productivité n'a pas été un moteur de l'installation du système. En revanche, l'optimisation des consommations permet d'augmenter la rentabilité de la chaîne de production.

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Impacts économiques

Cas d'école n°3 L'optimisation des procédés industriels, par l'introduction de capteurs et l'analyse de données

	<p>SNCF – Technicentre de Saintes. La mise en place de la télé-relève en 2010-2011, pour les consommations d'électricité, d'eau et de gaz, a coûté 175 000 € (budget total de l'installation en première phase).</p> <p>Schneider. Le coût des installations de mesure est variable :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sur un tableau électrique neuf, la pose d'un capteur de mesure entraîne un surcoût de 10 %, sur des projets entre 100 000 € et 1 M € en moyenne ; • Sur les sites existants, l'approche et le coût sont à évaluer au cas par cas. <ul style="list-style-type: none"> • Temps de retour sur investissement : <p>SNCF – Technicentre de Saintes : 2 ans.</p> <p>Siemens. Moins d'un an.</p>
<p>Impacts environnementaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution des consommations de matières : <p>Siemens. La mise en place du système d'optimisation a permis de ramener à zéro les consommations de matériaux en dehors des phases d'utilisation des machines. Par exemple, les consommations de nitrogène ont été diminuées de 8 % à l'année par un simple contrôle de la fermeture des valves.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evolution des consommations d'énergie : <p>Siemens. La consommation énergétique de l'usine d'Amberg a été réduite de 320 000 kWh en un an, soit une réduction de 20 %.</p>
<p>Impacts sociaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution du nombre d'ETP (à volume produit équivalent) : <p>SNCF. La tendance à la baisse des effectifs est générale, elle est indépendante de la mise en place de solutions numériques. En revanche, pour effectuer le même travail avec moins d'ETP, il sera nécessaire d'avoir des nouvelles solutions : ainsi le numérique est-il une conséquence, et non une cause de la baisse des effectifs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evolution des conditions de travail : <p>SNCF – Technicentre de Saintes. La supervision améliore les conditions de travail de chacun et fait baisser le taux d'accidents de manière significative. En cas d'anomalies sur le process par exemple, une intervention rapide est désormais possible car le service maintenance est alerté directement par la supervision.</p>
<p>Perspectives</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bonnes pratiques : <p>SNCF. Le projet DigilO est en cours de déploiement dans l'ensemble des technicentres industriels de l'entreprise.</p>

Sources

- Godreuil Benjamin, Saudeau Emmanuelle, « Les technologies de l'usine du futur au service de la maintenance industrielle », *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 4/2016 (Novembre 2016), p. 76-80
- Codra, Fiche référence « SNCF Projet National Eco-Consommation », 2012
- SNCF, Gestion technique des bâtiments / Gestion technique centralisée, Technicentre industriel Charentes Périgord – Site de Saintes, présentation d'avril 2017
- <http://www.sncf.com/fr/Presse/HTML/technicentre-oullins-label-industrie-du-futur/856214>
- Programme Usine du Futur SNCF <https://www.youtube.com/watch?v=O4benpqaQ28>
- Industrie 4.0, Les leviers de la transformation, FIM-GIMELEC, Septembre 2014
- http://w3.siemens.com/services/global/en/success-stories/Documents/PDF/Energy-Analytics_Siemens-Electronics-Plant-Amberg_E10001-T430-A358-X7600.pdf

II.4 Cas n°4 : Le pilotage à distance du procédé industriel

Cas d'école n° 4 Le pilotage à distance du procédé industriel

Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :

Impacts / Etapes	Amont : conception pilotage	& Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie
Energie	+	++	
Ressources	+	++	
Polluants (air, eau, sol)		+	

- + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental)
- - / - - / - - - : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental)
- Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Principalement énergie
- Exemples d'entreprises pour ce cas : Air Liquide

Mise en œuvre

- Description qualitative de la technologie implémentée :
 - **Cadrage :**

L'objectif du projet *Connect* est d'optimiser la production de 22 sites industriels en les raccordant à un centre de pilotage à distance, le COOD (pour Centre d'Opération et d'Optimisation à Distance). Le projet *Connect* s'inscrit dans la démarche d'usine du futur du groupe Air Liquide ; de plus, il est rendu possible grâce à la forte automatisation préexistante (les premiers sites à être passés en auto contrôle l'ont été il y a 30 ans). Schéma de fonctionnement :

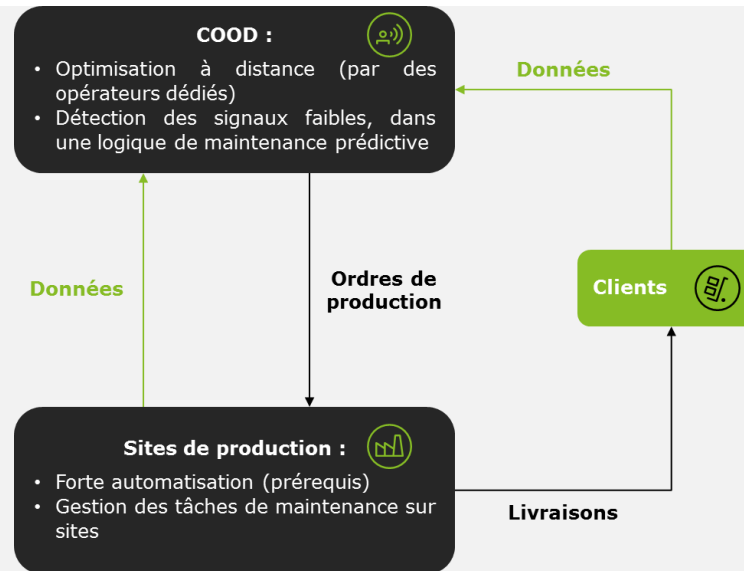


Figure 23 : Projet COOD - Air Liquide

○ Chronologie :

Le pilotage à distance s'est développé dans l'industrie depuis la 2^{nde} guerre mondiale, notamment pour la production d'énergie (gestion des barrages et des centrales thermiques). Le pilotage à distance des unités de production étudié ici va plus loin que ces précédents, dans la mesure où :

- Le flux d'information ascendant est plus complexe : les données de productions suivies sont plus nombreuses, et l'analyse qui en est faite est plus précise. De plus, des données en provenance des clients sont intégrées (voir ci-après la rubrique « Relations avec les parties prenantes ») ;
- Le flux descendant ne se limite pas à un ordre de type « marche / arrêt », mais consiste en un réglage fin de la production. De plus, un volet de maintenance préventive est intégré à la démarche.

Air Liquide. Le projet Connect a été déployé en janvier 2017.

○ Technique :

Sept nouvelles technologies sont mises en œuvre dans le projet Connect, : maintenance acoustique, lunettes connectées, tablettes connectées, big data pour la maintenance prédictive et l'optimisation de la production, tutoriels vidéo, digital refresh (documentation intelligente) et scan 3D. Le centre d'opération à distance (COOD) s'assure que tous les sites de production bénéficient du même niveau de maturité technologique : par exemple, la documentation technique, aujourd'hui numérisée, est mise à jour simultanément pour les opérateurs

Cas d'école n° 4 Le pilotage à distance du procédé industriel

	<p>de tous les sites de production. Inversement, si une lunette connectée enregistre une donnée anormale, cette dernière remonte au COOD, qui vérifie sur tous les sites s'il n'y a pas un problème.</p> <ul style="list-style-type: none">○ Relations avec les parties prenantes : <p>Le projet Connect permet de mieux répondre aux demandes des clients, par exemple pour les effacements de consommation. Il s'agit encore d'un projet ouvert, qui pourrait mener à la création d'un portail d'échange d'informations pour les clients, ou à des solutions permettant de travailler en aval de la consommation, en synergie avec les utilisateurs finaux (par exemple à partir de données historicisées ou de mesures de facteurs externes tels que la météo, la circulation, etc.).</p> <ul style="list-style-type: none">● Objectifs visés :<ul style="list-style-type: none">○ Mise en conformité réglementaire : Oui / <u>Non</u>○ Gains de productivité : <u>Oui</u> / Non○ Réduction des impacts environnementaux : <u>Oui</u> / Non○ Réorganisation du travail : <u>Oui</u> / Non
Impacts économiques	<ul style="list-style-type: none">● Investissements nécessaires (CAPEX) : 20 millions d'euros● Temps de retour sur investissement : <p>Le retour sur investissement se fait sur plusieurs années. Des hypothèses d'amortissement de l'investissement ont été prises sur les paramètres suivants :</p> <ul style="list-style-type: none">○ Une optimisation énergétique directe ;○ Davantage de fiabilité, une diminution des incidents de production ;○ Une préservation des machines (maintenance prédictive) et de leur fiabilité.
Impacts environnementaux	<p>Le projet Connect permet d'optimiser la production de gaz industriels, ainsi que leur logistique (produit gazeux livré par canalisations, produit liquide livré par camion), donc potentiellement les consommations énergétiques qui lui sont associées.</p> <ul style="list-style-type: none">● Evolution des consommations d'énergie : des hypothèses de gain énergétique ont été émises avant la mise en place de Connect, représentant quelques % des consommations.● Impacts environnementaux de la technologie (numérique) implémentée :<ul style="list-style-type: none">○ Impacts directs : consommations énergétiques du COOD (négligeables par rapport aux consommations énergétiques nécessaires à la production de gaz)
Impacts sociaux	<p>Le projet Connect touche à la réorganisation de l'entreprise ; son déploiement s'est fait au maximum selon des principes de co-construction, avec notamment un responsable des risques sociaux et d'accompagnement au changement, qui a mis en place des événements permettant la communication à tous les niveaux.</p>

Cas d'école n° 4 Le pilotage à distance du procédé industriel

	<ul style="list-style-type: none">• Evolution du nombre d'ETP (à volume produit équivalent) : aucun licenciement n'a été entrepris dans le cadre du projet Connect. Les 17 suppressions de postes sur les sites ont été associées à des mobilités, des créations de postes en centrale ou des départs non remplacés. Cela a un impact limité sur les 2 500 salariés de la branche « grande industrie ».• Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place : des ateliers de travail « opérateurs connectés » sont organisés par Air Liquide avant et lors de l'implantation de nouvelles solutions, pour avoir des retours directs et ainsi éviter les réticences de départ sur des solutions qui ne seraient pas totalement adaptées
Perspectives	<ul style="list-style-type: none">• Bonnes pratiques :<ul style="list-style-type: none">➔ A cette échelle, le pilotage à distance du procédé industriel semble cantonné au secteur de l'énergie. En revanche, le projet Connect est un projet pilote qui pourrait être lancé en Chine, à Singapour, aux Etats-Unis, etc.○ Existe-t-il des bonnes pratiques à l'étranger ? Air Liquide a réalisé un benchmark avant de réaliser l'étude, incluant par exemple General Electrics (qui pilote plus de 700 turbines dans le monde via un centre à Kuala Lumpur), ou RTE (qui gère des barrages à distance).
Sources	<ul style="list-style-type: none">• Karine Boissy-Rousseau, Laurelyne Verguet, « Des projets digitaux à la transformation digitale de l'entreprise », <i>Annales des Mines - Réalités industrielles</i>, 2016/4 (Novembre 2016), p. 72-75• Dossier de Presse « Projet Connect », Air Liquide, 09/02/2016• https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/warehousing-distributed-center-operations.html

II.5 Cas n°5 : Le business intelligence

Cas d'école n°5 Le *business intelligence*

Typologie	Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :			
	Impacts / Etapes	<i>Amont : conception & pilotage</i>	<i>Usage : production</i>	<i>Aval : maintenance & fin de vie</i>
	<i>Energie</i>		+	
	<i>Ressources</i>		++	
	<i>Polluants (air, eau, sol)</i>		+	
	<ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : tous • Exemples d'entreprises pour ce cas : SAP – Schneider Electric – Faurecia 			
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>Dans ce cas d'école, le « business intelligence » désigne l'analyse croisée de données par nature très différentes – à la fois :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des données internes à l'entreprise, mais issues de divers départements : données d'approvisionnement et de stock, données de production, données commerciales, données comptables, etc. ; et • Des données externes à l'entreprise, comme des données météorologiques, des données financières, des données de circulation automobile, etc. <p>L'objectif du <i>business intelligence</i> est d'exploiter pertinemment l'ensemble de ces données pour optimiser le fonctionnement de l'entreprise. Ce cas d'école peut être vu comme un « raffinement » du cas d'école n°3, qui ne concernait que les données de production⁴⁰. L'enjeu est d'assurer une continuité des données de l'entreprise, dans une vision de l'entreprise comme un écosystème numérique capable d'agréger différentes fonctions internes et différentes parties prenantes externes.</p>			

⁴⁰ Dans le cas d'école n°3 (optimisation des procédés par la mesure des données de production), l'entreprise décide de « placer le projecteur » à un endroit donné, sur telle ligne de production par exemple ; dans le cas d'école n°5 (*business intelligence*), l'entreprise reconnaît qu'elle ne « sait pas exactement » où placer le projecteur.

Exemple n°1 : SAP. L'entreprise développe aujourd'hui des logiciels qui vont au-delà de l'*Entreprise Resource Planning* (ERP) ; dit autrement, l'échelon pertinent n'est plus le procédé de production, mais la donnée. Les fonctionnalités intégrées dans ces logiciels sont non seulement la gestion (planning), mais également l'analyse de données agrégées et l'analyse prédictive. « SAP BusinessObjects Cloud » est un exemple de solution logicielle de ce type.

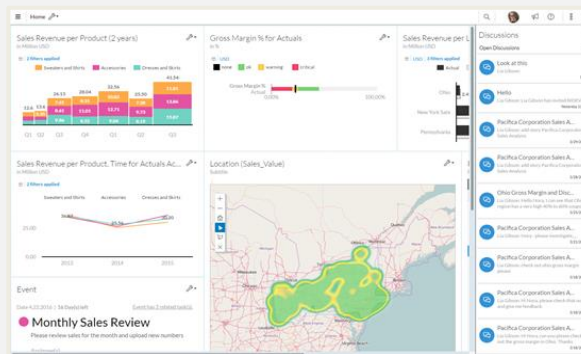


Figure 24 : SAP BusinessObjects Cloud

Exemple n°2 : Schneider Electric. Schneider Electric propose également des solutions de *business intelligence*, mais plus recentrées sur les consommations électriques. Pour l'entreprise, la démarche de *business intelligence* doit répondre à trois questions successives :

1. Qu'est-ce qui génère des données (d'où proviennent-elles) ?
2. Y a-t-il des liens entre ces données, qui *a priori* n'ont pas grand-chose à voir entre elles ?
3. Comment peut-on visualiser au mieux le résultat des croisements de données (construire les indicateurs qui permettent de prendre des décisions) ?

Exemple n°3 : Faurecia. Faurecia intègre différentes solutions évoquées dans les autres cas d'école pour concevoir ce qu'ils appellent une « Entreprise Digitale ». Le premier déploiement de ce modèle d'usine numérique a eu lieu à Columbus, aux Etats Unis, pour ensuite être généralisé aux 77 usines du groupe d'ici fin 2017.

Le modèle d'entreprise digitale comprend quatre volets d'exploitation des données : la maintenance prédictive, la traçabilité des flux, l'automatisation via la cobotique et le contrôle centralisé des usines via l'installation de capteurs. Toutes ces données sont agrégées pour calcul par les équipes de *big data* de Faurecia, et permettent la mise en place d'un système de *business intelligence*.

- Chronologie :

Le *business intelligence* est une évolution récente des entreprises, qui semble aujourd'hui réservée aux plus grands groupes. Il suppose d'avoir déjà mis en place une mesure fine des procédés de production, et d'avoir la capacité de traiter une masse considérable de données (internes et externes).

SAP. Selon SAP, le *business intelligence* :

- A pour cause, historiquement, une baisse du coût de la mémoire vive ;
- A pour conséquence, aujourd'hui et à l'avenir, un développement rapide de la cyber-sécurité (besoin accru de protection des données).

○ Technique :

Une condition indispensable à la mise en œuvre du *business intelligence* est bien sûr que tous les systèmes générateurs de données interopèrent et communiquent entre eux. Ce prérequis nécessite la standardisation des interfaces et des protocoles de communication utilisés par les systèmes impliqués dans l'usine (automates, équipements informatiques, etc.) et hors de l'usine. Une des missions de l'Alliance pour l'Industrie du futur est de travailler sur la définition de standards pour les modèles européens d'industrie du futur (en coordination avec les autres parties prenantes européennes).

○ Relation avec les parties prenantes :

Par définition, le *business intelligence* implique de collaborer ou *a minima* de prendre en compte d'autres pourvoyeurs de données que sa propre entreprise. Il est facteur d'une intégration plus poussée avec ses fournisseurs et ses clients.

SAP. L'intégration d'un volet prédictif dans la solution de *business intelligence* proposée par SAP a conduit le groupe à nouer des partenariats avec des entreprises comme Meteo Protect, pour anticiper l'influence d'évènements extérieurs comme la météo.

Faurecia. La mise en place de la politique d'« Entreprise Digitale » comprenant les technologies de *business intelligence* de Faurecia s'est faite en partenariat avec Capgemini Consulting.

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non

Cas d'école n°5 Le *business intelligence*

Impacts économiques	Faurecia : <ul style="list-style-type: none">• Investissements nécessaires (CAPEX) : 57 millions de dollars par usine.• Evolution des coûts (OPEX) :<ul style="list-style-type: none">○ Matières et énergie : -64 millions d'euros d'ici 2020 pour Faurecia○ Autres postes de coûts affectés par l'investissement réalisé : -30 millions d'euros pour l'amélioration des processus d'ici 2020 pour Faurecia sur l'ensemble de ses usines.• Temps de retour sur investissement : 5 années pour Faurecia par usine
Impacts environnementaux	<ul style="list-style-type: none">• Evolution des consommations de matières : Faurecia : - 64 millions de tonnes de matière d'ici 2020
Sources	<ul style="list-style-type: none">• Patrice Koller, Faurecia, 2016. World Materials Forum – Digital Enterprise Impact on Material Reduction• Les Echos, 2016 « Faurecia est entré dans l'ère de l'usine numérique » https://www.lesechos.fr/14/02/2017/LesEchos/22383-147-ECH_faurecia-est-entre-dans-l-ere-de-l-usine-numerique.htm

II.6 Cas n°6 : La cobotique au service des opérateurs

Cas d'école n°6 La cobotique au service des opérateurs

Typologie	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impacts / Etapes</th> <th>Amont : conception & pilotage</th> <th>Usage : production</th> <th>Aval : maintenance & fin de vie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energie</td> <td>+</td> <td>?</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ressources</td> <td>--</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Polluants (air, eau, sol)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Tous • Entreprise(s) interrogée(s) : Safran – Isybot (start-up spécialisée dans la fabrication de cobots) – CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) – IRT Jules Verne (centre de recherche technologique mutualisé dédié au manufacturing qui vise à l'amélioration de la compétitivité industrielle) 	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie	Energie	+	?		Ressources	--	-	-	Polluants (air, eau, sol)			
	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie													
Energie	+	?															
Ressources	--	-	-														
Polluants (air, eau, sol)																	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>Les robots collaboratifs ou cobots sont nés de la volonté des industriels de réduire les troubles musculo-squelettique sur les lignes/chaines de production et d'améliorer les conditions de travail. La technologie peut être utilisée pour différents usages (cobots de contrôle ou cobot permettant d'assister les opérateurs). Les cobots ont pour but de concilier la flexibilité humaine et la performance robotique, en effet, ces technologies demandent une grande maîtrise afin de permettre un partage de l'espace de travail en toute sécurité.</p> <p>En France, trois entreprises construisent des cobots :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Isybot : start-up créée en 2015 qui se spécialise dans la fabrication de bras cobotiques collaboratifs - Sarrazin Technologies. La PME a été créée en 1948 et se spécialise dans le design, la fabrication, le test et la mise en service d'équipement de manutention. Sarrazin Technologies a créé le « Cobomanip » qui assiste l'opérateur dans la manipulation de charges pouvant aller jusqu'à 100 kilos. - RB3D. La PME a été créée en 2001, initialement dans le domaine de la conception et de la fabrication de préhenseurs électriques. Depuis 2011, RB3D fabrique des cobots et propose des systèmes d'amplification de l'effort. 																

La maturité technologique des cobots reste faible, la plupart sont encore testés en phase pilote sur les usines.

Plusieurs définitions selon les interlocuteurs semblent émerger pour qualifier les cobots :

- Un **robot** est un moyen d'automatiser une tâche complète, il ne nécessite donc pas l'intervention d'un technicien. Il peut exister de la coexistence entre l'homme et le robot qui travaillent ensemble mais sur deux tâches différentes.
- Un **robot collaboratif** est un robot qui travaille à côté de l'opérateur. Dans ce cas, l'homme et le cobot travaillent sur une même tâche mais pas simultanément.
- Un **cobot** est une technologie qui assiste l'opérateur, celui-ci le manipule avec son bras. L'homme et le cobot travaillent sur une même tâche en même temps.

La maturité technologique des cobots reste faible, la plupart sont encore testés en phase pilote sur les usines.

- Objectifs visés :

L'objectif principal de la mise en place de cobot sur les chaînes de production est de réduire la pénibilité au travail. Cela a pour conséquence directe la réduction des accidents et maladies du travail via notamment la diminution des troubles musculo-squelettiques (TMS).

- Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non
 - **Autres** : L'objectif premier est de réduire les accidents et maladie du travail.
- Date de mise en œuvre du projet

Les premiers projets faisant appel à la notion de cobotique ont émergé en 2011-2012 avec notamment le projet FUI Cobomanip entre Sarrazin Technologies, le CEA, Airbus et Areva entre autres.

Exemple n°1 : Isybot.

Le premier projet sur les cobots a débuté en 2014.

La start-up a été créée en novembre 2016 et développe des projets pilotes auprès d'industriels :

- Preuves de concepts auprès de la SNCF notamment.
- Différents secteurs notamment l'agroalimentaire.

Un pilote a été mise en place notamment pour quantifier l'usage sur le ponçage.

Exemple n°2 : IRT Jules Verne.

L'IRT Jules Verne a participé à plusieurs projets d'utilisation de cobots dans diverses industries : aéronautique, énergies, automobile et le secteur naval. Ces projets sont financés à 50% par le secteur privé et à 50% par le secteur public

Différents projets ont eu lieu :

- Projet Azimov (2012 – 2016) :
 - o Domaine d'application : aéronautique
 - o Description : l'objectif est de développer un prototype de cobot capable de réaliser des opérations d'assemblage à l'intérieur d'une structure aéronautique pour assister les compagnons dans la réalisation de leurs tâches à faibles valeurs ajoutées.
 - o Budget du projet : 1 973 000€
- Projet Fast (2013 – 2016)
 - o Domaine d'application : Automobile
 - o Objectif : Développer un système cobotique pour la préhension et le positionnement de pièces pour la filière automobile. Le but est aussi d'adapter des robots qui ne sont initialement pas capables de travailler avec l'humain (mise en sécurité de l'appareil dès qu'il y a un contact).
- Projet Mascot (débuté en nov 2016)
 - o Objectif : Compléter le projet Fast en ajoutant des opérations de vissage.
- Projet Charman (2014 – 2015)
 - o Domaine d'application : secteur naval
 - o Objectif : développer un chariot de soudage autonome, capable de se déplacer et d'ajuster automatiquement sa trajectoire sur des parois verticales et apte à faire une répartition correcte des cordons de soudure en fonction du profil du joint à souder.
 - o Budget : 730 000€
 - o

Exemple n°3 : Safran.

Panorama général du projet usine du futur de Safran :

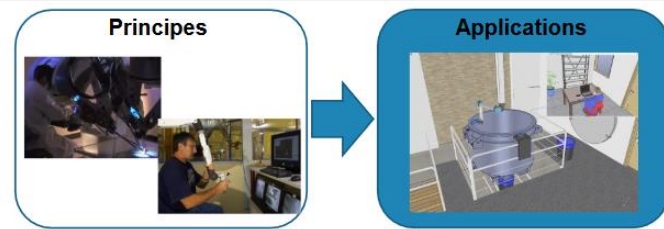
Safran a mis en place un programme Usine du Futur pour lequel l'approche est d'entrer par le produit et la performance et non pas par la technologie. C'est-à-dire chercher à améliorer la production d'un produit en y développant les technologies nécessaires. 60 lignes de produit sur 30 sites différents ont donc pu être évaluées par l'implémentation de technologies innovantes.

Le projet est récent et Safran est encore en phase d'avant-projet et de test, le déploiement est prévu prochainement.

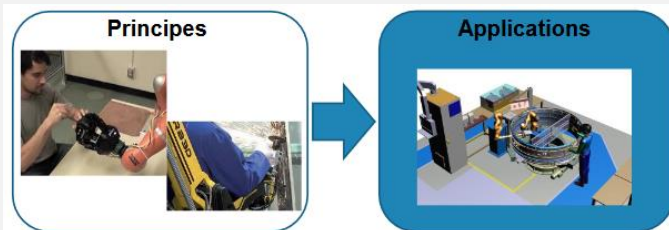
Cas cobotique

Le projet de cobotique a été développé principalement dans le but de réduire les tâches pénibles et les accidents du travail, les cobots prennent en charge les tâches répétitives, à risques pour l'opérateur et/ou complexes. Une quinzaine de projets, en stade pilote, ont été lancés au sein du groupe Safran. Les technologies implémentées par Safran en cobotique sont :

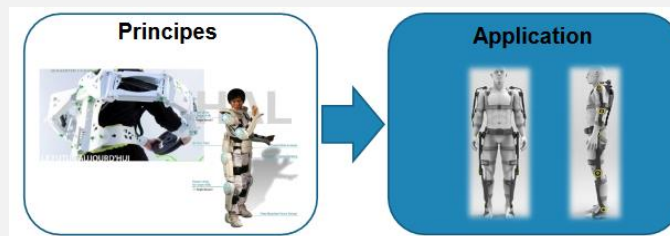
- Le pilotage à distance ou téléopération : La téléopération est un ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action (observation, manipulation) en temps réel à distance grâce à des retours sensoriels



- La manipulation directe ou comanipulation : manipulation directe du robot par l'opérateur. Il s'en saisit à l'aide ou non de poignées, par l'effecteur ou une autre de ses parties pour le piloter



- L'assistance par un exosquelette : Un exosquelette est un robot revêtu par l'opérateur. Il peut assister les membres inférieurs, les membres supérieurs ou les deux. Le plus souvent, il est utilisé pour diminuer les efforts fournis par les opérateurs, lors de maintenances par exemple. Ils peuvent également servir pour aider au maintien statique de l'opérateur.



Impacts économiques

- Evolution des volumes produits :

La cobotique n'a pas comme vocation première l'augmentation des volumes produits mais peut apporter une certaine fiabilité dans l'exécution des processus de fabrication. L'implantation des cobots va permettre d'améliorer la performance industrielle en gagnant en flexibilité grâce à leur mobilité (il n'y a pas de cellules grillagées), mais aussi d'augmenter la productivité et la qualité en s'affranchissant des limites liées aux capacités humaines.

IRT Jules Verne.

Les cobots permettent d'augmenter la production de 50 à 60 % sur les postes sur lesquels ils ont été introduits.

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Pour un industriel, le coût pour installer des cobots déjà développés est de :

- Cobot à assistance fixe : entre 60 000 et 80 000 €. Avec les équipements associés tels que l'informatique, cela peut atteindre 100 000 € ;
- Cobot mobile : 150 000 €.

Il reste cependant important de noter que le prix des cobots reste inférieur à celui de l'installation d'une cellule robotisée.

Safran.

La prise en compte de la cobotique et plus généralement des technologies et organisation de la production associées à l'industrie du futur intervient dans le cadre d'un plan d'investissement de plusieurs millions d'euros à l'échelle du groupe.

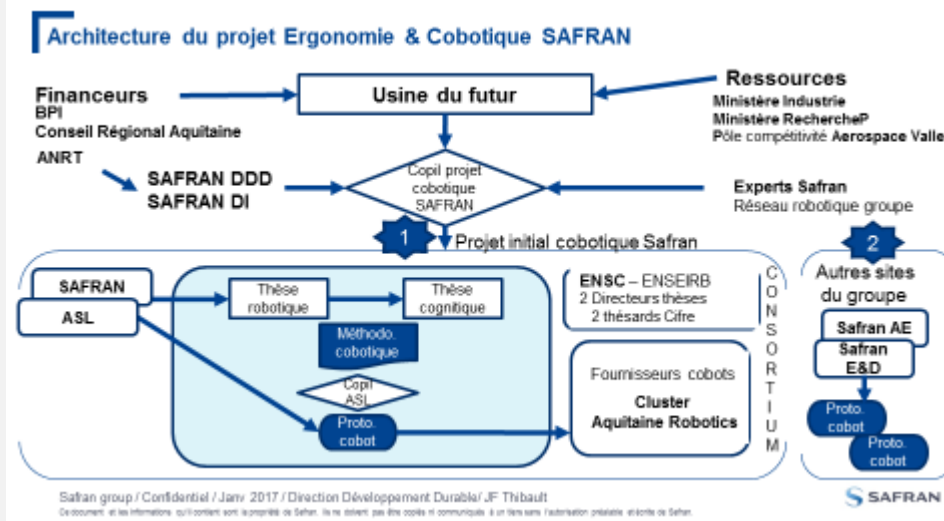


Figure 25 : Architecture du projet Ergonomie & Cobotique SAFRAN

- Evolution des coûts (OPEX) :

Safran.

L'investissement réalisé dans la prévention des risques en général et en particulier pour la mise en place de cobot permet pour 1 € investi de générer des gains sur le long terme estimés à 2,20 €. Ces gains restent difficiles à isoler car insérés dans un plan d'amélioration global. Il faut rappeler que le facteur déclencheur de ces projets est avant tout l'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité au travail

- Temps de retour sur investissement :

Le temps de retour sur investissement est estimé entre 12 et 24 mois.

Impacts environnementaux

- Evolution des consommations de matières :

La cobotique peut permettre dans certains la réduction des matières utilisées. Sur le ponçage notamment, l'utilisation d'une machine plus efficace peut aider à réduire la quantité de disques abrasifs utilisée.

- Impacts environnementaux directs de la technologie (numérique) implémentée :

Isybot.

Les cobots Isybot ne consomment que très peu d'énergie : moins d'un kW en utilisation nominale.

- Evolution du nombre d'ETP (à volume produit équivalent) :

L'installation des cobots va permettre d'augmenter la productivité : une machine pourra effectuer le travail d'un opérateur environ qui pourra alors effectuer des tâches moins difficiles et plus valorisables. Selon les cas d'utilisation, un cobot peut alors représenter jusqu'à 8 personnes.

L'enquête annuelle réalisée par le CETIM⁴¹ a permis de mettre en évidence certaines tendances quant à l'implémentation de robots dans des PME :

- Le robot a permis d'augmenter la productivité de 84 % des entreprises et la rentabilité de 74 % ;
- Aucune suppression de poste n'a été annoncée et on compte 5 à 7 % de création de postes. De plus, suite à l'intégration de la cellule robotique, 84 % des entreprises interrogées souhaitent investir.
- Evolution des conditions de travail :
 - Sécurité :

Il est difficile d'évaluer seul l'impact de la cobotique sur la sécurité au travail (peu de retour dû à la faible maturité technologique) et la cobotique a souvent été mise en parallèle de mesures complémentaires.

La cobotique va permettre d'améliorer les conditions de travail des personnes en éliminant les tâches difficiles et répétitives (exemple du ponçage) qui peuvent entraîner des TMS ou accident du travail.

A titre indicatif, les accidents du travail représentent 1 milliard d'euros en termes de jours remboursés par la sécurité sociale (principalement des TMS) et 2,5 à 3 fois plus en termes de perte de productivité pour l'entreprise. Au-delà de la personne blessée, il faut prendre en compte la reformation des personnes et le recrutement pour les entreprises. Par exemple, une invalidité permanente coûte 80 000€ pour une épaule.

Ces efforts ont pour conséquence de faire monter en compétence les employés sur des tâches à plus haute valeur ajoutée tout en revalorisant leur travail.

Safran.

Les cobots ont été installés dans le but de réduire les accidents du travail et maladie du travail. Dans le cadre du Programme de développement de l'Ergonomie dans le groupe Safran, programme mis en œuvre depuis 2013 et qui associe entre autre des solutions en cobotique, on peut retenir ces chiffres :

⁴¹ CETIM (décembre 2016), Bilan intermédiaire de l'action Robot Start up PME. Fin 2016, le cabinet Multivalente a mené une étude quantitative complétée d'une étude qualitative auprès de plus de 80 PME participantes à l'action Robot Start PME ; 46 réponses ont été exploitées dont 27 ont fait l'objet d'entretien en présence dans l'entreprises auprès du dirigeant et des employés.

Cas d'école n°6 La cobotique au service des opérateurs

- Réduction de 43 % des TMS depuis le début du programme ;
- Réduction de 49 % des accidents du travail sur la manutention manuelle depuis le début du programme.

- Accueil de la technologie par les salariés :

L'accueil de la technologie va fortement dépendre de la propension d'acceptation du changement des employés. Il est important de rappeler que des longs processus sont souvent mis en place en amont pour habituer les opérateurs à travailler avec des robots ou des cobots.

Cependant concernant les cobots, les salariés (opérateurs) vont accepter plus facilement leur installation sur les chaînes de production car ils vont aider à une amélioration de leurs conditions de travail.

- Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place :

Isybot.

Isybot met en place une formation de trois heures à une journée pour préparer les opérateurs à travailler avec les cobots.

Safran.

Des formations sont mises en place pour faciliter l'accueil des cobots sur les lignes de production :

- Phase de pilote (6 mois) : les opérateurs sont associés pour chaque étape de mise en place du cobot avec des simulations en RV/RA puis la création d'un démonstrateur échelle 1 pour intégrer les technologies.
- Phase d'industrialisation (6 mois à 1 an) : formation au poste de travail.

Perspectives

- Bonnes pratiques :
 - Action des pouvoirs publics pour favoriser la généralisation de ce cas d'école ?

Actuellement, les fabricants de cobots en France sont en manque de financement pour l'industrialisation de leur produit et à ce jour il n'existe aucune filière spécialisée dans la cobotique pour accompagner le financement de projet de cobotique.

Sources

- <http://www.medtra.fr/troubles-musculo-squelettiques-coutent-annee-1-milliard-deuros/>
- Le projet cobotique chez Safran, JF Thibault, 2016
- Théo MOULIERES-SEBAN, David BITONNEAU, Jean-François THIBAUT, Jean-Marc SALOTTI, Bernard CLAVERIE (2016). La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome, in Actes du 51ème Congrès de la SELF, Marseille, p.612-623.
- Théo MOULIERES-SEBAN, David BITONNEAU, Jean-François THIBAUT, Jean-Marc SALOTTI, Bernard CLAVERIE (2016). Human factors issues for the design of a cobotic system, in Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems, Eds Springer, p.612-623.
- Les robots s'intègrent dans l'usine du futur, 16 septembre 2015, CEA

- Bilan intermédiaire de l'action Robot Start up PME, décembre 2016, CETIM

II.7 Cas n°7 : La fabrication additive sable

Cas d'école n° 7 La fabrication additive sable

Typologie	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impacts / Etapes</th> <th>Amont : conception & pilotage</th> <th>Usage : production</th> <th>Aval : maintenance & fin de vie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energie</td> <td></td> <td>--</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ressources</td> <td></td> <td>++</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Polluants (air, eau, sol)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Fonderies pour les secteurs automobile, aéronautique, industrie générale Entreprise(s) interrogée(s) : Fédération Forges et Fonderies, Fonderie Boutté, Voxeljet 	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie	Energie		--		Ressources		++		Polluants (air, eau, sol)			
	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie													
Energie		--															
Ressources		++															
Polluants (air, eau, sol)																	
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>Les chiffres varient suivant les études, mais on peut garder en mémoire que l'impression 3D est un marché global de 10Mds d'euros en 2018, en hausse de 15 à 20 % par an. Les secteurs de l'automobile (15 %), la santé (15 %), aéronautique (20 %), l'industrie générale (20 %) et la bijouterie (10 %) sont les plus gros marchés en 2014. L'impression 3D devrait représenter un marché de 1,1 milliard de dollars dans l'industrie automobile à l'horizon 2019, avec une croissance annuelle de l'ordre de 20 % sur les cinq prochaines années.</p> <p>Le secteur de l'automobile représente notamment 80 % du marché d'impression 3D sable. On y trouve le développement de culasses et de turbos avec des séries allant de 1 à 100 pièces. L'impression 3D s'applique également à la conception de pièces de fonderie innovante (pivots de roue) avec un design optimisé. Les grands constructeurs automobiles ont investi dans des machines de fabrication additive peu après leurs mises sur le marché pour du prototypage ou du développement rapide de produits.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Exemple n° 1 : Voxeljet.</p> <p>En Allemagne, 40 machines sont en fonctionnement et produisent essentiellement des noyaux et moules pour la production de pièces de fonderies, dans les secteurs de l'automobile (65 % pour des pièces de moteurs, turbos, etc.), de l'aéronautique (5 %) et de l'énergie</p> </div>																

(30 % pour des pompes spéciales, etc.). Le secteur aéronautique est en croissance. Les besoins concernent des pièces de présérie, de prototypage. La complexité est limitée car la production série passe par des moules traditionnels.

○ Historique :

La fabrication additive est une expression normalisée (norme NF E67-001 en 2010) « Ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ». Comme le précise l'ASTM F42 aux USA, la fabrication additive s'oppose aux procédés traditionnels de conception par enlèvement ou déformation de matière.

Les premiers brevets déposés datent des années 80 (CNRS notamment). On compte moins d'une dizaine de procédés différents de fabrication additive, qui ont tous été mis au point progressivement dans leur version industrielle depuis les années 2000. Ces procédés sont tous en cours d'optimisation. Les travaux portent sur de nombreux paramètres tels que la taille des pièces, les temps de production, l'utilisation de matières, l'énergie utilisée, le passage de la pièce prototype à la pièce de série, les qualités techniques des pièces produites, ... L'optimisation des coûts pour préparer le passage à la production de pièces en séries induit des changements matières, liants et systèmes diminuant la performance des machines.

Les premières fabrications additives sable ont été réalisées en 1999 au sein de l'entreprise Generis GmbH fondée par Ingo Ederer, actuel président de Voxeljet. Concernant les concepteurs de machines de fabrication additive sable, on peut citer les entreprises suivantes : VOXELJET (All), EOS (All), STRATASYS (Israël), SOLIDSCAPE (Israël), 3DSYSTEMS (US), EXONE (US), 3DGEOMETRY (Inde), etc.

Voxeljet : A titre d'exemple, l'Allemagne compte 2000 fonderies et 40 machines Voxeljet sont en fonctionnement. En France, 300 fonderies existent, avec 3 machines en fonctionnement industriel (Fonderie Boutté, Danielson Engineering, Fonderie Ventana). Le recul est très faible.

○ Technique :

La fabrication additive sable se décompose en 3 phases :

1/ Conception de la pièce en CAO et définition d'un objet virtuel

2/ Mise en place de l'objet dans l'environnement virtuel de la machine de fabrication additive

3/ Fabrication du modèle par superposition de couches successives de matières

La principale application des pièces en sable concerne les noyaux pour les moules de fonderie. En effet, **la fabrication additive permet de réaliser des noyaux très complexes sans avoir recours à une maquette ou un outillage.** Les liants utilisés pour le sable sont des résines furaniques, phénoliques ou inorganique (moins utilisée en fonderie).

Les procédés de FAS ne sont pas exclusivement réservés au matériau « sable » :

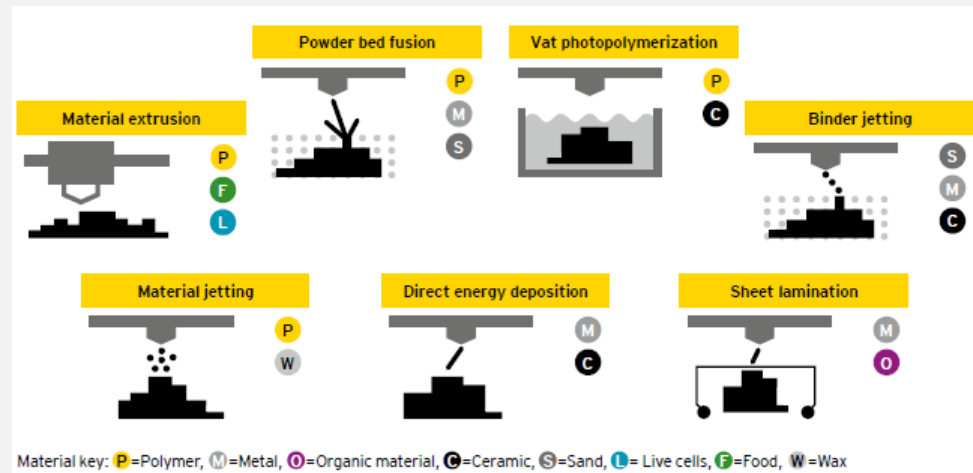


Figure 26 : Procédés FAS

Tableau 18 : Trois procédés sont utilisés en priorité par les constructeurs de machines

Famille de procédés	Matériaux	Avantages	Inconvénients
Binder Jetting (BJ) (projection de liant)	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Métaux Minéraux (sable, pierre...)	Nombreux matériaux disponibles Supports non nécessaires Vitesse de fabrication Matière peu chère Faible énergie consommée Peu de limites dans la taille des pièces	Prix des machines élevé Précision et rugosité inférieures aux autres technologies
Fusion Bed Powder (FBD ou SLM ou DMLS)	Métaux, plastiques, sable, ...	Nombreux matériaux disponibles Supports non nécessaires	Coût des poudres Prix des machines élevé

Cas d'école n° 7 La fabrication additive sable


(Fusion de matière sur un lit de poudre)			Prototypage Besoin d'énergie / laser Taille des pièces limitée
<i>Stéréolithographie (SLA) (Polymérisation d'une résine par un laser+UV)</i>	<i>Photopolymères (possibilité d'inclure des charges métalliques ou céramiques), Cire</i>	<i>Pièces de dimensions petites et moyennes Besoin de traitement UV des pièces Etat de surface</i>	<i>Procédé indirect de création du moule en sable Support de la pièce parfois compliqués à retirer</i>

Remarque : le frittage par laser (DMLS) de poudres à base de sable est arrivé il y a peu de temps sur le marché (EOS par exemple en 2014) avec la particularité de réaliser directement le moule et le noyau en sable, sans passer par la réalisation d'outillages ou de boîtes à noyaux. Plus récemment, Voxeljet et Exone se sont positionnées sur ce segment porteur grâce au procédé de projection de liant (BJ). Cette technologie permet de réaliser rapidement des moules en sable de grandes dimensions (par opposition au frittage).

Les machines de fabrication additive sable (FAS) peuvent utiliser les poudres suivantes :

- Céramiques (secteur d'avenir, mais R&D à faire sur les poudres et les liants)
- Sable de silicate (Ceramics 5.2 chez EOS)
- Sable de quartz (Quartz 4.2 chez EOS, Voxeljet) => le plus communément utilisé en fonderie avec différentes granulométrie selon la finition souhaitée.
- Béton (secteur d'avenir mais R&D à faire sur les poudres et les liants)
- Cellulose
- Etc.

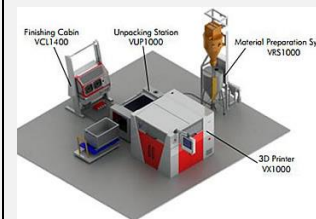
Tableau 19 : Exemples de machines

<p>EOS 3d Sable EOSINT S 750 Ceramics 5.2 et Quartz Matière : Quartz Epaisseur : 200 µm</p>	
--	---

Vitesse : 2,500cm³/h
 Procédé : Laser Sintering
 Taille des pièces : 720 mm x 380 mm x 380 mm

Voxeljet 3d Sable

VX1000
 Matière : plastic, sand
 Epaisseur : 100 - 300 µm
 Résolution : 600 dpi
 Vitesse : 36 mm/h
 Procédé : Binder Jetting
 Taille des pièces : 1060 x 600 x 500 mm



- Relations avec les parties prenantes :

La FAS est très récente. Le parc de machines installées est encore très faible. Les constructeurs sont donc poussés à maintenir deux activités :

- Production de pièces sur commande
- Vente de machines de FAS

Les travaux d'optimisation des machines sont réalisés souvent en partenariat avec des structures publiques ou privées, via des programmes collaboratifs. L'installation de machines dans les centres de formation permet de diffuser peu à peu les machines de FAS dans l'industrie.

Fonderie Boutté : La fonderie Boutté s'intéresse à la FAS depuis 2008. Boutté produit des pièces en acier essentiellement pour l'automobile. Tout d'abord cliente de Voxeljet, Boutté s'est équipé d'une machine de FAS en 2015. Elle a pu collaborer avec des clients pour produire de nouvelles pièces en prototypage rapide (turbos pour l'automobile). Le projet a été soutenu par la région Hauts de France et BPI.

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non

Cas d'école n° 7 La fabrication additive sable

- Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
- Réorganisation du travail : Oui / Non

- Evolution des volumes produits :

Les gains de productivité sont de plusieurs niveaux. Les utilisateurs de machines FAS investissent pour gagner des parts de marché, diversifier l'activité, se repositionner, proposer des pièces à plus fortes valeur ajoutée, diminuer les temps de livraison des clients. Ceci est permis grâce aux caractéristiques suivantes de la FAS :

- Obtention plus rapide de formes très complexes ;
- Permet de s'affranchir de l'étape de production de boîtes à noyaux et de disposer en moins d'une semaine de toutes les parties du moule nécessaires. Une pièce fabriquée en FAS peut remplacer 15 pièces produites via des procédés traditionnels ;
- Suppression des stocks et fabrication à la demande de moules et noyaux ;
- Gain de temps par suppression d'outillage pour mettre en forme les moules.

Fonderie Boutté : la machine de FAS permet de produire des pièces comportant des noyaux multiples. Auparavant, les risques de casse dimensionnelle étaient très élevés. La machine de FAS a permis de diminuer drastiquement les rebus et le temps consacré à la production des pièces.

Voxeljet : les clients investissent pour gagner en rapidité de production de pièces prototypes ou de petites séries et pour augmenter la complexité des pièces. Quand une entreprise installe une machine de FAS, elle ne peut pas produire les mêmes pièces de façon compétitive avec des procédés traditionnels.

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Les machines de FAS sont relativement chères. Leur prix avoisine 1Me pour des pièces de 1mX500X500mm.

Fonderie Boutté :

CAPEX : l'investissement dans la machine de FAS s'est élevé à 750keHT décomposé ainsi :

- La machine de FAS = 650k€.
- L'installation, le local, la formation, ... = 100k€

Le financement a été réalisé pour 450ke via de la dette, pour 100k€ par une aide région, et pour 100ke par une subvention BPI/PRI « programme faisabilité »

OPEX : L'embauche d'un technicien de production a couté 45k€. Les matières utilisées pour la machine de FAS représentent 50k€HT (résines, nettoyant, sables).

Impacts économiques

Impacts environnementaux

- Evolution des consommations de matières :

Les machines de FAS sont destinées à la production de pièces nouvelles, plus complexes. Elles ne remplacent pas à l'heure actuelle les procédés classiques en place. Il est difficile de ce fait d'évaluer l'évolution des consommations de matières.

- Evolution des consommations d'énergie :

L'installation d'une machine de FAS impacte assez peu le bilan énergétique d'une fonderie. Plus de 80 % de l'énergie est consommée pour alimenter les fours de fusion de métaux et alliages.

Fonderie Boutté : L'énergie consommée représente 5 à 10 k€/an, soit 1 €/h pour 4000 h/an de fonctionnement. La consommation d'énergie est très négligeable par rapport aux installations réalisant les coulées de métaux.

- Evolution des rejets de polluants (air, eau, sol) :

Le niveau de pollution lié à l'utilisation de machines de FAS varie selon les procédés utilisés. Les procédés consommant des résines de type furaniques sont plus polluantes que les résines phénoliques. Des procédés de type Binder Jetting sont peu générateurs de polluants. Les procédés de FAS n'utilisent pas d'eau pendant le cycle de production. L'eau est utilisée pendant le cycle de nettoyage en quantité négligeable.

- Impacts directs environnementaux de la technologie (numérique) implémentée :

La FAS utilise des sables déjà utilisés dans les activités traditionnelles de fonderies. Les liants (phénol, furane) sont les matières polluantes. En Allemagne, la tendance va à l'utilisation de liants inorganiques à base d'eau (moins polluants).

Voxeljet : les machines de FAS sont très récentes dans l'industrie. Il n'y a pas d'étude représentative de leurs impacts environnementaux. Les dégagements gazeux sont très faibles pendant la phase de conception, voire nuls.

Tous les process de FAS n'ont pas la même empreinte environnementale. Voxeljet utilise le procédé BJ. La résine (phénolique ou furanique) injectée représente moins de 5% du poids de la pièce. Les rejets de gaz dans l'air sont très faibles. Le sable utilisé en FAS coûte 0,1€/kg. Les procédés de stéréolithographie ont un coût de matière (résine) de 200€/kg. Le procédé de frittage sélectif par laser consomme un mélange de poudre qui coûte environ 1000€/kg, sans compter l'énergie à apporter pour faire fonctionner le laser.

Fonderie Boutté : L'étude d'impact environnemental est à faire. Pour le moment, les résines sont en cours de stabilisation avec le fournisseur, qui les optimise en vue de produire des pièces en plus grande série. « C'est la mauvaise surprise de la machine ». Les premières productions étaient faites avec des résines phénoliques de laboratoire, donc idéales, mais non adaptée à la production industrielle (coût trop élevé). La réglementation évolue en 2017 et oblige à avoir des machines capotées, équipées de filtres à charbon. Boutté observe cependant que la FAS consomme moins de résine pour un même volume de pièce (5% du poids de la pièce). Les moules étant moins chargés en résine, les dégagements gazeux lors de la phase de coulée sont donc plus faibles.

<p>Impacts sociaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution du nombre d'ETP (à volume produit équivalent) : <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Fonderie Boutté : Depuis 2015, l'introduction de la machine de FAS a permis de créer 1 poste de technicien de production, 2 postes de techniciens en BE (compétences sur Solidworks, MAGMA, ...).</p> <p>Avec le développement de l'activité via la machine de FAS, Boutté prévoit de recruter 1 contrôleur qualité et 1 chargé d'affaires.</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • Evolution des conditions de travail : <ul style="list-style-type: none"> ○ Sécurité : Il est difficile de mesurer l'impact de l'utilisation des machines de FAS sur la sécurité du travail. Les opérateurs sont protégés par des installations capotées. Les interventions manuelles sont très réduites. • Accueil de la technologie par les salariés : L'introduction d'une machine de FAS provoque plusieurs types de réactions : <ul style="list-style-type: none"> ○ Y-aura-t-il des suppressions d'emplois ? ○ L'investissement n'est-il pas démesuré ? ○ Comment l'entreprise va-t-elle évoluer / se réorganiser ? ○ Quelles sont les perspectives réelles ?
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Fonderie Boutté :</p> <p>L'investissement sur la machine de FAS a permis de sauver l'entreprise. Le marché de la fonderie est extrêmement concurrentiel. Boutté s'est servi de la machine de FAS pour repositionner son activité. Schématiquement, le marché s'organise ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les productions de pièces en grandes séries sont faites à l'étranger (ancien positionnement) - Les productions de préséries sont accessibles pour Boutté (nouveau positionnement) - Les productions de prototypages rapides complexes sont accessibles pour Boutté (nouveau positionnement) <p>Ce repositionnement a permis de passer d'un CA de 4,8 M€ à un CA de 5,5 M€, ce qui représente une augmentation de 15 % sur 90 % de pièces nouvelles, et une augmentation de 5 % en volume de pièces produites.</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place : <p>L'introduction d'une machine de FAS modifie les compétences, réintègre des compétences perdues (par ex. BE CAO) et redistribue les activités de conception, production et vente. Les différentes phases d'impression 3D nécessitent des ressources dédiées et de nouvelles compétences ou ressources (CAO, maîtrise du process FAS, production, maintenance de l'installation, traitement de demandes originales de clients, ouverture de nouveaux marchés).</p>
<p>Perspectives</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bilan de l'investissement réalisé : <ul style="list-style-type: none"> ○ Satisfaction d'ensemble : Forte

Fonderie Boutté : la satisfaction est totale. Les difficultés de stabilisation des résines sont vécues comme nécessaires et vectrices de nouvelles opportunités de marchés. Boutté envisage d'acheter une seconde machine pour produire des pièces plus grandes (2,000 x 1,000 x 1,000 mm).

- Bonnes pratiques :
 - Des conditions / prérequis ont-ils été identifiés pour minimiser les impacts de la technologie implémentée ? Non
 - **A quel point la technologie est-elle répliquable dans d'autres secteurs industriels ? Moyennement répliquable.** Les machines de FAS permettent de produire des pièces complexes pour les usages de la fonderie principalement. D'autres usages peuvent apparaître, en particulier, dans le bâtiment, ou, dans d'autres marchés ouverts par l'extension de la variété des pièces (pots catalytiques pour l'automobile, filtres dans l'aéronautique, ...) mais les procédés ne sont pas encore stabilisés industriellement.
 - ➔ D'autre part, pouvoir produire des pièces en séries est un enjeu majeur pour les constructeurs de machines et une attente des utilisateurs. Les machines de FAS sont encore trop confinées au prototypage.
 - ➔ Il est à noter que le coût des machines reste encore très élevé, ce qui limitera la diffusion des machines de FAS dans d'autres secteurs d'activité.
 - Que pourraient faire les pouvoirs publics pour favoriser la généralisation de ce cas d'école ?
 - ➔ Les industriels attendent des pouvoirs publics un soutien continu du marché de la métallurgie en France. L'appui de BPI a été très important pour la Fonderie Boutté. Le cas de Boutté n'est pas isolé. D'autres industriels pourraient avoir des envies d'intégrer de nouveaux moyens innovants, mais sont bloqués par le niveau de l'investissement.
 - ➔ Une autre attente vient du besoin de diffuser ces technologies dans les structures de formation et les plateformes techniques. Là aussi, un soutien public est attendu.

Sources

- Etude Wohler Associates (2014), Additive Manufacturing
- Etude ATKearney (2015), 3D Printing : A Manufacturing Revolution
- Etude Pipame (2017), <http://www.entreprises.gouv.fr/etudes-et-statistiques/futur-fabrication-additive-pipame>
- Etude CNRS (2014), Historique_de_l_impression_3D_Serge_CORBEL_CNRS
- Etude Roland Berger (2016), additive_manufacturing_next_generation_amnx_study_20160412
- Etude EY (2016), ey-global-3d-printing-report-2016-full-report
- Voxeljet (2017), <http://www.voxeljet.com/>
- Fonderie Boutté (2017), <http://www.fonderieboutte.fr/>
- Forge&Fonderie (2017), <https://www.forgefonderie.org/>

II.8 Cas n°8 : La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

Cas d'école n° 8 La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

Typologie	<p>Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Impacts / Etapes</th> <th>Amont : conception & pilotage</th> <th>Usage : production</th> <th>Aval : maintenance & fin de vie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Energie</td> <td>-</td> <td>++</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ressources</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Polluants (air, eau, sol)</td> <td>+</td> <td>+</td> <td>+</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : Tous • Entreprise(s) interrogée(s) : Ffly4u (start-up créée en 2015 qui propose des solutions pour connecter les objets) – Editag – Engie – Entreprise du secteur automobile (ayant voulu rester anonyme) 	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie	Energie	-	++		Ressources	+	+	-	Polluants (air, eau, sol)	+	+	+
	Impacts / Etapes	Amont : conception & pilotage	Usage : production	Aval : maintenance & fin de vie													
Energie	-	++															
Ressources	+	+	-														
Polluants (air, eau, sol)	+	+	+														
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>L'identification électronique peut couvrir de nombreux domaines : suivi de la production et de la maintenance, l'asset tracking, suivi de procédé.</p> <p>L'identification électronique peut se décomposer en deux branches :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'identification à contact : l'alimentation et la communication sont assurés par des contacts électriques ; • L'identification sans contact. 																

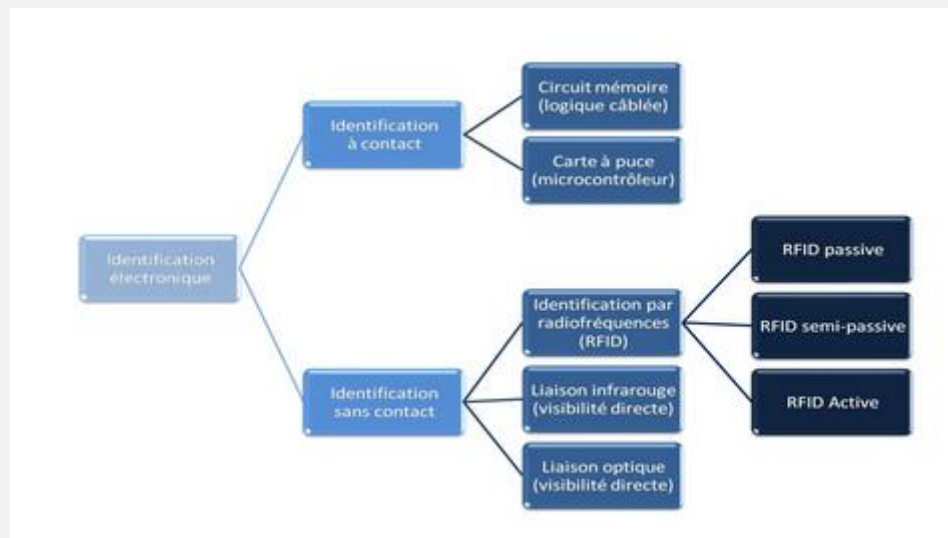


Figure 27 : Description des techniques d'identification électronique

La RFID (Radio Frequency IDentification) est une technologie d'identification automatique qui utilise le rayonnement radiofréquence pour identifier les objets porteurs lorsqu'ils passent à proximité d'un interrogateur. Il existe plusieurs fréquences radios utilisées par la RFID.

Un tag RFID est généralement composé d'une puce électronique associée à une antenne. Les informations contenues dans la puce électronique vont fortement dépendre de l'application et ces données pourront être simplement lues par un lecteur ou modifiées selon les cas d'utilisation.

Exemple 1 : Engie. Le groupe Engie et ses filiales ont développé plusieurs projets utilisant la RFID :

- **Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire** : Dans le cadre des directives SEVESO et afin de renforcer sa sécurité, le site a procédé à la mise en place de 500 capteurs (RFID active) qui permettent de couper le déchargement des méthaniers dans un délai de moins de 10 secondes en cas de fuite détectée sur les canalisations. La surface totale du site industriel est de 2,6 km² pour 30 km de longueur de canalisation. Des capteurs sont positionnées tous les 10 mètres.
- **Suivi des maintenances pour les ouvrages soumis à maintenance.** Les robinets de gaz doivent être inspectés et maintenus dans un délai de 1 à 5 ans. Des tags RFID ont été installés afin de pouvoir transmettre des informations sur le fonctionnement du robinet en cas d'intervention, la dernière date de maintenance, les actions en cours. Cela permet aux différents organismes : la maintenance, ERDF ou les services d'urgence en cas d'incident d'accéder à ces éléments.
- **GRDF : Suivi de compteurs industriels.** Les compteurs de gaz destinés aux industriels doivent être étalonnés tous les 5 ans. Ils sont pour cela démontés, et remontés parfois sur d'autres sites. Ces informations sont suivies via un carnet métrologique qui est obligatoire pour chaque compteur, ces carnets papiers ont été remplacés par un tag RFID.

- **GRDF Eliot.** Ce projet vise à localiser les canalisations de gaz enterrées afin de pouvoir intervenir en cas de travaux mais aussi d'obtenir une traçabilité des matériaux utilisés dans les canalisations.

Exemple 2 : Entreprise dans l'industrie automobile

- De nombreux projets visent à tracer les pièces critiques via des systèmes de code barre, de fichiers numériques associés ou de Balogh depuis plus de 15 ans. Les données sont ensuite stockées dans des bases de données ou envoyées vers des infos services.

○ Chronologie :



Figure 28 : Historique de la RFID

Depuis 2015, on commence à entendre parler de l'internet des objets et notamment l'internet des objets industriels. Depuis 2017, beaucoup d'entreprises se mettent à l'utiliser plus fortement et on observe un véritable tournant dans les usages des entreprises. Ces nouvelles solutions permettent de réaliser aussi bien le suivi des biens matériels que des processus qui s'y rattachent.

Engie.

- Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire : Le projet est opérationnel depuis avril 2017.
- Suivi des maintenances pour les ouvrages soumis à maintenance. Le pilote est actuellement en cours en France.
- GRDF : Suivi de compteurs industriels. Le projet a été lancé début 2017
- **GRDF Eliot.** Le projet a commencé en juin 2016.

○ Technique :

Il existe plusieurs types de RFID :

- RFID passive : le tag n'intègre pas d'émetteur RF et il utilise généralement l'onde émise par le lecteur pour alimenter le circuit électronique embarqué. ;

Cas d'école n° 8 La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

- RFID semi-passive (ou assistée par batterie) : le tag comporte une alimentation embarquée qui sert à alimenter le circuit électronique sans la présence du lecteur. Cette technique est principalement utilisée pour des applications ayant besoin de données ponctuelles (capteur de température, lumière, etc.). Le lecteur permet tout de même d'alimenter le transfert de données ;
- RFID active : le tag intègre un émetteur RF et la communication est bidirectionnelle. Une source d'énergie de type pile ou batterie est requise.

Les différentes classes de tag :

Il existe plusieurs classes de tags RFID ayant des fonctionnalités différentes :

Classe	Nom	Descriptif
Classe 0 et 1	Tags passifs à lecture seule	On ne peut lire que l'identifiant unique du tag
Classe 2	Tags passifs à fonctionnalités additionnelles	Capacité d'écriture mémoire
Classe 3	Tags passifs assistés par batterie	
Classe 4	Tags actifs	Communication large-bande du type « peer-to-peer »
Classe 5	Interrogateurs	Alimentent les tags de classe 0, 1, 2 et 3. Ils communiquent avec les tags de classe 4.

Tag à lecture seule ou lecture/écriture :

Chaque puce doit au moins contenir un identifiant numérique afin de reconnaître la puce à la lecture. Ce numéro est gravé par le fondeur de la puce. Dans ce cas, une fois le numéro identifié, l'opérateur doit se connecter au système d'informations de l'entreprise pour obtenir plus d'information.

Cas d'école n° 8 La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

Dans certains cas, l'opérateur a besoin de plus d'informations que le simple identifiant, des puces possèdent donc des zones de mémoire vide où on peut écrire des données, par exemple un UII (Unique Item Identifier) ou un code EPC (Electronic Product Code). Si ce numéro n'est plus modifiable, on parle de puce WORM (Write Once, Read Multiple).

Pour d'autres applications, il faut une zone mémoire modifiable et accessible. Les puces peuvent être alors de type MTP (Multiple Time Programmable) et possèdent généralement une mémoire de type EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory).

Fréquence	125 et 134,2 kHz LF	13,56 MHz HF	868 à 915 MHz UHF	2,45 et 5,8 GHz SHF
Portée typique max	0,5 m	1 m	3 à 6 m	1 m
Caractéristiques générales	-Relativement cher même par gros volumes - L'antenne nécessite un nombre de tours important - Faible dégradation des performances en milieu métallique ou liquide	-Moins cher que les tags LF - Bien adapté aux applications qui ne demande pas de lire beaucoup de tags à grande distance -Fréquence unique dans le monde	-En gros volume, les tags UHF sont moins chers que les tags HF et LF - Adapté à la lecture en volume à longue distance - Performances dégradées par rapport à la HF en milieu métallique ou aqueux	-Performances similaires à l'UHF - Très forte sensibilité aux métaux et liquides - Liaison lecteur/tag plus directive que pour les fréquences plus basses
Principales Normes	ISO 14223/1 ISO 18000-2	ISO 14443 ISO 15693 ISO 18000-3	ISO 18000-6	ISO 18000-4

Tableau 20: Quelques caractéristiques de tag passif

Le développement de l'IoT et de la RFID :

Récemment, l'apparition de l'IoT favorisée par la baisse des prix des composants électroniques et l'arrivée sur le marché d'opérateurs tels que Sigfox ou LoRa a permis de réduire fortement les coûts de connexion et de pouvoir suivre en temps réel des actifs mobiles.

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non

Impacts économiques

- Evolution des volumes produits :

Editag.

L'industriel va chercher à diminuer ses coûts grâce à l'utilisation de cette technologie. Réduction qui peut se traduire aussi bien par une utilisation moindre de matériaux ou une productivité accrue.

Un des intérêts majeurs de cette technologie est la gestion de parcs afin de :

- Réduire la taille du parc
- Augmenter le taux d'utilisation du parc
- Diminuer le coût de non disponibilité du parc.
 - Ex : bac en plastique
 - Diminution de pertes opérationnelles
- Augmenter la fluidité et diminuer la consommation de ressources : en collectant l'information et en optimisant les processus.

Les taux d'amélioration et la réduction des stocks sont évalués entre quelques % et 20 %. On peut expliquer cette variation par le nombre de site, le nombre d'acteurs concernés, les quantités mais aussi les livraisons à effectuer.

- Investissements nécessaires (CAPEX) :

Engie.

- **Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire** : Le prix est aux alentours de 100 € pour un objet connecté, auquel il faut ajouter le prix de la certification. De plus, pour une surface de 1000 m², il faut au moins 3 antennes qui ont un prix unitaire de 5 000 €. Les batteries des capteurs ont une durée de vie de 14 ans mais la garantie est limitée à 10 ans. Au bout de 10 ans, il faut donc renouveler les capteurs.
- **Suivi des maintenances pour les ouvrages soumis à maintenance**. Le prix objectif du tag RFID est de 3 € et on compte en France 1,1 millions d'ouvrages à maintenir. La durée de vie de ces tags est de 50 ans.
- **GRDF : Suivi de compteurs industriels**. Les prix des tags sont à la discrétion des fabricants de compteurs mais coûtent généralement entre 4 et 10 €. 220 000 tags seront installés tous les 5 ans. 70 000 compteurs seront dans un premier temps déployés en 2017.
- **GRDF Eliot**. Le prix du tag est compris entre 10 et 11 €. L'objectif à terme du projet est de couvrir 200 km de réseau neuf par sur les 220 000 km que compte le réseau. Depuis juin 2016, 50 km ont été couverts. En rase campagne, il faut installer un tag tous les 25 mètres sur des canalisations en ligne droite. A chaque raccordement, un tag doit être installé.

- Evolution des coûts (OPEX) :
 - Matières et énergie :

Ffly4u.

L'arrivée du numérique a permis de pouvoir monétiser des données qui ne l'étaient pas auparavant (temps de livraison, date de livraison).

Certains acteurs peuvent renforcer leur suivi logistique et réduire leurs dépenses en termes de carburant.

Engie.

- **GRDF : Suivi de compteurs industriels.** En cas d'absence du carnet métrologique, l'amende est de 3 900 €. L'installation des tags permet de réduire ces dépenses. En l'absence de tags RFID, il faut effectuer une pré-visite qui permet de s'assurer que c'est le bon compteur qui va être étalonné. Cette pré-visite coûte 80 € et sera progressivement supprimée.
- **GRDF Eliot.** Si des travaux sont effectués sur une zone avec des canalisations, GRDF doit être capable de géolocaliser la canalisation à 40 cm près. Si ce n'est pas possible des frais financiers peuvent être engagés. Ces tags RFID permettent une géolocalisation à 10 cm près et peuvent donc réduire ces frais. Forfaitairement un dommage à ouvrage coûte 96 000 €.

Entreprise dans l'industrie automobile

La traçabilité des pièces permet en cas de rappel de pouvoir identifier des lots de pièces défectueuses et donc de renvoyer moins de pièces au garage.

- Temps de retour sur investissement :

Editag.

Pour l'implémentation de ces technologies, on est sur un retour sur investissement inférieur à 2 ans pour les industriels.

Engie.

Le temps de retour sur investissement est estimé à moins de 10 ans. En effet, les installations de tag vont être réalisées progressivement et sur ces projets c'est l'enjeu sécuritaire qui prime.

Sur les points de sécurité, on aura une rentabilité sécuritaire à 5 ans.

- Evolution des consommations de matières :

Ffly4u.

Pour comprendre au mieux les réductions de certains impacts environnementaux, il est important de réfléchir sur deux axes :

- Le fait de mieux suivre certains facteurs environnementaux : choc, qualité de l'air. Grâce à cette nouvelle technologie, de nouvelles mesures seront désormais possibles et cela pourrait avoir un impact environnemental positif

**Impacts
environnementaux**

- Meilleure maîtrise des poules d'actifs mobiles, meilleure gestion de la logistique transport, réduction des facteurs de pollution.

Editag.

Les impacts environnementaux vont directement découler des impacts économiques :

- Augmentation du taux de rendement synthétique
 - o Achat de moins de matière, moins de produit
 - o Faire tourner à production équivalente

Cependant il est important de nuancer l'impact positif environnemental :

- L'électronique peut avoir une empreinte négative car on produit de l'outillage supplémentaire, on doit produire de la donnée pour permettre d'améliorer le système de production. Pour produire de la data, on a besoin de capteurs, device. Améliorer le système de production a un impact positif et l'outillage qui accompagnera ce système aura un impact négatif.
- Il y a une forte demande du marché pour travailler sur la durée de vie des outils et d'aller vers une autonomie énergétique. Cette demande est avant tout motivée par des aspects économiques.

- Evolution des consommations d'énergie :

L'étude « Impact of Radio Frequency Identification Technology on Environmental Sustainability » publiée en 2016 a montré que l'utilisation simultanée de la RFID et de la mise en place d'un « green supply chain » renforce les impacts positifs environnementaux.

Engie

- **Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire** : La consommation d'énergie se fait par batterie qui a une durée de vie de 10 ans.
- **Les autres projets** utilisent l'énergie du lecteur RFID.

- Evolution des rejets de polluants (air, eau, sol) :

Engie

- **Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire** : L'arrivée de méthane est coupée en moins de 10 secondes. En cas d'incident, cela réduit le temps de fuite.
- **GRDF : Suivi de compteurs industriels**. Réduction de la consommation de carburants du fait que la prévisite n'est plus nécessaire avec l'installation des tags.

GRDF Eliot. Si des matières non conformes ou polluantes ont été utilisées, on sera capable de déterminer l'endroit précis et d'obtenir une traçabilité des produits.

Cas d'école n° 8 La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

- Impacts directs environnementaux de la technologie (numérique) implémentée :

Les matériaux utilisés pour la conception de puces RFID sont parfois des matériaux rares et peuvent avoir des conséquences environnementales : difficulté pour recycler les tags, empreinte carbone non nulle.

Engie

Pour chaque projet, une étude concernant l'exposition des travailleurs aux ondes électromagnétiques est réalisée.

- Evolution des conditions de travail :
 - Sécurité :

Engie.

Le but des différents projets est d'augmenter la sécurité sur sites industriels.

- **Le site de Montoir de Bretagne, en Pays de la Loire** : Le système de capteurs permet d'obtenir un temps d'alerte en cas de fuite de 4,5 secondes.
- **Suivi des maintenances pour les ouvrages soumis à maintenance**. Donner des informations quant à l'utilisation des robinets de gaz.
- **GRDF Eliot**. On évite les fouilles (trous dans la chaussée) ce qui peut réduire les accidents et sécurise la maintenance des ouvrages.

- Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place :

Editag.

L'automatisation peut conduire dans certains cas à la transformation de certains postes : la personne qui faisait des fiches suiveuses va peut-être disparaître mais pourrait être repositionnée sur d'autres postes.

Engie.

- **Suivi des maintenances pour les ouvrages soumis à maintenance**. Les personnes chargées de la maintenance sont intervenues afin de choisir quels tags seraient les plus faciles à installer et à manipuler sur le long terme.

Entreprise dans l'industrie automobile

La traçabilité des pièces permet aux opérateurs de se concentrer sur leur cœur de métier qui est la production de pièces de qualité.

Impacts sociaux

Perspectives

- Bilan de l'investissement réalisé :

Cas d'école n° 8 La traçabilité des flux et des produits par puces RFID ou fichiers numériques associés

Engie.

Les projets sont actuellement encore en cours de développement et montrent de belles perspectives d'avenir.

Engie.

D'autres projets sont envisagés pour compléter les précédents :

- Compléter le projet de suivi des compteurs électriques en installant des portiques dans les entrepôts où les compteurs sont stockés et étalonnés afin d'avoir un meilleur suivi des stocks
- Installation de puces RFID sur les équipements de protection individuelle pour obtenir plus de suivi.

Sources

- <http://www.eliot-solutions.com/grdf-eliot-realisent-chantier-test-rfid-a-sedan/>
- <http://www.centrenational-rfid.com/definition-de-la-rfid-article-71-fr-ruid-17.html>
- Présentation générale Ffly4u
- Kenneth W. Green Jr., Pamela J. Zelbst, Victor E. Sower & Jeremy C. Bellah (2016): Impact of Radio Frequency Identification Technology on Environmental Sustainability, Journal of Computer Information Systems, DOI: 10.1080/08874417.2016.1184029
- Rand Europe, « Smart Trash : study on RDIF tags and the recycling industry », 2010

II.9 Cas n°9 : La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques

Cas d'école n° 9 La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques

Typologie	Vue d'ensemble – principales étapes et principaux impacts :			
	Impacts / Etapes	<i>Amont : conception & pilotage</i>	<i>Usage : production</i>	<i>Aval : maintenance & fin de vie</i>
	<i>Energie</i>	+	+++	+++
	<i>Ressources</i>	+	++	+++
	<i>Polluants (air, eau, sol)</i>	+	+	+
	<ul style="list-style-type: none"> • + / ++ / +++ : potentielle réduction d'impacts (bénéfice environnemental) • - / -- / --- : potentielle augmentation d'impacts (préjudice environnemental) • Etape(s) concernée(s) : Conception / Pilotage et contrôles / Opérations de fabrication / Service (intégration et maintenance) / Gestion des données (internes) / Relation avec les parties prenantes (externes) • Secteur(s) industriel(s) concerné(s) : • Entreprise(s) interrogée(s) : ENDEL, ENGIE 			
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative de la technologie implémentée : <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadrage : <p>La maintenance est définie par les normes françaises (NF EN 13306) et européennes (FD X 60-000) comme : « <i>l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.</i> »</p> <p>Au travers de ces normes, différents types de maintenances peuvent être définis :</p> <p>La maintenance préventive : maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maintenance conditionnelle ou prédictive (de l'anglais <i>predictive maintenance</i>) : maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue ; 			

Cas d'école n° 9 La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques

- Maintenance prévisionnelle : maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ;
- Maintenance systématique : maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

La maintenance corrective : maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

Exemple n°1 : ENDEL, ENGIE. Substituer la maintenance systématique (entretien ou changement de matériel sur une période définie à l'avance) par une maintenance conditionnelle ou prévisionnelle, i.e. par la surveillance du fonctionnement du matériel par des indicateurs physique du fonctionnement. Ces différents indicateurs permettent de connaître à l'instant t, l'état de fonctionnement mais également d'extrapoler un fonctionnement ultérieur et par conséquent de prédire une maintenance.

- Technique :

ENDEL, ENGIE. L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et des capteurs permettent de suivre l'état du dispositif à surveiller. Les grandeurs d'état les plus couramment utilisées sont les courants, les tensions, le facteur de puissance et les vibrations (surveillance vibratoire).

- Objectifs visés :
 - Mise en conformité réglementaire : Oui / Non
 - Gains de productivité : Oui / Non
 - Réduction des impacts environnementaux : Oui / Non
 - Réorganisation du travail : Oui / Non

ENDEL, ENGIE. La société réalise des audits énergétiques dans le but premier de réduire la consommation énergétique tout en ayant des TRI courts (<3 ans). L'audit permet de mesurer les économies en kWh et en euros mais également en réduction des impacts environnementaux (en tonnes de CO₂). De plus, l'audit prévoit une réorganisation du travail et du planning de maintenance pour une meilleure efficacité.

- Temps de retour sur investissement :

ENDEL, ENGIE. Exemple d'audit réalisé par ENDEL, ENGIE : 247 moteurs électriques d'une puissance de 1 250 kW. L'économie réalisée est de 30k€/an pour un investissement inférieur à 80 k€ (Remplacement de moteurs suivant la norme IE3) soit un TRI < 3 ans.

Impacts économiques

Cas d'école n° 9 La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques

Impacts environnementaux	<ul style="list-style-type: none">• Evolution des rejets de polluants (air, eau, sol) : <p>ENDEL, ENGIE. Exemple précédent d'audit réalisé par ENDEL, ENGIE : une réduction de 34 tonnes de CO₂ par an.</p>
Impacts sociaux	<ul style="list-style-type: none">• Evolution des conditions de travail : <p>ENDEL, ENGIE. L'accueil de la technologie n'a pas été le même suivant les employés (classe, âge, niveau professionnel). Un accueil très enthousiaste des nouvelles générations a été remarqué (utilisation de smartphone/tablette) et une adaptation nécessaire pour les générations moins ancrées dans le numérique (ergonomie adaptée et plan de formation).</p> <ul style="list-style-type: none">• Dispositifs d'accompagnement et de formation mis en place : <p>ENDEL, ENGIE. Un dispositif d'installation de la technologie et de formation du personnel est mis en place pour appréhender les nouvelles pratiques apportées par le numérique.</p>
Perspectives	<p>ENDEL, ENGIE. Technologies applicables à tous les secteurs des machines tournantes. Un bémol est apporté quant à l'applicabilité dans les secteurs de la pétrochimie où des normes sévères limitent l'utilisation des capteurs existants.</p> <ul style="list-style-type: none">○ Existe-t-il des bonnes pratiques à l'étranger ? <p>ENDEL, ENGIE. En Belgique où la réalisation des actions avec un TRI inférieur à 18 mois est obligatoire.</p>
Sources	<p><i>Voir note bibliographique ci-dessous</i></p>

ANNEXE III Impact des nouvelles technologies dans l'économie de l'énergie et de l'industrie : Etat de l'art sur la maintenance des machines électriques

III.1 Introduction

La maîtrise de l'énergie électrique et plus particulièrement de sa consommation est un enjeu économique majeur pour l'industrie. L'énergie perdue due aux différentes pertes des appareillages électriques, de la production, du transport et lors de l'utilisation de l'énergie électrique est un enjeu économique et axe de développement important pour l'industrie. Le rapport annuel sur l'énergie du département Américain de l'énergie (EIA) [1] évalue l'énergie perdue due aux pertes à plus de 20% de la consommation totale des industries Américaines soit près de 2000 TWh, Figure 29.

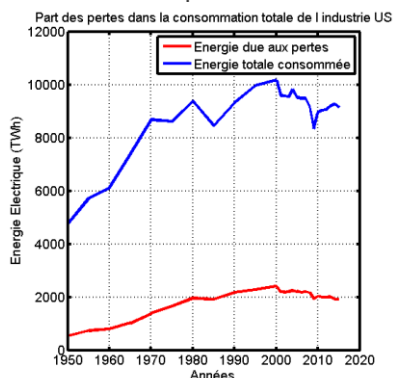


Figure 29 : Evolution des pertes due à l'énergie électrique et de la consommation totale de l'industrie Américaine [1]

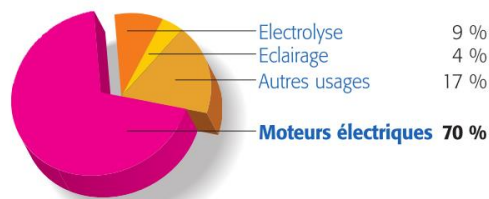


Figure 30 : Répartition de la consommation d'énergie électrique dans l'industrie Française [2]

Les moteurs électriques représentent 70% de la consommation d'énergie électrique en France [2], Figure 30, et sont donc un des contributeurs importants aux pertes d'énergie électrique. La directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les exigences relatives à l'éco-conception des moteurs électriques [3] impose des normes de rendement strictes aux moteurs électriques, labellisées IE1 (rendement standard), IE2 (haut rendement) et IE3 (rendement premium) [4]. Le rendement des moteurs devrait atteindre le label IE2 en Juin 2011, et le label IE3 (ou IE2 équipé d'un variateur de vitesse) en janvier 2017. La Commission européenne espère ainsi réduire de 135 TWh la consommation électrique de l'Europe des 27 d'ici à 2020 [5], [6]. Néanmoins, sur une durée de vie de 15 ans, le seuil d'amortissement financier ne serait qu'entre 24 et 36 mois pour le passage en IE2 ou IE3, [5], [6].

Un second axe de développement sur les moteurs électriques concerne la maintenance du parc existant. Il existe deux types de maintenances fréquemment utilisées; La maintenance corrective et la maintenance préventive [7], [8]. La maintenance corrective consiste au remplacement de l'actionneur défectueux lorsque celui-ci ne garantit plus le fonctionnement souhaité. En opposition, la maintenance préventive prévoit le remplacement avant qu'un défaut critique apparaisse à un temps défini à l'avance.

Ces deux types de maintenance ne prennent pas en compte la modification du comportement du moteur et ces maintenances arrivent soit trop tôt ou trop tard. Le moteur électrique est installé sur l'application avec des performances initiales définies par les normes citées. Néanmoins, tout au long de son utilisation ses performances vont être modifiées et plus précisément, l'actionneur électrique verra ses pertes augmenter. Par conséquent son coût énergétique peut devenir très supérieur à celui initialement prévu. Il est alors judicieux de définir une maintenance prédictive [9]–[11] qui décidera du moment de remplacement de l'actionneur en fonction du niveau de dégradation atteint par ses performances électriques.

III.2 Les différents types de maintenances

Une définition normative de la maintenance a été développée par l'AFNOR à travers des normes Françaises et Européennes NF EN 13306 [12] et FD X 60-000 [13] :

« Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. »

Au travers de ces normes, différents types de maintenances peuvent être définis :

La maintenance préventive : maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

- Maintenance conditionnelle ou **prédictive** (de l'anglais *predictive maintenance*) : maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.
- Maintenance prévisionnelle : maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.
- Maintenance systématique : maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

La maintenance corrective : maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

A ces différents types de maintenance sont associés 5 niveaux de maintenances selon le degré de complexité matériel à mettre en oeuvre (remplacement d'un élément simple, Niveau 1, jusqu'au remplacement complet de plateformes, Niveau 5).

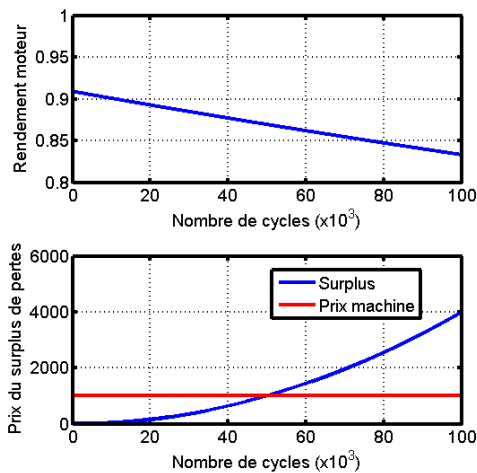


Figure 31 : Evolution du coût des pertes supplémentaires occasionnées par le vieillissement de la machine électrique

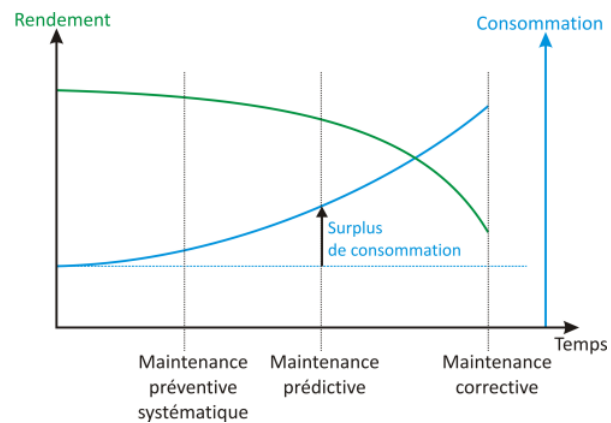


Figure 32 : Définition des différents types de maintenance en fonction du rendement et de la consommation de l'actionneur électrique

En partant sur un prix moyen d'un moteur asynchrone à 0.1W/€ et d'un coût de l'énergie à 0.08€/kWh, en prenant une dégradation du rendement du moteur, linéaire tout au long de sa vie, nous pouvons observer qu'il existe une limite en cycles de fonctionnement pour laquelle le coût du surplus des pertes devient supérieur au coût initial du moteur, Figure 31. Il est à noter que le coût total (TCO) du moteur électrique est en grande partie dû à la consommation électrique de celui-ci. La maintenance prédictive [8] permet d'intégrer les considérations de coût du moteur et plus particulièrement du surcoût des pertes dans le moteur afin de décider le moment économiquement optimal de remplacement, Figure 32.

III.3 Classification des défauts des machines électriques

La notion de maintenance est liée aux différentes pannes et défauts présents dans les actionneurs électriques. L'étude menée dans [14] analyse l'occurrence des pannes intervenant dans des moteurs de l'industrie en fonction du nombre d'années, Figure 33. Il est à noter que le taux de pannes le plus important se situe sur les premières années d'utilisation et résulte d'une fabrication défective.

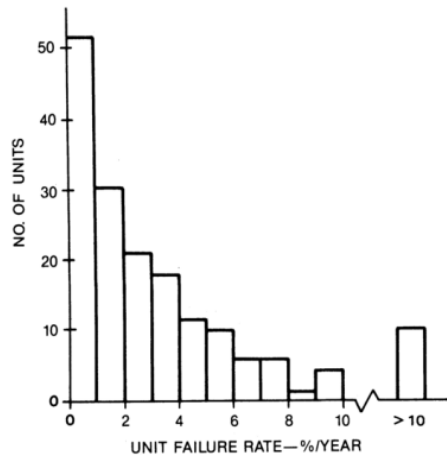


Figure 33 : Occurrence des pannes des moteurs électriques en fonction des années d'utilisation [14]

Dans les études menées par [14], [4], [15] et [16], les auteurs classifient les différentes pannes intervenant dans les moteurs utilisés dans l'industrie.

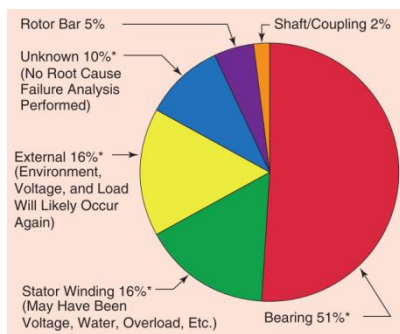


Figure 34 : Répartition des défauts par type pour des machines asynchrones utilisées dans l'industrie pétrochimique [4]

PERCENTAGE FAILURES BY MAJOR COMPONENT

Bearing Related	41 %	Stator Related	36 %
Sleeve Bearings	14 %	Ground Insulation	22
Anti-Friction Bearings	9 %	Turn Insulation	4
Oil Leaks	6	Bracing	3
Thrust Bearing	5	Wedges	1
Bearing Seals	3	Frame	1
Oil System	1	Cable	1
Other	3	Connections	1
		Other	3
Rotor Related	9 %	Other	14 %
Cage	4		
Shaft	2		
Core	1		
Balance Weight	1		
Other	1		

Figure 35 : Répartition des défauts par type pour une campagne de mesure menée par General Electric [14]

La plupart de ces observations ont été réalisées pour des machines de types moteurs asynchrones, Figure 34 et Figure 35. D'autres types de moteurs sont couramment utilisés dans l'industrie; les moteurs synchrones et à moindre mesure les moteurs à courant continu. Dans le cas le plus général, les défauts les plus fréquents peuvent être listés comme suit :

- Les défauts de type mécanique, principalement les défauts des roulements [17]–[19].
- Les défauts de type électrique, isolation vis à vis de la terre, court-circuit entre phases, circuits ouverts, perte de phases électriques [20]–[25].
- Les défauts de type magnétique, démagnétisation totale ou partielle des aimants permanents [26], [27].
- Les défauts des composants d'électronique de puissance [28]–[30]. Le moteur électrique est selon les cas, potentiellement alimenté par un convertisseur d'électronique de puissance et ses éléments passifs de filtrage. Une étude sur les convertisseurs de puissance utilisés dans l'industrie [28] permet d'identifier les éléments de pannes dans ces convertisseurs, Figure 36.

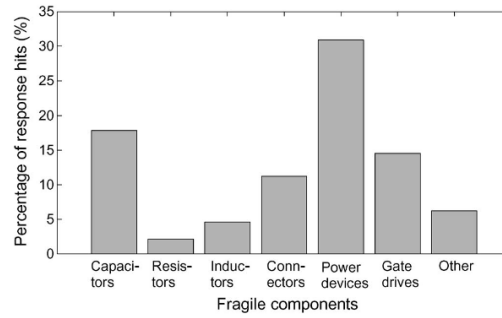


Figure 36 : Répartition des défauts dans les composants d'électronique de puissance [28]

III.4 Le vieillissement des actionneurs électriques

Les différents types de défauts listés au chapitre précédent occasionnent le plus souvent un arrêt complet et définitif de la machine électrique et par voie de conséquence induisent une maintenance corrective. Néanmoins, la plupart de ces défauts peuvent engendrer une dégradation non critique des performances. De la même façon, le vieillissement des différents composants électriques influe sur les performances durant la durée d'utilisation de l'actionneur.

- Le vieillissement des isolants [31]–[34]. Dû au stress mécanique et thermique, les isolants servant à l'isolation des bobinages mais également à l'isolant des tôles magnétiques se détériorent entraînant un surplus de pertes et menant aux court-circuits dans les bobinages.
- Le vieillissement des matériaux magnétiques [35] et des aimants permanents. Les propriétés magnétiques des matériaux et des aimants permanents se détériorent entraînant une chute du couple disponible et par voie de conséquence une augmentation des pertes dans le moteur.
- Le vieillissement des diélectriques [34], [36]–[39]. Les composants passifs de filtrage des convertisseurs d'électronique de puissance et des machines électriques sont sensibles à la température et aux conditions d'utilisation en tension et courant, notamment aux harmoniques de ceux-ci.
- Le vieillissement des composants d'électronique de puissance.

Dans [37] et [38], les auteurs réalisent des cyclages thermiques sur des conducteurs dans un prototype représentatif d'une machine électrique. La dégradation de la durée de vie des bobinages de test se retrouve drastiquement réduite sous l'effet des contraintes mécaniques de fonctionnement et thermiques dans la machine (713 heures sans contraintes, 90 heures sous contraintes mécaniques et thermiques [41]).

III.5 Le suivi des performances des actionneurs électriques

Afin de concevoir une maintenance prédictive, il est nécessaire d'avoir un suivi des performances du moteur électrique au fil de l'eau (ou de manière discrète). Dans ce cas, nous parlons de *health monitoring* (suivi de l'état de santé) ou *condition monitoring* (suivi des performances) [11], [30], [42]–[48].

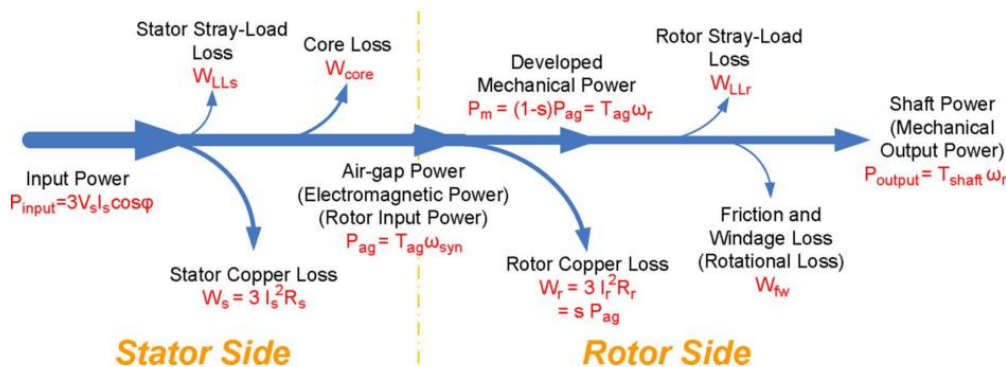


Figure 37 : Diagramme des pertes dans une machine asynchrone [45]

Dans l'article [45], les auteurs proposent une méthode non intrusive pour le suivi des performances à partir de la mesure des grandeurs électriques. A partir de ces mesures et du bilan de puissance, Figure 37, les auteurs estiment la rendement au fil de l'eau et en fonction de la charge appliquée. Dans le cas des machines électriques, il est ainsi possible de faire le lien entre les défauts cités aux chapitres III.3 et III.4 et le rendement global du moteur. Par voie de conséquence, il est possible d'en déduire les pertes de la machine et comparer le coût de ces pertes supplémentaires au coût du remplacement du moteur électrique et ainsi de décider d'une maintenance ou non.

III.6 Bibliographie

- [1] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Review," 2016. [Online]. Available: <http://www.eia.gov/totalenergy/>.
- [2] Joint Research Centre Energy Efficiency European Commission, "Motor Challenge Programme." [Online]. Available: <http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge>.
- [3] Journal officiel de l'Union européenne, "Règlement (CE) No 640/2009 de la commission du 22 juillet 2009 portant application de la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les exigences relatives à l'écoconception des moteurs électriques." 2009.
- [4] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased efficiency versus increased reliability," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 14, no. 1, pp. 29–36, 2008.
- [5] le magazine de l'efficacité énergétique Energie 3.0, "Les moteurs à haut rendement généralisés à l'horizon 2017," 2011. [Online]. Available: <http://www.efficacite-electrique.fr/2011/05/les-moteurs-a-haut-rendement-generalises-a-l%E2%80%99horizon-2017/>.
- [6] L'usine nouvelle, "Le moteur électrique, clé du rendement," 2008.
- [7] F. Monchy and J.-P. Vernier, *Maintenance : Méthodes et organisations pour une meilleure productivité*. 2012.
- [8] J. Heng, *Pratique de la maintenance préventive*. 2011.
- [9] C. Bruno, "Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle," 2001.
- [10] S. Chadi, "Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers," 1998.
- [11] J. Morel, "Surveillance vibratoire et maintenance prédictive," *Tech. l'ingénieur*, 2005.
- [12] AFNOR, "Norme NF EN 13306 sur la Terminologie de la maintenance." 2001.
- [13] AFNOR, "Norme FD X 60-000 sur la maintenance industrielle." 2002.
- [14] P. Albrecht, J. Appiarius, E. Cornell, D. Houghtaling, R. McCoy, E. Owen, and D. Sharma, "Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-2, no. 3, pp. 396–406, Sep. 1987.
- [15] C. Yung and A. H. Bonnett, "Repair or replace? - A decision model for industrial electric motors," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 10, no. 5, pp. 48–58, 2004.
- [16] O. V. Thorsen and M. Dalva, "A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 1186–1196, 1995.
- [17] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, and G. Rostaing, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1813–1822, 2008.
- [18] J. R. Stack, T. G. Habeter, and R. G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 3, pp. 735–739, 2004.
- [19] P. J. Tavner, G. J. W. Van Bussel, and F. Spinato, "Machine and Converter Reliabilities in Wind Turbines," *Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives*, no. April, pp. 1–4, 2006.
- [20] N. Bianchi, S. Bolognani, and M. D. Pré, "Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 960–970, 2007.
- [21] W. Ding, Y. Hu, and L. Wu, "Investigation and Experimental Test of Fault-Tolerant Operation of a Mutually Coupled Dual Three-Phase SRM Drive Under Faulty Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 6857–6872, Dec. 2015.
- [22] T. Hamiti, P. Arumugam, and C. Gerada, "Turn–turn short circuit fault management in permanent magnet machines," *IET Electr. Power Appl.*, Nov. 2015.
- [23] N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, and G. Clerc, "Inductance Calculations in Permanent-Magnet Motors Under Fault Conditions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 10, pp. 2605–2616, 2012.
- [24] a. J. Marques Cardoso, S. M. a Cruz, and D. S. B. Fonseca, "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14,

- no. 3, pp. 595–598, 1999.
- [25] D. C. Patel and M. C. Chandorkar, “Transient Modeling and Analysis of Induction Motors with Position Effects in Stator Turn Faults,” *IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1251–1256, 2010.
- [26] J.-R. R. Ruiz, J. a. Rosero, a. G. Espinosa, and L. Romeral, “Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 7, pp. 2961–2969, Jul. 2009.
- [27] S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo, and A. Arkkio, “Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet Synchronous Motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 949–953, Mar. 2010.
- [28] Shaoyong Yang, A. Bryant, P. Mawby, Dawei Xiang, Li Ran, and P. Tavner, “An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May 2011.
- [29] Y. Song and B. Wang, “Survey on Reliability of Power Electronic Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 591–604, Jan. 2013.
- [30] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner, “Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, Nov. 2010.
- [31] M. G. Danikas and A. Karlis, “A review on electrical machines insulation aging and its relation to the power electronics arrangements with emphasis on wind turbine generators,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 1748–1752, May 2011.
- [32] J. H. Calderwood, *Electrical Insulation*, vol. 132, no. 1. 1985.
- [33] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion, “Electrical aging of the insulation of low-voltage machines: Model definition and test with the design of experiments,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4147–4155, 2013.
- [34] Nadine Lahoud, “Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique - Application à la fiabilité des matériaux,” p. 150, 2009.
- [35] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, “Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient,” *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 821–842, 2011.
- [36] Y. Diab, P. Venet, G. Rojat, C. Umr-cnrs, and U. Lyon, “Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors : Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors,” *Cell*, pp. 1–6, 2006.
- [37] a Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P.-J. Viverge, “Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switchmode power supply,” *Power Electron. IEEE Trans.*, vol. 13, no. 6, pp. 1199–1207, 1998.
- [38] F. Perisse, P. Venet, and G. Rojat, “Simple Model of an Electrolytic Capacitor,” vol. 2, pp. 89–95, 2006.
- [39] P. Venet, a Lahyani, G. Grellet, and a. Ah-Jaco, “Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method,” *Eur. Phys. J. - Appl. Phys.*, vol. 5, no. 1, pp. 71–83, Jan. 1999.
- [40] T. S. Ramu, “On the Estimation of Life of Power Apparatus Insulation Under Combined Electrical and Thermal Stress,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-20, no. 1, pp. 70–78, Feb. 1985.
- [41] C. Sciascera, M. Galea, P. Giangrande, and C. Gerada, “Lifetime Consumption and Degradation Analysis of the Winding Insulation of Electrical Machines,” *8th IET Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives*, pp. 1–5, 2016.
- [42] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, and G.-A. Capolino, “Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1746–1759, Mar. 2015.
- [43] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2005.
- [44] B. Lu, S. Member, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 924–933, 2006.
- [45] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A Non intrusive and In-Service Motor-Efficiency Estimation Method Using Air-Gap Torque With Considerations of Condition Monitoring,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1666–1674, 2008.
- [46] S. Hu, F. Liu, Y. He, and T. Hu, “An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools,” *J. Clean. Prod.*, vol. 27, pp. 133–140, 2012.
- [47] H. M.-K. Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi, Seungdeog Choi, *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. 2016.
- [48] D. Augeix, “Analyse Vibratoire Machines Tournantes,” *Tech. l’Ingénieur*, vol. 33, no. 0, pp. 1–22, 2001.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux

TABLEAU 1 : PROPOSITION DE SYNTHÈSE DES RÉVOLUTIONS INDUSTRIELLES (RI) DEPUIS 1750.....	9
TABLEAU 2 : INFORMATIQUE ET ÉLECTRONIQUE	12
TABLEAU 3 : LISTE DE CRITÈRES DE LA GRILLE D'ANALYSE EXCEL	13
TABLEAU 5 : MOTS-CLÉS RETENUS POUR LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	36
TABLEAU 6 : BASES DE DONNÉES UTILISÉES POUR LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	36
TABLEAU 7 : AXES D'ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE	38
TABLEAU 8 : PÉRIMÈTRE GÉOGRAPHIQUE DES PUBLICATIONS.....	39
TABLEAU 9 : RECENSEMENT DES PUBLICATIONS SELON LE TYPE DE MÉTHODE D'ÉVALUATION UTILISÉ	39
TABLEAU 10 : RÉPARTITION DES PUBLICATIONS SELON LES FRONTIÈRES DES SYSTÈMES CONSIDÉRÉS.....	40
TABLEAU 11 : PUBLICATIONS LES PLUS PERTINENTES SUR LA FABRICATION ADDITIVE	43
TABLEAU 12 : PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ÉTUDES PORTANT SUR LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE DANS LA SOCIÉTÉ ET DANS L'INDUSTRIE EN PARTICULIER	45
TABLEAU 13 : LISTE DES CAS D'ÉCOLE DISCUTÉS PAR LE COMITÉ DE SÉLECTION DU 2 MARS 2017.....	49
TABLEAU 14 : PÉRIMÈTRE ET PRINCIPAUX IMPACTS DES CAS D'ÉCOLE ÉTUDIÉS.....	53
TABLEAU 15 : EVALUATION QUALITATIVE DE CERTAINS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR L'ENSEMBLE DES CAS D'ÉCOLE	54
TABLEAU 16 : POTENTIELS DE RÉDUCTION DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE PERMIS PAR LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DANS LES SECTEURS INDUSTRIELS	58
TABLEAU 17 : MONTANTS DU CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX) PRÉSENTS DANS LES CAS D'ÉCOLE ÉTUDIÉS.....	61
TABLEAU 18 : SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS DE L'ÉTUDE.....	75
TABLEAU 19 : TROIS PROCÉDÉS SONT UTILISÉS EN PRIORITÉ PAR LES CONSTRUCTEURS DE MACHINES	120
TABLEAU 20 : EXEMPLES DE MACHINES	121
TABLEAU 21 : QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DE TAG PASSIF.....	131

Figures

FIGURE 1 : TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES – PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE	11
FIGURE 2 : L. DEMMOU « LE REcul DE L'EMPLOI INDUSTRIEL ENTRE 1980 ET 2007 », ECONOMIE ET STATISTIQUES N°438-440, 2010.....	18
FIGURE 3 : REPRÉSENTATION DES INNOVATIONS INCRÉMENTALES DANS L'INDUSTRIE.....	21
FIGURE 4 : THE FRENCH CONNECTION. AIRCRAFT ENGINEERING AND AEROSPACE TECHNOLOGY.....	23
FIGURE 5 : CLASSIFICATION DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE.....	24
FIGURE 6 : DEVELOPMENT IN MANUFACTURING TECHNOLOGY	27
FIGURE 7 : NOMBRE D'ARTICLES PUBLIÉS ENTRE 2010 ET 2015 SUR LE THÈME DES CPS.....	28
FIGURE 8 : INTERACTIONS ENTRE LES CYBER-SYSTÈMES, LES TECHNOLOGIES DU NUMÉRIQUE ET LE MANUFACTURING	28
FIGURE 9 : EXEMPLE D'ARCHITECTURE NÉCESSAIRE AU DÉVELOPPEMENT DES PRODUITS INTELLIGENTS	29
FIGURE 10 : DÉFIS SCIENTIFIQUES MAJEURS DES CPS	29
FIGURE 11 : EXOSQUELETTE CHEZ AUDI – NOONEE.....	31
FIGURE 12 : COBOT RETHINK ROBOTICS,.....	31
FIGURE 13 : APPLICATION DES COBOTS RETHINK ROBOTICS.....	31
FIGURE 14 : PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS ISSUS DU MODÈLE NORD-AMÉRICAIN ET DES STRATÉGIES DES LEADERS NUMÉRIQUES : UNE ANALYSE À DEUX NIVEAUX	32
FIGURE 15 : INDUSTRIE DU FUTUR CHEZ TESLA	33
FIGURE 16 : ÉVOLUTIONS À VENIR.....	34
FIGURE 17 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE PUBLICATIONS PERTINENTES IDENTIFIÉES AU COURS DE L'ÉTUDE, ENTRE 2008 ET 2015	37
FIGURE 18 : RÉPARTITION DU NOMBRE DE PUBLICATIONS SELON LES TYPES D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX CONSIDÉRÉS (11 PUBLICATIONS SONT CLASSÉES « AUTRE / NA »).....	40
FIGURE 19 : OCCURRENCE DES TECHNOLOGIES DANS LES ARTICLES ET RAPPORTS REVUS.....	42
FIGURE 20 : MODÉLISATION DE LA CHAÎNE DE VOLKSWAGEN À WOLFSBURG	87
FIGURE 21 : FORMATION DES OPÉRATEURS SUR UNE PLATEFORME TOTAL EN ANGOLA	89
FIGURE 22 : MANAGEMENT DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES PAR SIEMENS	97
FIGURE 23 : PROJET COOD - AIR LIQUIDE.....	102

FIGURE 24 : SAP BUSINESSOBJECTS CLOUD	106
FIGURE 25 : ARCHITECTURE DU PROJET ERGONOMIE & COBOTIQUE SAFRAN	114
FIGURE 26 : PROCÉDÉS FAS	120
FIGURE 27 : DESCRIPTION DES TECHNIQUES D'IDENTIFICATION ÉLECTRONIQUE	128
FIGURE 28 : HISTORIQUE DE LA RFID	129

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale.

L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





IMPACTS DU NUMÉRIQUE AU SEIN DE L'INDUSTRIE, AU REGARD DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Résumé

L'augmentation rapide des capacités de calcul a permis l'arrivée à maturité de nombreuses technologies, d'outils et d'algorithmes (*big data*, *cloud computing*, robot intelligent, internet des objets, impression 3D, etc.). Les entreprises doivent donc s'adapter rapidement si elles ne veulent pas être dépassées, d'autant plus que ces technologies numériques impactent la quasi intégralité des fonctions de l'entreprise, de la R&D à la gestion en passant par les achats, la production, la logistique, le marketing ou les ventes. L'industrie est bouleversée, au point que nombreux sont ceux qui parlent aujourd'hui de 4^e révolution industrielle, et de l'avènement d'une industrie du futur.

En France, le programme « Industrie du Futur » lancé en 2015 a pour objectif d'amener chaque entreprise à franchir un pas sur la voie de la modernisation de son outil industriel et de la transformation de son modèle économique par le numérique. Cette transformation fait l'objet d'un large consensus, et la question des externalités négatives de ce nouveau modèle industriel n'est que rarement abordée. Sans présager des réponses, l'usage accru du numérique au sein de l'industrie soulève des questionnements importants sur les plans environnementaux (quels bénéfices ? sur quels indicateurs ? et dans quelles conditions ?), techniques (quel impact sur l'appareil industriel ?), économiques et sociaux (comment cela va-t-il transformer le marché et quels seront les impacts sur les emplois ?).

L'étude intitulée « Impacts du numérique au sein de l'industrie au regard de la transition énergétique et écologique (TEE) » a pour objectif d'objectiver et de quantifier (dans la mesure du possible) les impacts du numérique dans l'industrie, au regard de la TEE, et d'aboutir à l'identification de leviers afin de faire converger industrie du futur et transition écologique et énergétique.

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

www.ademe.fr

