

SEPT.
2017

INDUSTRIE DU FUTUR : COMMENT ALLIER TRANSITION NUMERIQUE ET TRANSITION ENERGETIQUE ET ECOLOGIQUE

A partir :

- de l'étude "Impacts du numérique au sein de l'industrie, au regard de la transition énergétique et écologique", réalisée pour le compte de l'ADEME par Deloitte, G-SCOP et SATIE
 - du cycle prospectif intitulé "Controverses de l'usine du futur" co-organisé par la FING et l'ADEME avec l'appui de Mines ParisTech et TelecomParisTech
-

Synthèse

ADEME



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

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), FING (Jacques-François MARCHANDISE, Sophie MAHEO). 2017. Usine du futur: comment allier transition numérique et transition énergétique et écologique. 25 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 |
| 1. INTRODUCTION | 4 |
| 2. MÉTHODOLOGIE | 4 |
| 2.1. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE « IMPACTS DU NUMÉRIQUE AU SEIN DE L'INDUSTRIE AU REGARD DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE » | 5 |
| 2.2. MÉTHODOLOGIE DU CYCLE PROSPECTIF DE L'USINE DU FUTUR..... | 6 |
| 2.3. ÉLABORATION DES RECOMMANDATIONS COMMUNES | 6 |
| 3. PRINCIPAUX RÉSULTATS DE LA REVUE BIBLIOGRAPHIQUE « USINE DU FUTUR ET ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX » | 6 |
| 3.1. BIBLIOGRAPHIE TECHNOLOGIQUE..... | 6 |
| 3.2. BIBLIOGRAPHIE ENVIRONNEMENTALE | 10 |
| 4. RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES CAS D'ÉCOLE | 12 |
| 4.1. DES ENJEUX ET DES DIFFICULTÉS AUTOUR DE LA DONNÉE | 14 |
| 4.2. UNE PRÉDOMINANCE DES CRITÈRES ET DES IMPACTS ÉCONOMIQUES | 14 |
| 4.3. DE RÉELS IMPACTS SOCIAUX | 15 |
| 4.4. DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LARGEMENT MÉCONNUS..... | 16 |
| 5. CARTOGRAPHIE DES CONTROVERSES : PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS | 21 |
| 5.1. LE NUMÉRIQUE : ÉCART ENTRE DÉFINITIONS | 21 |
| 5.2. UNE LECTURE DES PROMESSES NUMÉRIQUES-ENVIRONNEMENTALES POTENTIELLES DE L'USINE DU FUTUR..... | 21 |
| 5.3. PRINCIPALES CONTROVERSES POTENTIELLES..... | 22 |
| 5.4. PISTES TRANSVERSALES ISSUES DE L'EXPLORATION DES CONTROVERSES..... | 22 |
| 6. RECOMMANDATIONS | 23 |
| 7. CONCLUSIONS | 24 |



1. Introduction

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, d'outils et d'algorithmes (*big data*, *cloud computing*, robot intelligent, internet des objets, drones autonomes, 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. Quoique sans définition consensuelle en France ou à l'international, l'industrie du futur se caractérise toujours par :

- L'utilisation de technologies de pointe dans des entreprises industrielles ;
- Le caractère transversal de ces technologies : elles ne se limitent pas à l'étape de production industrielle, mais impactent potentiellement l'ensemble des fonctions de l'entreprise (marketing, comptabilité, logistique, etc.), mais aussi les fournisseurs en amont et les clients en aval ;
- L'ambition des pouvoirs publics de redynamiser, grâce à l'industrie du futur, le tissu industriel national. Il existe 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 8^e 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, 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 ?).

Pour beaucoup d'analystes, la tendance engagée est celle d'un numérique particulièrement énergivore et producteur de déchets considérables, proposant des solutions très technocentrées dont les gains environnementaux seraient aisément consommés par effet rebond, et dont la production de valeur se ferait souvent au détriment de la dimension humaine et sociale. Deux imaginaires coexistent ainsi de façon conflictuelle : le technosolutionnisme (la technique, et particulièrement le numérique, a réponse à tout) et le technocritique (la technique aggrave les maux de la croissance et conduit à l'effondrement). Différents travaux comme ceux du Conseil national du numérique, de France Stratégie ou de la FING, pointent la diversité des modes de développement numérique possibles et la nécessité pour les politiques publiques de construire des choix en la matière et de faire vivre les débats. Concernant la place de l'industrie du futur dans la société et l'environnement, ces débats sont peu développés actuellement mais il est déjà possible d'identifier la richesse et la diversité des promesses du numérique, à commencer par le fort potentiel de l'exploitation des données produites ; et de la mettre à l'épreuve.

2. Méthodologie

Deux travaux ont été lancés par l'ADEME mi-2016 afin d'explorer les corrélations et interactions entre industrie du futur et transition énergétique et écologique.

Tout d'abord, l'étude intitulée « Impacts du numérique au sein de l'industrie au regard de la transition énergétique et écologique (TEE) » a été confiée au cabinet Deloitte, afin d'objectiver et de quantifier (dans la mesure du possible) les impacts du numérique dans l'industrie, au regard de la TEE.

En parallèle, l'ADEME a co-organisé un cycle prospectif intitulé « Les controverses de l'Usine du Futur » avec la Fondation Internet Nouvelle Génération (FING) et l'appui de Mines ParisTech et Télécom ParisTech, autour de trois questionnements : quelle place pour les humains dans l'usine du futur ? Cette dernière sera-t-elle propre ? Et ses produits seront-ils low-tech, durables et réparables ?

L'objectif de cette synthèse est de présenter les résultats de ces deux travaux et d'aboutir à l'identification de leviers afin de faire converger industrie du futur et transition écologique et énergétique.

2.1. Méthodologie de l'étude « Impacts du numérique au sein de l'industrie au regard de la transition énergétique et écologique »

Cette étude s'est déroulée en trois phases méthodologiques résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Phases et objectifs de l'étude

| Phase de l'étude | Objectifs |
|--|--|
| Phase 1 : Revue bibliographique technique et environnementale sur le numérique dans l'industrie <i>Sept. 2016 – Janvier 2017</i> | Replacer le numérique dans le contexte historique du développement industriel, et de dresser une typologie des impacts du numérique |
| Phase 2 : Étude de 9 « cas d'école » <i>Campagne d'entretiens et d'analyse, Février - Juin 2017</i> | Objectiver et 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 : <ul style="list-style-type: none"> • Économiques : volumes produits, investissements nécessaires, évolution des coûts, économies réalisées, temps de retour sur investissement, etc. • 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. |
| Phase 3 : Recommandations à l'usage des pouvoirs publics <i>Juin – Juillet 2017</i> | Identifier les leviers afin de faire converger industrie du futur et transition écologique et énergétique |

Le périmètre retenu dans le cadre de cette étude relève d'une approche par technologie ; la figure ci-dessous présente ainsi les technologies étudiées.

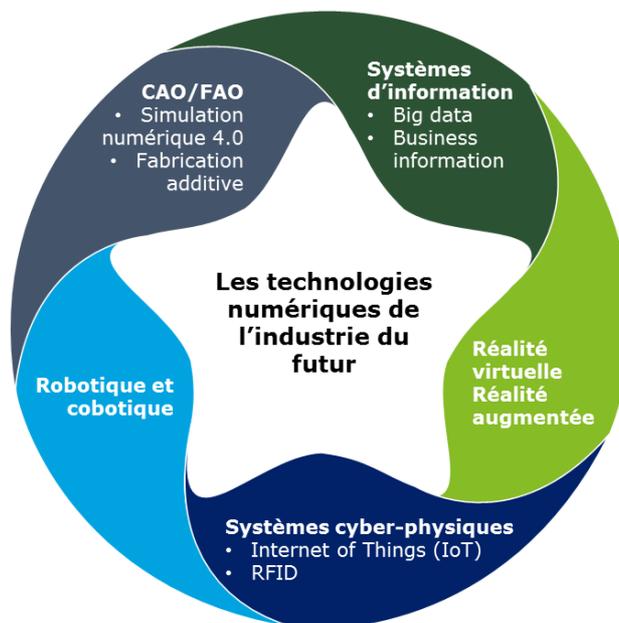


Figure 1 : Technologies étudiées – Périmètre de l'étude¹

¹ Schéma Deloitte Développement Durable, adapté du *Guide pratique de l'usine du futur*.

2.2. Méthodologie du cycle prospectif de l'Usine du Futur

Cette étude a articulé trois approches :

- Un travail d'intelligence collective, permettant d'enrichir la compréhension du sujet, de qualifier ses principales controverses et de les approfondir. Ce travail, impliquant les équipes de l'ADEME, de la FING, et les enseignants-chercheurs de Mines ParisTech et Telecom ParisTech, s'est étendu à un cercle de contributeurs plus large : chercheurs, entrepreneurs, consultants, associations (atelier du 1^{er} mars 2017).
- Un travail de cartographie de controverses, conduit avec des élèves ingénieurs (mars-juin 2017). Cette méthodologie éprouvée par un ensemble d'établissements d'enseignement supérieur (notamment dans le cadre du programme international Forccast²) permet d'entrer dans la complexité d'un sujet, d'identifier et cartographier le jeu d'acteurs, les termes du débat (arguments), la chronologie, sur la base d'une recherche documentaire et scientifique poussée, puis de la restituer de façon compréhensible pour un public non-expert. 3 sujets de controverses ont été étudiés :
 - Mines ParisTech a exploré la question du « droit à la réparation » et produit un site web rendant compte de cette première controverse ;
 - Telecom ParisTech a exploré la question de la « place des humains dans l'usine du futur » et produit trois formes fictionnelles (sonore, théâtrale et filmique) pour rendre compte de cette deuxième controverse.
- Un travail d'idéation et production de pistes, traitant de la question d'ensemble mais davantage centré sur la troisième controverse "l'Usine du futur sera-t-elle propre ?" : compte tenu de sa nature prospective (une controverse qui n'existe pas encore), il a notamment pris la forme d'une exploration des imaginaires de l'usine du futur par le repérage de vidéos porteuses de messages liés au développement durable; d'un atelier de "scénarios extrêmes" (31 mai 2017) poussant à bout les principales promesses de l'usine du futur et qualifiant un ensemble d'enjeux-clés.

C'est la globalité de ces travaux³ qui a permis à la FING de contribuer aux recommandations du présent rapport.

2.3. Élaboration des recommandations communes

Un atelier a été co-organisé par l'ADEME, la FING, Mines ParisTech, TelecomParisTech et Deloitte le 5 juillet 2017 à Paris pour d'une part restituer les résultats des deux travaux à l'ensemble des participants, et d'autre part discuter des leviers identifiés afin de faire converger industrie du futur et transition écologique et énergétique, détaillés au sein de la partie 6 de cette synthèse.

3. Principaux résultats de la revue bibliographique « Usine du Futur et enjeux environnementaux »

3.1. Bibliographie technologique

Pour le volet technique de la revue bibliographique, huit entretiens exploratoires ont été menés avec des chercheurs, chacun expert d'une phase du processus de production. La revue bibliographique s'est également appuyée sur 50 documents de littérature grise (rapports de cabinets de conseil, fédérations professionnelles, *think-tanks* et pouvoirs publics) et 48 publications scientifiques ; les 98 documents que comporte au total la revue bibliographique technique s'étalent sur une période allant de 1971 à 2016. De ces deux types de documents consultés, des conclusions sensiblement différentes ressortent.

² <http://forccast.hypotheses.org/>

³ La démarche et les controverses sont présentés ici : <http://www.transitions2.net/catalogue/view/1515/les-controverses-de-lusine-du-futur>

Concernant la littérature grise, le sujet de l'industrie du futur est relativement récent : 2008 en Allemagne et aux États-Unis, un peu plus tardivement en France. Malgré le nombre, la diversité des auteurs et du contenu, trois grandes catégories de rapports peuvent être distinguées :

- **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, etc.) 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 se focalisent sur une ou plusieurs technologies et s'attachent à en montrer le potentiel au travers de cas d'usages en 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 se 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 envisagé 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.**

Souvent, ces études 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 industrielle, et les technologies associées depuis un siècle, ont permis à l'industrie 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.

Concernant les publications scientifiques, elles 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 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.

Les chercheurs interrogés et les publications scientifiques consultées montrent 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.** Les modèles 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 (voir frise ci-dessous).

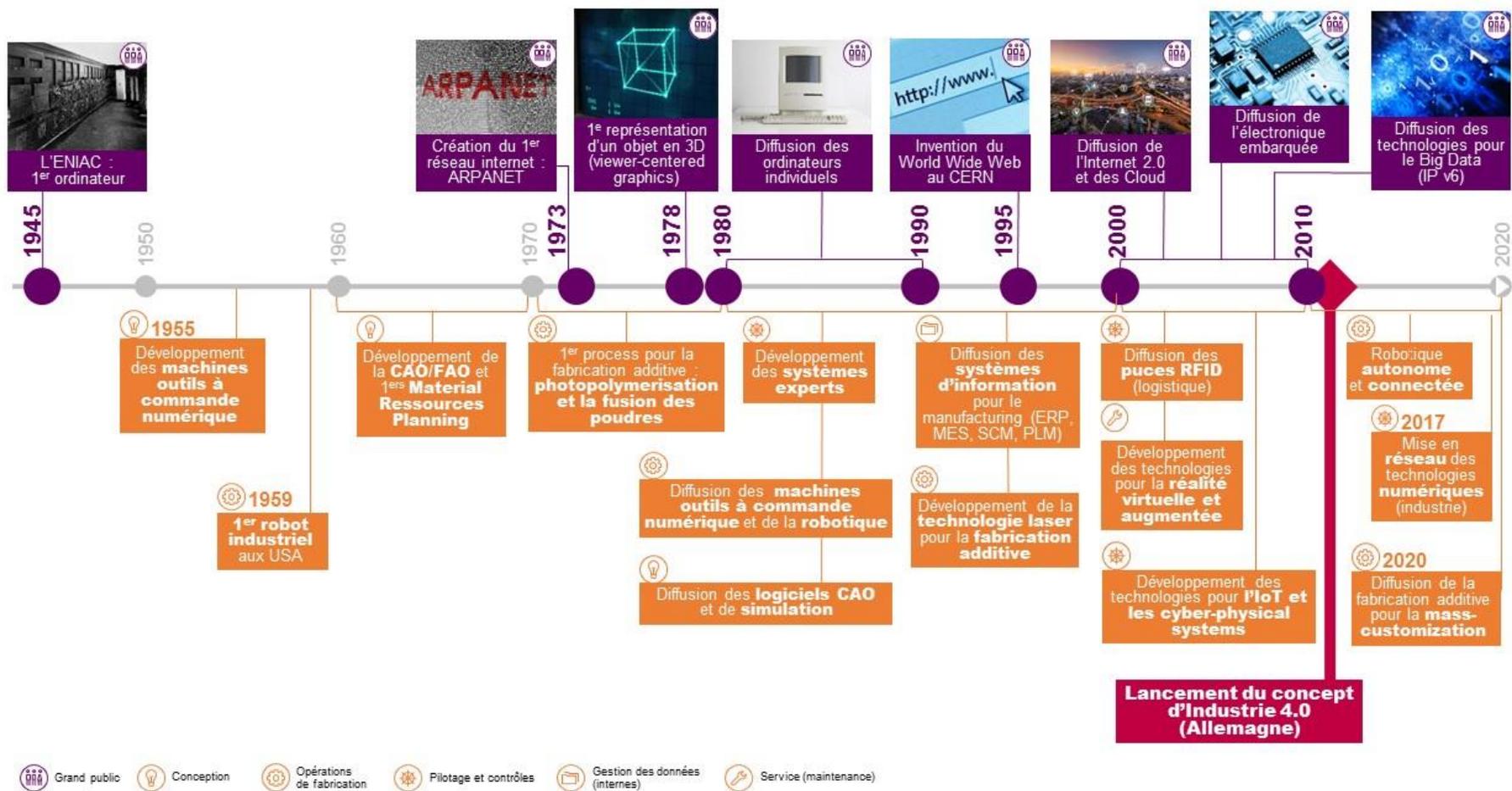


Figure 2 : Représentation des innovations incrémentales dans l'industrie

La première conclusion de cette revue technologique est la **polysémie du vocabulaire « numérique »**. Il ne recouvre pas les mêmes réalités selon 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. Aujourd'hui, l'estimation de la consommation énergétique d'un équipement et son éventuelle re-conception pour en réduire la consommation nécessitent à la fois du temps et des compétences spécifiques. Évaluer celle d'un atelier à l'aune de ses équipements cyber-physiques demande de nombreux travaux de recherche complémentaires (efficacité énergétique, matières, eau, etc.).

Le point de vue des industriels

Le numérique vu comme continuité logique : pour la majorité des industriels, il est vu comme une ambition presque purement technologique à des fins d'amélioration des procédés de production, d'augmentation de la sécurité et de gain de temps. Ainsi, 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 ». 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. Certaines industries sont reconnues comme pionnières, comme le secteur automobile ou aéronautique, qui semblent avoir une longueur d'avance, notamment en raison de leur dynamisme économique qui facilite les investissements dans le numérique.

Le numérique vu comme une rupture : le numérique a une mise en œuvre très individualisée, les solutions étant très particulières à chaque industriel (y compris d'un même secteur). L'introduction du numérique dans une logique disruptive s'oriente davantage vers une stratégie de développement de nouveaux modèles d'affaires, repensant la relation entre équipements, industriels et clients. Ces industriels entendent anticiper les évolutions de la demande, avec par exemple le besoin d'individualisation, de réponse plus rapide, et de précision du contrôle des ressources (humaines, en matières premières ou financières). Néanmoins ces acteurs sont en minorité, et appartiennent à des grands groupes permettant d'avoir un département qui travaille exclusivement sur cette vision.

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 de l'investissement initial. Ces mesures ne répondent pas nécessairement au besoin de retour sur investissement relativement rapide auxquels sont soumis les industriels. Néanmoins, d'une manière générale, l'arrivée du numérique dans l'industrie est perçue comme un **vecteur d'opportunités**.



3.2. Bibliographique environnementale

Au terme de recherches sur plusieurs bases de données scientifiques, la revue bibliographique environnementale a finalement retenu 59 articles scientifiques jugés pertinents (tous postérieurs à l'année 2008). Ce nombre relativement faible traduit un manque de recul de la recherche scientifique sur le sujet des impacts des technologies numériques sur l'environnement : l'essor de l'industrie du futur est encore récent, et logiquement l'étude de ses impacts environnementaux l'est aussi. Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse des 59 publications retenues.

Tableau 2 : Analyse des publications scientifiques traitant les sujets « numérique » et « environnement » (59 publications retenues)

| Axe d'analyse | Résultat | Conclusion | |
|--|----------------------|-----------------|---|
| Etape du cycle de vie⁴ | Mono-étape | 13 publications | 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. |
| | Cycle de vie partiel | 15 publications | |
| | Cycle de vie complet | 11 publications | 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. |
| Critères environnementaux⁵ | Mono-critère | 14 publications | 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. |
| | Bi-critères | 15 publications | 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 CO ₂ . Les études bi-indicateurs conjuguent le plus souvent les émissions de GES et les consommations d'énergie. 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 Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). |
| | Multi-critères | 19 publications | |
| Impacts environnementaux⁶ | Impacts directs | 42 publications | 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 |

⁴ 20 publications sont classées dans une catégorie « Autre / Non applicable » (notamment des études à méthodologie qualitative et non quantitative).

⁵ 11 publications sont classées dans une catégorie « Autre / Non applicable » (notamment des études à méthodologie qualitative et non quantitative).

⁶ Certaines publications mentionnent plus d'un type d'impact.

| Axe d'analyse | Résultat | Conclusion |
|---------------------|-----------------|--|
| Impacts indirects | 45 publications | potentiellement induits par ces technologies. Il s'agit d'une approche spécifique à l'évaluation environnementale des TIC. La grande majorité des publications s'intéressent principalement à l'analyse des impacts directs des technologies numériques ; 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 ; ce sont dans la plupart des cas les bénéfiques associés à ces TIC (exemple : dématérialisation). Néanmoins, en l'absence de mesures spécialement dédiées à l'évaluation des impacts, l'acuité ou la pertinence méthodologique de ces publications peuvent être remises en cause. |
| Impacts systémiques | 14 publications | |

À date, les études scientifiques se focalisent sur les gains directs en énergie / GES permis dans l'industrie, sans quantifier les impacts engendrés par la technologie numérique en elle-même lors de ses phases de fabrication, transport, fin de vie, etc. Ainsi, les publications qui respectent deux principes d'évaluation, à savoir multi-étapes (cycle de vie complet) et multi-critères, sont peu nombreuses tandis qu'aucune étude recensée ne concilie de façon correcte les trois axes d'analyse 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, 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 ou de la réalité virtuelle).

Néanmoins, ce manque général d'informations 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, **le secteur industriel doit mieux s'approprier 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**.

Conclusions des bibliographies technologiques et environnementales

L'usine du futur est aujourd'hui permise grâce au développement depuis un demi-siècle et à la convergence de technologies issues de l'information, des télécommunications et des technologies de production. Qu'il soit vu comme une continuité logique de l'évolution du système de production ou comme une réelle rupture (notamment les systèmes cyber physiques), le numérique est toujours perçu comme un vecteur d'opportunités par les industriels, même si sa diffusion varie en fonction des secteurs. Toutefois, l'impact environnemental de l'intégration de ces technologies est rarement questionné, que ce soit par la littérature grise qui le considère comme un bénéfice indirect, ou par les publications scientifiques qui manquent de recul sur l'évaluation environnementale de systèmes complexes, étant donné le récent essor de l'industrie du futur.

Concernant plus particulièrement les publications scientifiques, celles-ci ne sont pas assez exhaustives en termes de méthodes d'analyses : bien souvent elles se focalisent sur les gains directs en énergie / gaz à effet de serre 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.), ni s'intéresser aux impacts systémiques associés et effets rebond. Ce manque d'analyse multi-étapes, multi-critères et multi-impacts, associé à une difficulté d'accès aux données (confidentialité des industriels) et à la complexité d'évaluer ces technologies transversales, empêche de se prononcer sur l'impact environnemental global du numérique dans l'industrie.

4. Résultats de l'analyse 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 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).

Chaque cas d'école a fait l'objet de 3 à 4 entretiens en moyenne auprès d'industriels de secteurs différents, soit au total 12 industriels, 5 acteurs de l'offre numérique et 5 experts interviewés.

Le tableau ci-dessous présente les 9 cas d'école retenus dans le cadre de cette étude suite à un comité de sélection réalisé le 2 mars 2017 ayant réuni des acteurs tels que DGE, DGEC, AFIM, Alliance du Futur (Siemens et Fives), etc.

Tableau 3 : Cas d'école de l'étude

| N° | Titre | Description |
|----|--|--|
| 1 | La simulation numérique 4.0 | 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, elle représente en permanence la situation de l'usine réelle. |
| 2 | La personnalisation de masse de la chaîne de production | 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. |
| 3 | L'optimisation des procédés par l'introduction de 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) ; |

| N° | Titre | Description |
|----|---|--|
| | | 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. |
| 4 | 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. |
| 5 | Le business intelligence | L'informatique décisionnelle (en anglais <i>business intelligence</i>) 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 à un décideur une vue d'ensemble de l'activité. Dans ce cas d'école, le « business intelligence » désigne l'analyse croisée de données internes à l'entreprise (issues de divers départements) et externes à l'entreprise (données météorologiques, données financières, données de circulation automobile, etc.). |
| 6 | La cobotique | 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. |
| 7 | La fabrication additive sable | La fabrication additive sable désigne un procédé de fabrication par ajout de sable, la plupart du temps assistée par ordinateur. Elle est définie comme la fabrication par empilement de couches successives, par opposition à l'usinage qui fonctionne par retrait de matière. |
| 8 | La traçabilité des flux et des produits | Relevant de l'internet des objets industriels, la technologie RFID permet d'identifier précisément chacune des pièces ou élément produit afin d'en effectuer un suivi efficace. Ce cas d'école étudie à la fois le suivi des objets industriels et les processus qui s'y rattachent. |
| 9 | La maintenance prévisionnelle des moteurs électriques | La maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle fondée 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. |

L'ensemble des cas d'école sont présentés en annexe du rapport de l'étude, selon des fiches détaillées contenant les rubriques suivantes : Typologie / Mise en œuvre / Impacts économiques / Impacts environnementaux / Impacts sociaux / Perspectives / Sources. Cette synthèse en présente les principaux enseignements.

Au terme de l'analyse, on distingue deux catégories de cas d'école :

1. **Les 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, et 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).



4.1. Des enjeux et des difficultés autour de la donnée

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.

Dans ce contexte pourtant, il a été difficile d'obtenir certaines données, ce qui s'explique par :

- **La confidentialité des données.** Ainsi les données économiques et sociales sont généralement disponibles, mais souvent confidentielles. Il apparaît souvent que l'industriel est encore à un stade de test vis-à-vis des technologies ciblées, et ne souhaite pas nécessairement communiquer sur ces expérimentations. 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. Il y a donc 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) et d'autre part, une certaine culture du secret chez les acteurs industriels, qui peut se traduire par des accords de confidentialité ou encore des besoins renforcés en cyber-sécurité.
- **L'indisponibilité des données.** Ainsi 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. 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 ;
- **Les difficultés à isoler certaines données au sein d'un groupe industriel.** Par exemple, il n'est pas possible d'isoler la part du numérique dans la réduction ou l'augmentation des émissions de GES d'un groupe industriel.

4.2. Une prédominance des critères et des impacts économiques

La plupart des entreprises ont conscience des enjeux de long terme, environnementaux et sociaux, mais n'en font pas des éléments d'aide à la décision. La question de la transition écologique est cloisonnée (par rapport au sujet du numérique) : d'une part, elle n'est pas traitée à un niveau stratégique pour l'entreprise ; d'autre part, elle est abordée principalement par les risques, la norme, la qualité, la maîtrise des coûts.

Ainsi, 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 peuvent être 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.).

Dans la mesure où le numérique est mis en place dans l'industrie principalement pour gagner en productivité, les impacts économiques les mieux connus sont à ce niveau-là, et peuvent être significatifs sur des cas bien précis comme la personnalisation de masse de la chaîne de production, qui suppose une forte automatisation se traduisant par des gains importants de productivité (les cas analysés présentent des gains de 30%, et jusqu'à un doublement de la productivité). Toutefois pour des cas



d'école plus transverses, comme la *business intelligence*, les impacts restent encore indéterminés : les entreprises sont encore dans une phase d'expérimentation et n'ont pas de résultat tangible à date.

À noter que les montants investis (CAPEX) dans les projets de transition numérique peuvent être significatifs, allant de quelques centaines de milliers d'euros (capteurs, cobots, etc.) jusqu'à plusieurs millions d'euros pour les projets les plus ambitieux (jumeau numérique, pilotage à distance de plusieurs sites industriels). Certains acteurs remontent également des difficultés pour financer leurs projets. Parmi les cas d'écoles étudiés, seules deux entreprises ont bénéficié d'aides publiques (conseil régional, subvention européenne, BPI).

4.3. De réels impacts sociaux

Quoique difficiles à quantifier, les impacts sociaux du numérique sont réels, à la fois d'un point de vue qualitatif (sur les conditions de travail, l'organisation du travail et les ressources humaines) et quantitatif.

D'un point de vue qualitatif, le numérique a d'abord des effets sur les conditions de travail : le numérique est généralement reconnu comme un facteur d'amélioration de la sécurité au travail et de réduction de la pénibilité des tâches. Plusieurs exemples issus des cas d'école le prouvent ; la cobotique, par exemple, 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.

Le numérique a également 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 :

- À 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 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.

Enfin, avec le déploiement du numérique dans les entreprises, de nouveaux métiers sont apparus (*data scientist*, nouveaux métiers de programmation des machines et des robots, etc.) et de nouvelles directions ont été créées (i-lab, direction de l'innovation, etc.). 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.

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.



D'un point de vue quantitatif, l'impact du numérique sur l'emploi est lui aussi ambivalent. D'un côté, le numérique peut être dans certains secteurs un facteur de relocalisation des emplois : cette promesse est faite par les promoteurs de l'industrie du futur, et se concrétise dans un certain nombre de cas d'école. La plupart des entreprises interrogées, PME et grands groupes industriels, considèrent l'investissement dans de nouvelles technologies numériques comme un moyen 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. 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. En lien avec un point précédent, il faut noter 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.

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, à date, globalement défavorable aux pays industrialisés dans la mesure où 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. Au-delà de ce mouvement de balancier entre pays développés et pays en développement, l'essor du numérique pourrait se traduire, d'ici à 2020 et au-delà, par une perte nette d'emplois industriels au niveau mondial. Selon le rapport du World Economic Forum publié en janvier 2016⁷, « 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.

4.4. 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 :

1. **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 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 certaines machines.
2. **Les préjudices environnementaux, quant à eux, correspondent aux impacts environnementaux directs des technologies étudiées :** ils sont liés aux consommations d'énergie et de ressources des nouvelles technologies (*hardware* et *software*), sur l'ensemble de leur cycle de vie (fabrication, usage, fin de vie). Les impacts environnementaux directs sont :
 - a. Parfois négligeables au regard des impacts environnementaux des procédés industriels eux-mêmes (exemple du cas d'école n°4 – Le pilotage à distance du procédé industriel) ;
 - b. Parfois plus conséquents, toujours au regard des impacts des procédés industriels eux-mêmes. Pour ces technologies-là, il existe un arbitrage entre :

⁷ World Economic Forum (2016), The Future of Jobs. Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution

- 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).

Si les impacts directs des technologies numériques déployées sont parfois connus ou peuvent être estimés, les effets rebond en revanche sont systématiquement inconnus : 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).

3. **L'indicateur environnemental le plus suivi est celui de la consommation énergétique.** Les autres indicateurs environnementaux sont rarement suivis (consommation de ressources, rejet de polluants dans l'eau, l'air, le sol) : 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.
4. **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 (comme les capteurs de mesure ou les imprimantes 3D sable) ;
 - b. Soit au contraire que les technologies numériques permettent un allongement de la durée de vie des équipements (comme la maintenance prévisionnelle des moteurs électriques).



Sans entrer dans le détail des différents indicateurs environnementaux, le tableau suivant présente une évaluation qualitative des impacts environnementaux potentiels des neuf cas d'école étudiés.

Tableau 4 : Évaluation qualitative des 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 | +++ | <u>Phase d'usage</u> : Consommations et émissions mieux maîtrisées du fait de la simulation numérique en amont. | - | <ul style="list-style-type: none"> <u>Phases de fabrication et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des équipements de simulation numérique (<i>hardware</i>) <u>Phase d'usage</u> : consommation d'énergie des équipements informatiques supplémentaires liés aux logiciels de simulation (<i>software</i>) |
| | | Ressources | +++ | | - | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | ++ | Les bénéfices seront plus importants au sein de l'industrie lourde (chimie, métallurgie). | 0 | |
| 2 | La personnalisation de masse de la chaîne de production | Énergie | + | <u>Phase d'usage</u> : L'automatisation de chaînes de production de petites séries permet une optimisation globale de la phase de production, et une réduction des consommations. | - | <ul style="list-style-type: none"> <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des robots ou nouvelles machines |
| | | Ressources | + | | - | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | 0 | | 0 | |
| 3 | L'optimisation des procédés par l'introduction de capteurs de mesure | Énergie | +++ | <u>Phase d'usage</u> : Consommations et émissions mieux maîtrisées du fait de leur suivi fin. | -- | <ul style="list-style-type: none"> <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des capteurs et instruments de mesure |
| | | Ressources | ++ | | -- | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | ++ | Tous les secteurs sont concernés. | 0 | |

| | | | | | | |
|---|--|---------------------------|-----|---|----|---|
| 4 | Le pilotage à distance du procédé industriel | Énergie | ++ | <u>Phase d'usage</u> : Le pilotage centralisé permet une optimisation globale des consommations, notamment d'énergie. | - | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie des logiciels de pilotage à distance |
| | | Ressources | + | | 0 | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | + | | 0 | |
| 5 | Le <i>business intelligence</i> | Énergie | + | <u>Stockage et phase d'usage</u> : L'utilisation de données internes et externes permet d'optimiser les flux, notamment de matières. | -- | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie des logiciels de <i>business intelligence</i> |
| | | Ressources | ++ | | - | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | + | | 0 | |
| 6 | La cobotique | Énergie | + | Les bénéfices environnementaux de la cobotique sont limités. | - | <ul style="list-style-type: none"> • <u>Phases de fabrication, d'usage et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des cobots |
| | | Ressources | + | | -- | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | 0 | | 0 | |
| 7 | La fabrication additive sable | Énergie | + | <u>Phase d'usage</u> : Le principal bénéfice concerne l'économie de matière, notamment pour la fabrication de pièces complexes. 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>Phases de fabrication et fin de vie</u> : consommation d'énergie et de ressources des imprimantes 3D et des consommables (résines) • <u>Phase d'usage</u> : consommation d'énergie des imprimantes 3D |
| | | Ressources | +++ | | - | |
| | | Polluants (air, eau, sol) | + | | 0 | |



| | | | | | | |
|---|---|---------------------------|-----|---|----|--|
| 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 | |

Les bénéfices environnementaux présentés dans le tableau ci-dessus sont des bénéfices potentiels, permis en théorie par la technologie mais non nécessairement mesurés en pratique par les industriels, et spécifiques à chaque secteur.

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. 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. Il n'y a pas de « changement de modèle » de ce point de vue-là.

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).



5. Cartographie des controverses : principaux enseignements

Les controverses "Usine du futur, développement durable et numérique" n'existent pas encore vraiment dans l'espace public ni dans le débat scientifique. À la différence de ce qui se joue dans d'autres champs (le numérique dans l'éducation, les libertés individuelles), l'usine du futur ne mobilise aujourd'hui que les spécialistes de son déploiement; tandis que les spécialistes de l'économie numérique, par exemple, connaissent assez peu l'industrie "classique", les uns comme les autres maîtrisant souvent assez mal les enjeux environnementaux.

De son côté, l'ADEME agit « traditionnellement » sur les croisements entre industrie et développement durable, tandis que la FING conduit avec son programme Transitions2⁸ une exploration des croisements entre transition écologique-énergétique et numérique. Il s'agit donc ici d'explorer les potentiels et les limites d'un sujet nouveau croisant "Usine du futur, développement durable et numérique".

Le travail sur les controverses, s'il permet d'enrichir la lecture d'un sujet, permet aussi de le faire mûrir et de le rendre plus lisible : ainsi a-t-on vu depuis plusieurs années la vision très technicienne de la "smart city", à l'échelle mondiale, faire l'objet de vigoureux débats et remises en cause, du fait de son caractère trop instrumental et "clé en main". Il s'est agi de confronter les moyens numériques aux enjeux principaux des villes, notamment sur le plan de l'énergie, des mobilités et de la consommation des ressources, et de mieux intégrer ces propositions aux projets urbains et aux bénéfices espérés en termes de développement durable. L'usine du futur peut-elle suivre le même cheminement ? C'est ce que nous espérons en la mettant en débat.

5.1. Le numérique : écart entre définitions

Lors des ateliers réalisés au sein de ce cycle prospectif, la question du périmètre du numérique est apparue assez vite : au sein même des grandes entreprises industrielles (dans l'automobile par exemple), les responsables du "digital" sont souvent assez éloignés des "usines". Les uns se focalisent sur les procédés, les process et les systèmes techniques (informatique, réseaux, capteurs...) qui permettent une meilleure performance industrielle; les autres explorent le potentiel des data et des systèmes numériques, mais aussi les mutations des usages numériques, pour développer de nouveaux services, de nouvelles relations et coopérations. Les mutations numériques sont loin d'être seulement techniques, et quand elles le sont, elles mobilisent surtout des technologies matures; mais ce sont aussi des transformations politiques, économiques, sociales et territoriales. Cette précision est nécessaire pour penser l'usine dans son territoire ou l'usine en relation avec ses environnements humains (interne et externe).

5.2. Une lecture des promesses numériques-environnementales potentielles de l'usine du futur

L'exploration du sujet révèle des attentes éparses des industriels à l'égard du numérique, souvent traitées de manière disjointe. Un premier recensement de ces promesses « numériques-environnementales » potentielles est résumé ici :

Optimiser la consommation – Usine sobre

- Energie (comptage et outils de pilotage) (réseaux intelligents, ENR)
- Matière (conception - modèles numériques, fabrication additive)
- Diminution radicale des stocks (fabrication à la demande)

Améliorer le cycle de vie – Usine agile

- Agilité : modularité, souplesse dans la journée et sur la durée, effacement
- Maintenance (prédictive, ...)
- Réparabilité des produits
- Bâtiment industriel, site (jusqu'à l'usine mobile ?)

Réduire les déplacements, renforcer la proximité – Usine proche

- « Coût du travail et délocalisations » versus « robots, fabrication numérique et relocalisations »

⁸ <http://fing.org/?Transition2>

- Approvisionnements locaux ? Usine urbaine ?
- Renforcer les mutualisations et les coopérations entre acteurs économiques (synergies inter-entreprises)

Réduire les déchets et la pollution – Usine propre

- Mesure et traçabilité des déchets
- Respect des normes, des réglementations (émissions industrielles...)

Cet ensemble pourrait constituer la base d'une vision plus systémique de l'usine du futur.

5.3. Principales controverses potentielles

Sont proposés ci-après plusieurs énoncés de controverses potentielles qui synthétisent le travail d'exploration collective mené : ils sont délibérément radicaux et très simplifiés, de façon à aiguillonner les débats.

- L'usine du futur, loin d'être bénéfique pour la transition énergétique, serait le *green washing* des habituels gains de productivité, la mode qui succède au *lean* : rien de neuf, le sujet est purement économique, pas écologique.
- Le numérique optimise pour faire mieux la même chose et ne changera pas de modèle, l'usine du futur ne sera jamais sobre, le principal débouché est pour les "vendeurs de pelles et de pioches" de l'industrie numérique.
- Le numérique produit de l'innovation jetable, toujours plus rapide, et de l'obsolescence, il ne peut pas aider l'industrie à faire autrement.
- Le numérique fait partie du problème, il a sa propre empreinte, énergétique entre autres.
- Le numérique c'est l'automatisme, donc la perte des savoir-faire humains, et donc des capacités de réparation des objets.
- L'usine du futur, c'est pour les grands acteurs industriels qui ont les moyens, c'est hors d'atteinte pour les PME.
- Les promesses de l'usine du futur ne sont pas tenables, ne serait-ce que sur le plan numérique : données confidentielles, formats propriétaires et non standards donc problème d'interopérabilité, forte complexité des dispositifs.
- L'usine est un vieil objet, il faut repenser les formes industrielles (modulaires, mobiles, plus près du marché).
- Une usine hors-sol ? L'usine du futur se concentre sur le projet industriel et néglige les externalités :
 - le cycle de vie du produit est largement hors de l'usine ;
 - l'usine impacte le territoire (consommation de ressources, logistique, pollution,...) ;
 - et le bassin de vie (qualité de vie des travailleurs, des habitants,...).

Ces controverses potentielles concernent donc à la fois le rôle du numérique et ses difficultés propres, la dimension sociale et les mutations du travail, les défis environnementaux voire l'usine en elle-même.

5.4. Pistes transversales issues de l'exploration des controverses

L'exploration permet de qualifier un ensemble de promesses très riches, mais orphelines : personne ne les porte aujourd'hui, leur récit n'existe pas encore réellement, chaque acteur les raconte séparément et à sa façon. On voit apparaître une série de "solutions numériques" dont beaucoup sont probablement pertinentes pour les industriels qui les adoptent, mais elles ne forment pas une vision partagée du développement industriel.

L'usine du futur et ses attributs qualifiés plus haut (5.2) sont pourtant porteuses de réponses à de nombreux défis environnementaux, territoriaux, systémiques. Mais les réponses semblent préexister aux questions et à une qualification des enjeux.

Il semble donc nécessaire de **construire une vision globale, une ambition collective** permettant de fédérer les efforts et de relier l'usine du futur à des finalités d'intérêt général dont l'environnement; **et**

de définir un cadre d'interprétation qui permette aux acteurs (politiques publiques nationales et territoriales, porteurs d'actions collectives, industriels) de situer leurs actions : si toutes les parties prenantes s'accordent sur les principaux critères de qualité environnementale d'un projet "usine du futur", les acteurs de politiques publiques pourront cadrer leur action, les industriels leurs projets, les fournisseurs de l'usine du futur leur offre.

Le travail sur les controverses, en faisant débattre technologie et société, contribue à souligner que ce sujet est **aussi une question de culture** (par exemple, culture de la donnée, culture environnementale) **et pas seulement de process et d'efficacité**. C'est à la fois une question de décloisonnements internes (numérique, industrie, développement durable), de communautés de pratiques, de formation initiale et continue, et de culture des dirigeants.

Il met également en lumière **l'existence encore modeste d'un champ d'innovation, en quête de sens et de visibilité**. Les enjeux sont à la fois la nécessité d'une innovation ouverte, tirant parti de la modularité et de l'agilité de l'innovation numérique, **et de la prise en compte par cette innovation de la dimension environnementale**.

Un travail sur l'innovation se confrontera au contraste entre la difficulté de la transformation et de la mutation des acteurs existants, contraints de gérer les actifs existants, et les dynamiques de création.

À mesure que le numérique pénètre dans l'usine comme dans la société, il les structure, notamment par le code et les algorithmes. Sa capacité normative, le fait qu'il "codifie" les informations et les processus, peut venir à l'appui des normes environnementales (et sociales), aussi bien dans l'usine que dans son environnement.

Dernier enseignement, la nécessité de porter plus clairement la vision d'un **numérique humain, sociétal, territorial et environnemental**, ne se réduisant pas à la dimension technologique mais prenant en compte la richesse des potentiels de la transformation numérique ainsi que ses écueils.

6. Recommandations

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.

Tableau 5 : Recommandations de l'étude

| N° | Recommandation |
|--|---|
| Axe I : SAVOIR. Comblent le manque actuel de connaissances et de données sur les impacts environnementaux et sociaux des technologies numériques au sein de l'industrie | |
| 1 | Proposer des indicateurs simples, à destination des industriels, pour l'évaluation environnementale et sociale des technologies numériques dans l'industrie |
| 2 | Développer la collecte des données environnementales et sociales des technologies numériques dans l'industrie, en s'appuyant sur les acteurs du numérique (lancement de travaux dédiés de type ACV ou monographie selon le type de technologie concernée, etc.) |
| 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 |



| N° Recommandation | |
|---|---|
| Axe II : VOULOIR. Faciliter l'engagement des entreprises de l'offre et des industriels dans une transition numérique responsable | |
| 4 | Renforcer l'expertise environnementale au sein des acteurs de l'Industrie du Futur, notamment l'Alliance Industrie du Futur |
| 5 | Impliquer davantage les acteurs du numérique dans l'amélioration de la performance environnementale de leur produits et services |
| 6 | Accompagner la mutation des emplois d'aujourd'hui et de demain pour associer enjeux environnementaux et enjeux numériques |
| Axe III : POUVOIR. Adapter les règles de financement de l'usine du futur en corrélant transition numérique et transition écologique de manière plus systématique | |
| 7 | Faire évoluer les outils financiers existants, notamment en intégrant des critères d'éco-conditionnalité aux aides publiques à la transition numérique de l'industrie |
| Recommandation transversale | |
| 8 | Articuler les ambitions nationales et européennes à court, moyen et long terme sur les sujets du numérique et de la transition énergétique et écologique |

7. Conclusions

Ces travaux montrent qu'il y a encore peu de données sur les impacts environnementaux de ces technologies et que les industriels n'associent pas ou peu les évolutions numériques aux enjeux environnementaux. Ceci confirme la nécessité d'intégrer la transition énergétique et écologique aux mutations numériques de l'industrie, et ce, de manière concomitante avec l'intégration d'aspects sociaux et sociétaux (culture de la donnée, montée en compétence, évolution des postes de travail...).

Parmi les axes de travail identifiés, l'amélioration des connaissances sur les impacts environnementaux de ces technologies numériques semble un prérequis étant donné le peu de données actuellement disponibles ; puis vient la nécessité d'embarquer les entreprises dans une transition numérique durable, que ce soit les acteurs de l'offre numérique (réduction de l'empreinte environnementale de leurs produits et services) comme les industriels et les financeurs (intégration de critères environnementaux dans les dispositifs existants de soutien à la digitalisation de l'industrie), tout en veillant à accompagner la mutation des emplois (formation).

Les enjeux liés au concept d'usine du futur sont donc complexes, bien au-delà d'une approche uniquement technologique, qu'elle soit numérique ou énergétique. L'ambition de l'ADEME est de faire de l'usine du futur un levier de la transition énergétique et écologique, notamment en profitant des travaux de modernisation des usines (incluant des technologies de l'usine du futur) pour y intégrer de l'efficacité énergétique, qui ne serait pas financée autrement ; et ceci ne pourra se faire qu'en travaillant avec l'ensemble des acteurs (industriels, chercheurs, acteurs de la formation, etc.) et les initiatives qui les structurent comme l'Alliance pour l'Industrie du Futur.



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.





INDUSTRIE DU FUTUR : COMMENT ALLIER TRANSITION NUMERIQUE ET TRANSITION ENERGETIQUE ET ECOLOGIQUE

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 ?).

Deux travaux ont été lancés par l'ADEME mi-2016 afin d'explorer les corrélations et interactions entre industrie du futur et transition énergétique et écologique. Tout d'abord, l'étude intitulée « Impacts du numérique au sein de l'industrie au regard de la transition énergétique et écologique (TEE) » a été confiée au cabinet Deloitte, afin d'objectiver et de quantifier (dans la mesure du possible) les impacts du numérique dans l'industrie, au regard de la TEE. En parallèle, l'ADEME a co-organisé un cycle prospectif intitulé « Les controverses de l'Usine du Futur » avec la Fondation Internet Nouvelle Génération (FING) et l'appui de Mines ParisTech et Télécom ParisTech, autour de trois questionnements : quelle place pour les humains dans l'usine du futur ? Cette dernière sera-t-elle propre ? Et ses produits seront-ils low-tech, durables et réparables ?

L'objectif de cette synthèse est de présenter les résultats de ces deux travaux 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'Energie

www.ademe.fr

