

Les rapports
d'étonnement



Rapport d'étonnement de l'atelier du cycle national 2017-2018
Prospective de l'usine et de la fabrication

Cycle national
de formation
2017-2018

*L'inconnu
et l'incertain
Comment
les distinguer
et faire avec*

Prospective de l'usine et de la fabrication

Résumé

Ce document présente un état de situation et un rapport d'étonnement sur l'usine de demain et la fabrication du futur. Il aborde les différentes facettes et les tendances de la fabrication d'aujourd'hui, pour essayer de se projeter dans les futurs possibles.

Le rapport dresse d'abord un état des lieux, des dynamiques en œuvre, autour des enjeux relevés : enjeux techniques, enjeux des marchés, enjeux des compétences, enjeux territoriaux, enjeux sociaux (emploi et travail, formation).

Deux scénarios contrastés sont ensuite présentés ; ils brossent un champ des possibles, entre persistance du concept d'usine, certes en forte évolution, et émergence de centres de fabrication délocalisée, territoriale, collaborative.

Des points d'étonnement et d'attention sont proposés et explicités, par exemple sur la protection des données, la législation du travail, la place du mouvement des "Makers", le statut de l'humain et du travail dans un monde automatisé, la place des biotechnologies, et les modèles de société qui vont caractériser cette fabrication du futur.

Animatrice de l'atelier

Raphaële BIDAULT-WADDINGTON, spécialiste des tendances socio-culturelles, économiques et urbaines, fondatrice du Laboratoire d'Ingénierie d'Idées (LIID)

Auditeurs de l'atelier

Dominique BAILLARGEAT, professeur, directeur du laboratoire XLIM, Université de Limoges

Jean-Marc DELTORN, examinateur, Office européen des brevets

Virginie FARRE, responsable des ressources humaines, Institut national de la santé et de la recherche médicale, Inserm

Christian FILLON, chef de la division Criminalistique, Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale, IRCGN, Gendarmerie nationale

Patrice GIORDANO, chef de service, Service des accidents graves, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, IRSN

Fabrice IMPERIALI, directeur adjoint, Direction de la communication, Centre national de la recherche scientifique, CNRS

Florence LEFEBVRE-JOUD, adjoint au directeur, Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux, LITEN, CEA

Sylvain PERRET, directeur, département Environnements et Sociétés, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Cirad

Caroline Hélène TOURBE, chef de service, magazine *Science et Vie*, groupe Mondadori

Marie-Line VAIANI, directrice Filières industrielles Energies renouvelables et stockage, Pôle énergies renouvelables, Electricité de France, EDF

Personnalités rencontrées ou entendues

Mathilde BERCHON, Corporate Lead chez TechShop - Ateliers Leroy Merlin, auteure de «L'impression 3D» (Ed. Eyrolles, 2014) et spécialiste du mouvement maker

Cyril DANE, président directeur général, société AIO

Olivier GUEZET, responsable du plateau d'accélération du programme Usine du Futur du groupe PSA

Vincent GUIMAS, co-fondateur des Arts Codés, président directeur général de La nouvelle fabrique, co-responsable du FabCity Summit 2018

Olivier LLUANSI, associé, conseil en stratégie et manufacturing, cabinet Ernst & Young

Tahar MELLITI, directeur général, Alliance Industries du futur

Gilles SAINT-PAUL, professeur à l'Ecole normale supérieure et Paris School of Economic

Cyrille VUE, président directeur général, Erpro & Sprint

Anne Céline WORMS, présidente directrice générale d'Art2M

Lieux visités

Techshop Ivry-ateliers Leroy Merlin

Techshop de la Station F, Paris

Introduction

Prégnant dans l'agenda stratégique actuel des industriels, le concept d'usine du futur ou d'industrie 4.0 ne se laisse pourtant pas aisément appréhender.

Avant d'en envisager les possibles réalités, posons d'emblée que la fabrication de biens reste et restera une activité économique importante : le commerce mondial dépend et dépendra encore longtemps de transactions de biens manufacturés, et non pas seulement de services (en 2014, les marchandises représentaient 79% de la valeur totale des échanges mondiaux, et les produits manufacturés 52%). Par ailleurs, au sein des nations membres de l'OCDE, des industries compétitives peuvent contribuer à la croissance et à la richesse, mais aussi au développement de territoires ; ces nations ne sauraient être seulement des consommatrices de biens manufacturés, loin, et dans des conditions de production non garanties en termes d'éthique et de durabilité.

Les contours de l'usine traditionnelle — « établissement industriel où, à l'aide de machines et de main d'œuvre, s'effectue la transformation des matières premières en produits finis » — ont été, au cours du temps, impactés par les révolutions industrielles successives : alors que le développement de la puissance mécanique et de la machine à vapeur a, dans un premier temps, permis une amélioration des conditions de travail, la rationalisation de la production de masse, la Taylorisation, a conduit à une transformation - et à une déqualification - du travail ouvrier, source de profonds changements sociaux. Depuis, l'industrialisation, l'avènement de nouveaux moyens de transport et la récente intégration des automates et robots ont été générateurs d'une production de masse et d'une baisse des coûts. La quatrième révolution industrielle, nourrie par la révolution numérique, augure quant à elle une transformation majeure des systèmes de production, de gestion et de gouvernance. Au travers de "briques d'innovation", la chaîne de production s'enrichit ainsi, à chacune des étapes de production, de nouvelles solutions en même temps qu'elle permet la collecte d'une multitude de données.

L'usine de demain sera ainsi le lieu d'une interconnexion de l'ensemble des moyens de production et d'un écosystème d'acteurs qui

permettra leur interaction en temps réel. Façonnée par l'intelligence artificielle, le Big data, les services digitaux, les déclinaisons sont multiples : maintenance prédictive, anticipation des stocks en fonction de l'avancement de la production, contrôle qualité, meilleure coordination entre les métiers, etc.

Si l'usine reste un lieu de fabrication de produits inscrit dans un modèle économique, l'étendue et la profondeur de ces changements posent donc des questions.

Tout d'abord sur l'évolution des enjeux industriels : ces derniers se mesurent évidemment d'un point de vue technique (nouvelles modalités de fabrication, nouveaux lieux d'innovation, connectivité et interopérabilité...) mais également en termes d'enjeux de compétences, d'organisation, et de métiers associés ; enfin, l'enjeu des marchés reste majeur, dans une usine qui n'est plus le lieu d'une production de masse mais qui fonde son avantage concurrentiel sur un besoin client différenciant et personnalisé.

Les enjeux de développement territorial auxquels sera confrontée l'usine de demain posent question également. Qu'il s'agisse de promotion de startups, de pôles de compétitivité, d'incubateurs innovants, l'écosystème local entend être attractif afin de pérenniser ou relocaliser la production, à l'instar de ce que Jeremy Rifkin préconise dans sa « 3ème révolution industrielle » : le système productif de l'usine doit être orienté « économie circulaire, développement local, auto-production », et donc nécessairement inscrit dans les territoires. Cette tendance a par ailleurs été renforcée par la démocratisation des techniques de fabrication digitale (imprimantes 3D, etc.), rendues accessibles à tous via le mouvement des "Makers", et l'apparition concomitante de "Makerspaces", au sein de grandes villes.

Le dernier enjeu de l'usine du futur concerne enfin les impacts humains et sociétaux, au-delà de l'usine : la menace de la disparition des emplois, l'évolution des conditions de travail, le risque de délocalisations sont notamment des questions déterminantes.

À l'issue d'un état des lieux, deux scénarios prospectifs seront proposés pour esquisser une usine du futur à l'horizon 2035 : l'un s'inscrivant en continuité avec le modèle actuel, et l'autre en rupture.

I. Etat des lieux

1. Enjeux industriels

La perspective d'une industrie 4.0 est d'ores et déjà au cœur des préoccupations des industriels : selon une enquête récente¹, plus de la moitié des dirigeants envisagent de modifier leur organisation en profondeur pour pouvoir s'y adapter. Parmi ces transformations, les plus sensibles sont l'intégration de nouveaux outils technologiques qui permettent un gain de productivité conséquent (a), les profonds changements en termes de marchés et des fonctions traditionnellement associées à l'usine (b), mais également en termes de compétences et de formation (c).

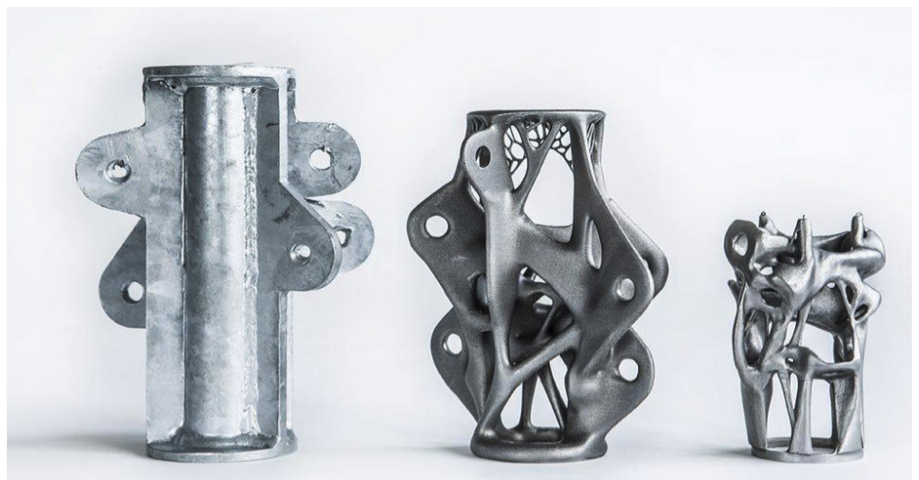


Fig 1: Optimisation par algorithme génétique et fabrication additive d'une pièce mécanique (arup.com).

1. O. Lluansi et A. Galloni, *Croire en l'industrie du futur et au futur de l'industrie*, Ernst & Young, 2017.

a. Enjeux techniques : vers de nouvelles modalités de fabrication

Les procédés d'automatisation basés sur les algorithmes sont certainement parmi les premiers moteurs de transformations qui portent l'évolution de l'usine. En effet, ils impactent l'ensemble de la chaîne de production. Au stade de la conception, les algorithmes génératifs permettent d'explorer des espaces de formes inédits (Fig. 1). Les simulations intégrées aux outils de conception assistée autorisent l'évaluation numérique des prototypes. L'optimisation des processus de fabrication permet de tirer le meilleur parti des ressources matérielles (en termes d'économie circulaire ou d'upcycling). Les outils numériques simplifient par ailleurs la transition robotique: les cobots apprennent à anticiper seuls leurs comportements et à opérer en toute sécurité à proximité du personnel de l'usine. Enfin, le déploiement de plateformes robotiques modulables conduit à une plus grande simplicité de mise en œuvre et à une baisse des coûts (Fig. 2).

Mais l'automatisation n'est pas seul moteur de transformation des modes de production : l'émergence de nouveaux procédés de fabrication est également à la source de changements profonds. La

fabrication additive (FA) est un terme utilisé dans le monde de l'industrie pour évoquer la création d'objets par des imprimantes 3D. Le produit fini est obtenu par un ajout de matière (polymères, métaux...) en couches successives, soit l'inverse des méthodes classiques qui consistent à creuser et soustraire de la matière à partir de blocs de matière brute. La FA permet de passer rapidement du modèle à l'objet sans requérir une maîtrise technique importante et offre des possibilités de prototypage, si ce n'est de production, inédites, que ce soit en terme de personnalisation, de complexité des formes (Fig. 1) ou d'intégration d'un large spectre de matériaux (polymères, métaux, céramiques, voire organiques). Ces outils, également accessibles dans de nouveaux espaces de création partenaires ou alternatives aux laboratoires R&D traditionnels (FabLabs), pourraient participer au développement d'un écosystème usine-société plus ouvert.

Pour 81% des dirigeants, l'acquisition et le traitement des données est un des principaux axes de développement de l'usine à échéance de 5 ans². L'intégration de capteurs distribués au sein de la chaîne de production transforme l'usine en un réseau de production de données, dont l'analyse permet d'améliorer la traçabilité des processus et le contrôle qualité.

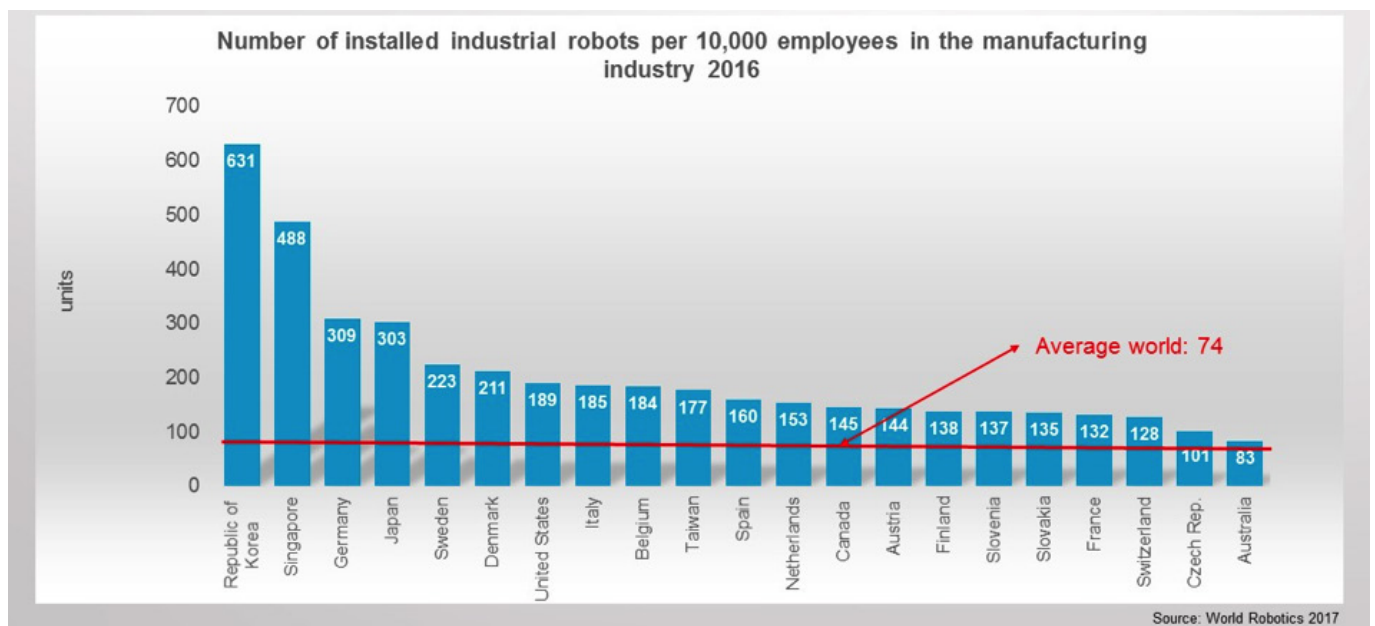


Fig. 2: Nombre de robots industriels pour 10 000 salariés dans l'industrie - 2016

Point d'étonnement: Dans cette industrie hyper-connectée, de l'amont à l'aval, comment, les risques associés à la protection de la "donnée", valeur en soi et indissociable des produits, sont-ils appréhendés, mesurés ?

b. Enjeux des marchés

Au cœur de la stratégie de l'usine du futur, la question des débouchés est primordiale en termes de survie économique. Le temps de la stratégie industrielle doit aujourd'hui correspondre aux besoins de clients désireux d'immédiateté et de produits différenciés et personnalisés, loin des grandes séries standardisées produites par l'usine traditionnelle.

La flexibilité accrue de l'outil industriel permet, pour ce faire, le développement d'outils de conception personnalisés à destination des clients tandis que les nouvelles modalités de fabrication autorisent une adaptation et une reconfiguration des chaînes de production favorables à des cycles de développement et à une fréquence de renouvellement de produits rapides, permettant d'accélérer la mise sur le marché (« speed time to market »).

Les processus d'innovation sont eux-mêmes revus pour anticiper et s'adapter aux besoins tendanciels des consommateurs au sein de nouveaux écosystèmes dans lesquelles l'usine est ouverte sur la société : « hackathons » (réunion d'équipe de développement sur une courte durée pour passer d'une idée au prototypage et tester l'usage), lieux de prototypages démocratisés (Makerspaces, FabLabs), custo-

misations par les clients eux-mêmes (DS3, SpeedFactory d'Adidas...).

Outre ce rapport B to C profondément modifié, la valorisation des données produites par ces transformations technologiques constitue également un enjeu de marché. Leur captation (tags RFID, capteurs Wifi), permet notamment d'offrir aux clients un suivi logistique inégalé (notamment grâce aux outils blockchains). Ces données, mines d'information sur les besoins des clients et leurs caractéristiques personnelles constituent d'autre part une véritable valeur économique.

Dans un environnement extrêmement concurrentiel à l'échelle mondiale, l'usine doit enfin proposer de nouveaux services ("service on top of product") et conquérir de nouveaux marchés. De fait, les modèles d'usine sont contraints de s'adapter. Ainsi, pour le groupe Peugeot, l'implantation d'usines entières en Chine s'inscrit dans une stratégie de conquête du marché local, contrainte par les barrières tarifaires exorbitantes pesant sur les exportations de véhicules. A contrario, le faible coût de la main-d'œuvre en Afrique permet d'y implanter des micros-usines, simples lieux d'assemblage de pièces. Enfin le phénomène de désintermédiation, au travers des services digitaux, induit une transition d'un modèle "produit → client" vers un modèle "(produit + service + données) → client" qui laisse présager l'émergence d'une culture de service encore bien souvent absente des pratiques des groupes industriels.

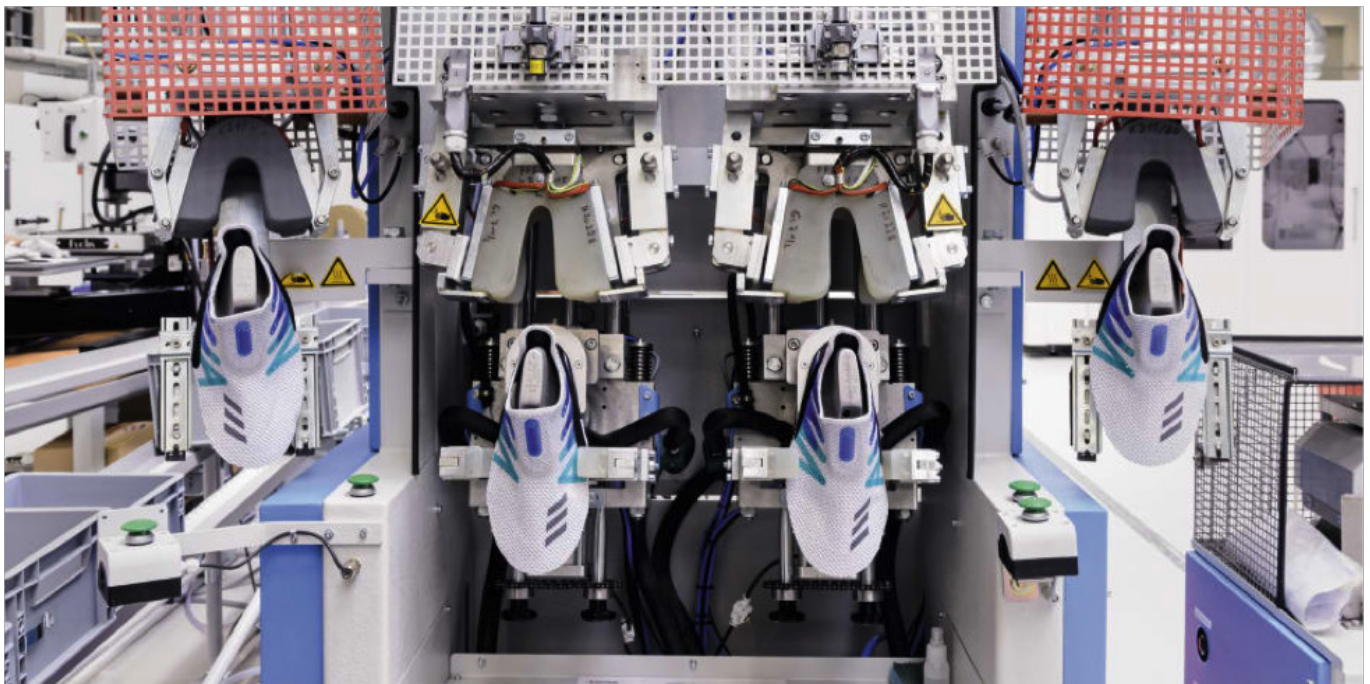


Fig.3: Adidas SpeedFactory (source: Alastair Philip Wiper).

c. Enjeux des compétences

Etonnamment, l'intégration des technologies 4.0 (hardware & software) dans l'outil de production n'est pas nécessairement perçue par les différents acteurs comme un obstacle: ces technologies existent, sont disponibles, et seraient implantables avec des coûts raisonnables. L'enjeu apparaît être davantage organisationnel et humain, du fait de l'évolution des métiers et des compétences requises que cette évolution technologique entraîne.

L'évolution des outils et postes de travail conduit à une nécessaire réflexion sur les modes d'organisation. Ainsi émergent de nouveaux concepts d'organisation, tels que l'Organisation responsabilisante par exemple, qui vise à donner plus d'autonomie et de responsabilités aux salariés qui prennent spontanément et directement les

décisions sur la chaîne de production, en identifiant eux-mêmes des modes opératoires plus efficaces, rapides et performants que ceux prescrits par les fonctions supports. Ces changements organisationnels génèrent de nouveaux métiers ou induisent de fortes adaptations. Au niveau des opérateurs, la mutation vers des lieux de fabrication plus agiles, plus créatifs et plus flexibles nécessite un ajustement des postes de travail. La place de l'humain n'est préservée que pour les seules activités où l'adaptabilité de l'homme reste supérieure à celle des robots (en regard par exemple d'une reprogrammation des robots/d'automates sur une chaîne). Au niveau analytique apparaît aussi de manière prégnante l'importance de postes comme celui de Chief Digital Officer pour la gestion des Big data générés tout au long de la chaîne de production.

Les évolutions des organisations et des métiers, quelles qu'elles soient, devront nécessairement être accompagnées par l'élaboration et la mise en place de cursus de formation adaptés. Certains défis étant d'ores et déjà identifiés.

Un premier défi concerne l'évolution du management de proximité. Jusqu'ici, les managers de proximité étaient ceux qui allouaient la ressource, et dont la promotion au rang de manager était souvent légitimée par leur compétence technique. Or la ressource de demain est une machine connectée et le savoir sera porté par la machine. Les formations au management devront ainsi intégrer une gestion d'un possible mal-être du manager de proximité, qui peut dorénavant être perçu comme un frein au changement. L'intégration de nouvelles pratiques de management, telles que le concept de manager-tuteur promu par Cyril Dané, président de A.I.O., ou le management agile, notamment pratiqué par Toyota, pourraient accompagner l'introduction massive de processus d'automatisation vecteurs d'anxiété - ou perçus comme des agressions - pour les salariés.

Un autre défi concerne l'évolution des métiers de conception : pour s'adapter aux nouveaux procédés de fabrication, il est en effet nécessaire de penser l'objet différemment. Les nouveaux logiciels de design sont enrichis de nouvelles fonctionnalités, voire construits sur de nouvelles bases, pour prendre en compte les mutations des procédés de fabrication, et être intégrés dans les outils de formation.

Enfin, un dernier défi concerne l'évolution de la relation homme-machine dans l'usine robotisée. Certains secteurs industriels, tels que l'automobile, qui peinaient déjà à pourvoir des postes en usine du fait d'une faible attractivité, devront relever le défi de promouvoir « la place de l'humain » dans un environnement fait de cobots et de machines connectées. L'introduction de robots, d'objets connectés et de capteurs, de technologies de fabrication additive, d'intelligence artificielle, d'outils de gestion des Big data, devrait contribuer à une amélioration des conditions de travail au quotidien avec la réduction de la pénibilité (robots ou exosquelettes pour la manutention des charges les plus lourdes) et du stress (réalité virtuelle pour l'aide au prototypage, capteurs pour anticiper la maintenance, ...).



Fig.4: Cobots et ouvriers (source: kuka robotics)

Point d'étonnement: Quelle est la place de la législation du travail dans cette industrie où cobots et machines intelligentes, ayant pouvoir de décision, côtoient les humains: la réflexion juridique ne se fait-elle pas distancer par la dynamique des nouveaux modes de travail ?

2. Enjeux territoriaux

La densité du tissu industriel constitue un enjeu essentiel du développement des territoires. On constate ainsi que les emplois dans les services sont préférentiellement localisés dans les métropoles tandis que les sites industriels continuent de s'implanter sur l'ensemble du territoire³.

Les territoires en ont bien conscience et rivalisent de mesures attractives pour séduire les acteurs industriels et de l'innovation (réduction de taxes, terrains à disposition, infrastructures rénovées, etc.). Ils mettent également en place, en complément des initiatives nationales des outils qui contribuent au développement d'un terreau industriel local. Nous avons pu le constater lors de nos visites à Toulouse et Lisbonne au cours desquelles nous avons pu mesurer l'attente que suscitent des outils tels que les incubateurs ou les espaces de co-working. On pourra également noter le rôle central des pôles de compétitivité, qui ont un fort ancrage territorial, dont l'objectif est de promouvoir l'innovation et la création d'emplois⁴.

Cette course à la création d'emplois par l'industrie fait d'ailleurs naître une rivalité entre les différentes métropoles. Ce qui a déjà lieu à l'échelle nationale se décline à l'échelle régionale. Nous avons ainsi pu découvrir au plan régional les rivalités entre Toulouse et Bordeaux ou entre Besançon et Dijon que tentent d'harmoniser les présidences des conseils régionaux avec des approches différentes. Au plan national on peut citer l'exemple de Paris qui se revendique « métropole européenne la plus innovante », posséderait le plus grand nombre de FabLabs, et a reçu un prix de 1 million d'euros pour financer l'organisation du Fab City Summit qui aura lieu du 12 au 13 juillet 2018. La ville de Lisbonne n'est pas en reste puisqu'elle a réussi à devenir l'hôte du Web Summit depuis 2 ans, augmentant ainsi sa visibilité mondiale.

→ **Ainsi le développement de l'industrie dite « du futur », outre sa forte dimension technologique, semble désormais intégrer une réelle dimension territoriale.**

Une fois installées, les entreprises pollinisatrices⁵ prennent une place majeure au cœur de l'écosystème territorial en générant tout un réseau d'emplois issus de la sous-traitance, des besoins de maintenance, de services etc. qui bénéficie des atouts locaux. Ainsi le développement d'offres de formations initiales ou continues avec des spécialisations adaptées aux évolutions de leurs besoins garantit la disponibilité d'une main d'œuvre hautement qualifiée et constitue un atout territorial majeur. En outre les entreprises apprennent désormais à innover autrement par le biais des start-up et des incubateurs locaux qui dynamisent le tissu économique des territoires.

→ **La relation entre les incubateurs, les start-up et les entreprises semble être un facteur déterminant de la relocalisation et de la refonte des industries.**

L'automatisation et la robotisation, qui permettent une baisse des coûts de production associées à une qualification élevée de la main d'œuvre locale constituent un moteur de la relocalisation des usines dans des pays où la main d'œuvre est chère comme c'est le cas en Europe et en particulier en France. On compterait quelques 92 entreprises qui se seraient relocalisées en France depuis 2008⁶. Parmi elles on peut citer les cas emblématiques de Rossignol ou Paraboote revenues s'installer près de leurs sites historiques, en région. S'il s'agit d'un mouvement encore limité au regard du nombre d'entreprises qui continuent de se délocaliser, en 2017 le solde d'emplois créés en France est annoncé positif pour la première fois depuis longtemps⁷.

Le coût du transport est également à l'origine de ces relocalisations et s'inscrit dans l'émergence d'une tendance récente mais croissante à promouvoir les circuits courts, non seulement pour limiter le coût du transport, mais également l'empreinte carbone. La dimension environnementale s'inviterait donc dans la dynamique industrielle en écho aux propositions de l'essayiste américain Jeremy Rifkin. Depuis le début des années 2000, celui-ci défend le concept d'une troisième révolution industrielle qui serait le fruit d'une convergence entre les technologies de la communication (internet/satellites notamment) et l'émergence des énergies renouvelables, propres et sûres. Jeremy Rifkin soutient une production d'énergie non plus « centralisée », mais « distribuée », l'énergie circulant dans le réseau de manière « intelligente ». Cette énergie (petit éolien, photovoltaïque, géothermie, etc.) serait produite directement sur les constructions (toitures, terrasses, murs, vitrages photovoltaïques, murs anti-bruit...) ou dans les fondations (géothermie, puits canadien) ; elle serait stockée en partie sous forme d'hydrogène, et redistribuée par l'intermédiaire d'un réseau intelligent de type Smart grid. Ce modèle constituerait selon lui la solution pour sortir de l'impasse où conduit un système reposant sur la seule consommation des ressources énergétiques fossiles⁸.

A ce stade on peut noter et s'étonner de deux conséquences antagonistes à cette tendance aux circuits courts dans les territoires :

- Le souhait d'un rapprochement clients-usine constitue une incitation voire une justification à délocaliser les entreprises vers la Chine et l'Inde, les deux marchés en forte croissance, cette tendance n'étant que faiblement contrebalancée par l'installation en France d'entreprises étrangères venant y augmenter leurs parts de marché (exemple Toyota) ;
- L'émergence de la communauté des « Makers » et des Makerspace (en France, citons le réseau des Tech-Shop créé par Leroy-Merlin) –prolongement des FabLabs dont la production se positionne entre prototypage, innovation et artisanat, qui intègre des préoccupations environnementales et d'économie circulaire telle que l'utilisation de matériaux bio-sourcés ou le recyclage, etc.– s'inscrit presque à l'opposé d'une recherche effrénée de baisse des coûts⁹. Dans un tel système, fondé sur ces nouveaux lieux de production, cette dernière s'extrait donc en grande partie des usines stricto sensu.

3. O. Lluansi et A. Galloni, *Croire en l'industrie du futur et au futur de l'industrie*, Ernst & Young, 2017

4. <http://competitivite.gouv.fr/politique-des-poles-471.html>

5. *Utopies, De l'ancrage au développement local : vers l'entreprise pollinisatrice*, octobre 2017 <https://www.socialement-responsable.org/sites/default/files/resources/2017-12/EntreprisePollinisatriceRapport-1.pdf>

6. F.Nadou & F.Raulin, *La relocalisation industrielle en France, un retour vers le futur ? The conversation*, 9 janvier 2018 <https://theconversation.com/la-relocalisation-industrielle-en-france-un-retour-vers-le-futur-89472>

7. M. de Vergès, *La France crée enfin plus d'emplois, y compris dans l'industrie*, Le Monde, 2 mars 2018

http://www.lemonde.fr/economie/article/2018/03/02/la-france-cree-enfin-plus-d-emplois-y-compris-dans-l-industrie_5264556_3234.html

8. J. Rifkin, *La troisième révolution industrielle*, 2012

9. M. Lallement, *L'âge du faire. Hacking, travail, anarchie*, Paris, Le Seuil, 2015

→ Le renouveau d'un tissu industriel au sein des territoires aurait donc plusieurs facteurs, liés d'une part **aux mesures prises par les territoires pour devenir plus attractifs** (incubateurs, start-up, Fa-

bLabs, offres de formation, etc.) et d'autre part, **au développement de circuits courts poussé à la fois par des motivations d'ordre économiques et environnementales**.

Point d'étonnement : Quelle part prendra la communauté des « Makers » dans l'industrie du futur et quelle place sera accordée à la préservation de l'environnement ?

3. Enjeux société travail

Les implications micro et macro socio-économiques de l'usine 4.0 sont rarement explicitées et analysées. Tant les experts audités que les documents consultés réservent une large part de leurs réflexions aux dimensions technologiques, organisationnelles et commerciales de la 4e révolution industrielle. Alors que les gains de productivité sont au cœur des actions entreprises, les dimensions socio-économiques et humaines sont finalement traitées en creux, ou parfois de façon un peu incantatoire.

Les enjeux et problématiques nouvelles autour des questions de l'emploi et du travail dans l'usine 4.0 et dans le futur nous sont pourtant apparus importants et à approfondir.

L'usine du futur ou la fin du travail ?

Dématérialisation, globalisation et automatisation sont trois des caractéristiques de l'usine 4.0; elles invitent à repenser la classification des emplois, non plus en termes de niveau de qualification des acteurs ou de niveau de salaire, mais plutôt en termes de répétitivité (routinisation) des tâches à accomplir, de leur facilité à être délocalisées ou robotisées.

Une étude de Goos et al.¹⁰ souligne la bipolarisation de l'emploi dans 10 pays européens entre 1993 et 2010 et invoque les effets de l'industrialisation 4.0 ; la proportion d'emplois intermédiaires (techniciens et ouvriers qualifiés) se contracte alors celle des emplois qualifiés d'une part, et des emplois peu qualifiés d'autre part, aug-

mente. Beaucoup d'emplois intermédiaires ont en effet été touchés par l'automatisation (robotisation) des tâches. Les auteurs décèlent déjà une érosion des emplois peu qualifiés ; certaines fonctions sont délocalisées et automatisées. Ils estiment que cette tendance devrait s'accroître. Pour le cas des États-Unis, une étude originale de Acemoglu et al.¹¹ dresse un constat inquiétant du phénomène : entre 1990 et 2007, l'automatisation a eu des "effets négatifs massifs". Sachant que pendant cette période le nombre de robots dans l'industrie a été multiplié par 4, ils mesurent une disparition de 5 à 6 emplois sur 1 000. À l'inverse, la Fédération internationale de robotique (IFR) avance que les taux de chômage des pays les plus robotisés sont parmi les plus bas ou les plus régulés (voir Fig. 5). Les changements technologiques qui détruisent des emplois auraient pour conséquence d'en créer d'autres en parallèle (développeurs, spécialistes des données, coordinateurs de robots, maintenance...). En tenant compte des gains de croissance entraînés par l'automatisation, le Boston Consulting Group a par exemple prévu en Allemagne non pas une montée du chômage mais un gain net de 35 000 emplois d'ici 2025.

A noter que la pénibilité du travail ouvrier contribue fortement à la dégradation de l'attractivité des métiers les moins qualifiés (cas de Peugeot qui peine à recruter malgré le taux de chômage relativement élevé). Cette tendance pourrait forger aussi la structure des emplois dans l'usine de demain, en accélérant encore automatisation et délocalisation.

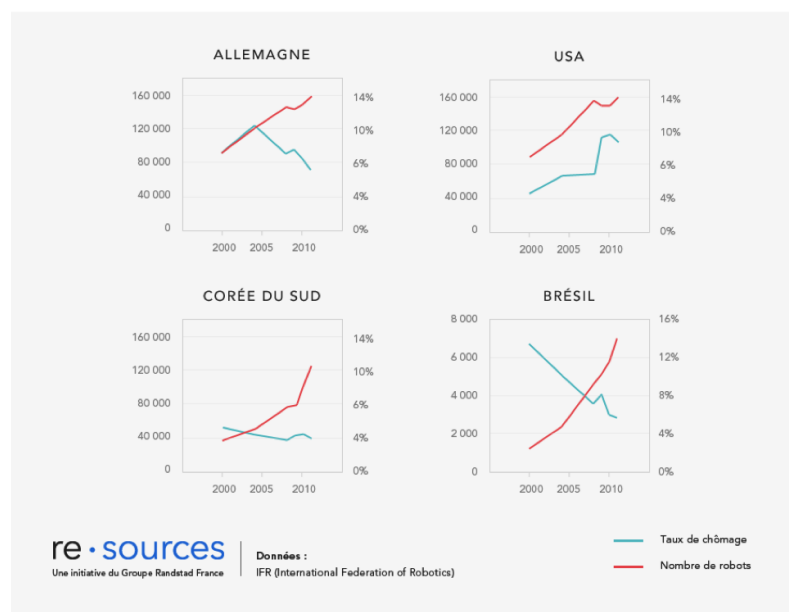


Fig.5 Comparaison du nombre de robots et du taux de chômage

10. Goos, M., Manning, A., Salomons, A., *Explaining Job Polarization: Routine-Biased Technological Change and Offshoring*. *American Economic Review*, 104 (8): 2509-26, 2014

11. Acemoglu, D., Restrepo, P. *The National bureau of economic research*, mars 2017 <http://www.nber.org/papers/w23285>

La formation, un élément clef

Avec l'avènement de l'industrie 4.0, c'est l'organisation même du travail industriel qui est peu à peu bouleversée. Pour les experts, la numérisation de l'industrie permettra d'automatiser tous les types d'emplois, qualifiés et non qualifiés. Ainsi, selon les analystes, entre 25% et 50% des 185 métiers de l'industrie ont une très forte probabilité d'être automatisés dans les 20 ans à venir. De nouvelles qualifications émergeront, d'autres évolueront ou disparaîtront. Les salariés et futurs salariés de l'industrie devront non seulement s'immerger dans les technologies de l'information et de la communication mais aussi dans l'organisation de l'usine du futur. Les métiers de demain, du responsable de l'usine au technicien en passant par le manager devront aller vers une hybridation de compétences numériques, techniques et managériales.

Pour conduire vers cette évolution, **de nouvelles formations doivent être mise en place** en se concentrant notamment sur les

impacts de la continuité numérique, l'utilisation des systèmes communicants, le recours à la réalité virtuelle ou augmentée... Des formations initiales adaptées sont déjà proposées comme par exemple celle d'Arts et Métiers ParisTech qui a récemment mis en place une spécialité «Management de l'industrie du futur», traitant des pilotes de l'usine du futur par le numérique, d'organisation industrielle et de gestion des données. **L'usine 4.0 entraînera probablement une diminution des postes les moins qualifiés et des tâches pénibles avec une requalification des postes faisant appel à davantage de compétences pour les travailleurs.** Dans ce contexte de mutations, la formation continue sera, elle aussi, un élément clef pour aller vers une montée en gamme des qualifications des salariés en leur apportant une culture numérique et un apprentissage des nouveaux usages. Avec une question : Que se passe-t-il si pendant le temps (mois, années) nécessaire à un salarié pour acquérir de nouvelles compétences, la technologie change de nouveau ? Autrement dit : Est-il possible que l'accélération technologique dépasse la capacité d'adaptation des sociétés humaines ?

Point d'étonnement : Au-delà des incantations, quelles actions concrètes pour "placer l'Homme au coeur de l'usine du futur" ?

Le mouvement des FabLab & Makerspaces : utopie, bricolage ou rupture sociétale ?

En rupture avec les tendances d'automatisation et de Gigafactory évoquées plus haut, se développent depuis plusieurs années en France et dans le monde, des tiers lieux, ouverts, collaboratifs, dotés de matériel de fabrication, où chacun peut se ré-approprier la fonction productive.

Le concept de FabLab (contraction des mots anglais Fabrication et Laboratory), déjà ancien, a été conceptualisé par le MIT à la fin des années 1990.

Souvent désignés par un même nom, ils recouvrent des réalités et des finalités très différentes, rendant complexe leur appréhension. La Direction générale des entreprises distingue 3 catégories :

- les ateliers militants et communautaires,
- les ateliers serviciels et à objectif de création de valeur économique,
- les ateliers de travail collaboratifs,

Ces espaces peuvent ainsi répondre à des défis très différents : ouvrir la voie à de nouveaux innovateurs, dynamiser les processus d'innovation des grandes entreprises, revaloriser les compétences manuelles dans une société digitale, recréer une forme de lien social, de proximité...

Même si le mouvement des Makers tend à redonner goût à la pratique individuelle de la fabrication, la question de la viabilité de leur modèle économique se pose encore pour une grande partie

d'entre eux et il est difficile de dire aujourd'hui si ce mouvement restera marginal en terme de mode de production ou sera durablement intégré voire deviendra dominant dans nos sociétés



Un exemple de FabLab ouvert au public (source: Makery.com). Pour une cartographie des FabLabs et autres lieux de fabrication collaborative: <http://www.makery.info/labs-map/>

<https://atelier.bnpparibas/life-work/article/FabLabs-quete-business-model-perenne>

II. Scénarios

Face à ces tendances économiques, territoriales et sociétales majeures, dont les déclinaisons se nuancent tout autour de la planète, on peut se demander **à quoi ressemblera l'industrie dans quinze ans ?** Deux scénarios peuvent être envisagés l'un reposant sur le concept du « BAU » (business as usual) et de la continuité, l'autre sur une rupture du modèle et une disparition de l'industrie actuelle.

1. Premier scénario : continuité du modèle - il reste des usines

L'industrie, pour répondre aux besoins croissants de consommateurs de plus en plus nombreux va perdurer mais devra s'adapter aux contraintes environnementales et limiter notamment les rejets de polluants et les émissions de gaz à effet de serre tels que le CO₂, en substituant les matériaux critiques ou toxiques, et en faisant face à l'accroissement du prix de l'énergie. L'usine, pour continuer à se développer aura ainsi la possibilité de devenir la championne de l'économie circulaire avec comme stratégie à part entière l'efficacité énergétique et la sobriété. Sous réserve qu'un modèle économique acceptable par la société le permette, cette adaptation pourrait se faire via l'introduction renforcée de nouvelles techniques d'automatisation (robotisation, informatisation) et de production dans l'usine accompagnées d'un mode de management revisité permettant une cohabitation harmonieuse entre les salariés toujours au cœur de l'usine et les robots/automates.

En 2035, l'ensemble des tâches de routines sera confié à des automates, les travaux pénibles seront assistés par des bras automatisés, la gestion des stocks sera confiée à des algorithmes, et les salariés de l'usine interviendront pour organiser ces actions, les suivre et les contrôler. La nature du travail sera donc singulièrement modifiée sans que le travail ait disparu pour autant car nombre de tâches ne pourront être automatisées telles que le développement de nouveaux protocoles, le test de nouvelles ressources comme les bio-ressources ou les déchets, la recherche d'une sobriété énergétique et matière cumulée, etc. on peut penser/espérer que l'évolution même de l'usine sera confiée à des salariés.

Les bactéries sont-elles des usines du futur ?

Si l'utilisation d'organismes vivants à des fins de production de biens manufacturés n'est pas nouvelle (fermentations pour les industries agroalimentaires et chimiques par exemple), les biotechnologies ont connu des développements récents significatifs, notamment sous l'influence de connaissances nouvelles sur le génome, et surtout sa maîtrise.

Les applications se sont diversifiées, et l'on distingue désormais les biotechnologies "blanches" ou "industrial biotech" qui permettent par exemple de fabriquer des biocarburants, du biogaz, grâce à des micro-organismes, à des enzymes et des biocatalyseurs. Les biotechnologies "bleues" exploitent plus particulièrement des organismes marins pour créer des cosmétiques ou des produits agroalimentaires, voire industriels (vu lors du voyage au Portugal : une start-up incubée par l'Université de Lisbonne fabrique par exemple de la peinture pour bateau par biosynthèse avec des micro-algues). Les biotechnologies "jaunes" mobilisent des micro-organismes pour dépolluer, traiter des effluents.

Le futur semble tendre vers une raréfaction des sources énergétiques fossiles et une rigueur accrue en matière de normes environnementales et sanitaires. L'OCDE estime ainsi que si les biotechnologies représentent 1% du PIB mondial aujourd'hui, ce chiffre devrait tripler d'ici à 2030 car elles apportent nombre de solutions à ces deux défis.

2. Second scénario : rupture. L'usine du côté de chez soi et la disparition du travail salarié ?

En réaction aux mondes industriels qui se sont imposés en Europe depuis 250 ans, des communautés se sont constituées prônant une vie autonome, basée sur la simplicité volontaire et limitant le plus possible la consommation. À l'instar des Shakers, ces groupes de protestants qui se sont installés aux Amériques à partir du XVIII^{ème}, ou plus tard le mouvement Hippie, ces communautés ont imaginé un monde où la pratique du minimalisme et du « do it yourself » s'érige en mode vie.

Ces mouvements communautaires trouvent aujourd'hui leur résurgence chez des penseurs comme Jérémy Rifkin et sa troisième révolution industrielle (l'énergie est produite dans des petites unités ou autoproduite et autoconsommée), au sein de courants écologistes et décroissants, chez les Makers (je fabrique ce dont j'ai besoin), chez les producteurs locaux (je consomme ce que je produis), et chez certains élus locaux. Avec l'émergence et la démocratisation des nouvelles technologies (telles que les imprimantes 3D), l'apparition des FabLabs ou « comment créer une communauté pour fabriquer ensemble, (un esprit « garage »), l'explosion des start-up, le développement de l'agriculture urbaine, des circuits courts, d'ateliers de productions qui réapparaissent dans les villes (mouvement Fab-city), de la production d'énergie renouvelable, les premiers signes « encore faibles » de nouveaux modes de production et de consommations se manifestent.

Même si ces différents courants/mouvements ne partagent pas tous la même idéologie, ils se rejoignent sur l'idée que la production industrielle de masse a fait son temps. Les grands complexes industriels vont petit à petit disparaître pour laisser place à des modes de production relocalisés, proches des lieux de vies.

Des questions inévitablement surgissent. Ces tendances faibles qui apparaissent un peu partout dans le tissu urbain sont-elles viables ? Peuvent-elles trouver leur modèle économique ? Sont-elles susceptibles de créer de la richesse ? De l'emploi ? Comment passer de la pièce unique à la série sans retomber dans le piège de la production de masse ? L'usine à côté de chez soi ou même l'usine chez soi (l'imprimante 3D à domicile) peut-elle se substituer au modèle de production que l'on connaît d'aujourd'hui ?

Selon certains économistes, même si la désindustrialisation en France est une réalité (moins 11% entre 1975 et 2010), l'industrie du futur ou 4.0 a un avenir en Europe, à la condition qu'elle mette en œuvre sa révolution de gains de productivité (20 à 30% à trouver, voir scénario 1). Leurs arguments pour sauver l'industrie d'aujourd'hui sont qu'elle fournit de l'emploi à des personnes de qualification intermédiaire et crée de l'activité dans les villes intermédiaires. Pour d'autres économistes en revanche, un monde sans travail se profilerait dans nos pays européens. La cause ? La baisse des salaires alors que les produits intérieurs bruts augmentent. Ainsi pour les économistes du monde du travail comme Gilles Saint-Paul, il est de plus en plus difficile aujourd'hui d'avoir un mode de vie correct en travaillant. L'industrie européenne est en effet fortement concurrencée par les industries américaines, africaines, asia-

tiques où le coût de la main d'œuvre est très bas. Lorsque les salaires ne baissent pas comme cela est le cas en France, le chômage augmente. Les usines de production de biens de masse (automobiles, aviation...) vont continuer à se délocaliser et seraient de plus en plus robotisées. Un monde « sans travail salarié » pourrait apparaître donc dans les prochaines décennies. Intégrer socialement cette nouvelle donne sera un enjeu de taille pour les futures classes politiques. De nouvelles politiques devront apparaître pour valoriser les compétences et les qualités humaines utiles à la société, pour que chacun puisse continuer à y avoir un rôle

Dans ce scénario, nous envisageons donc pour nos pays européens en 2035 des modes de production très localisés et minimalistes, proches de l'esprit communautaire FabLab dans la Fabcity : ensemble nous fabriquons ou produisons, chez nous ou proche de chez nous, l'énergie, la nourriture, les biens de consommation dont nous avons besoin avec l'aide notamment des nouvelles technologies (imprimantes 3D). Les biens de consommation complexes (automobile) sont produits hors d'Europe et sont partagés. Dans un monde sans salaire, la société de consommation devient plus minimaliste et s'uberise / se communautarise fortement.

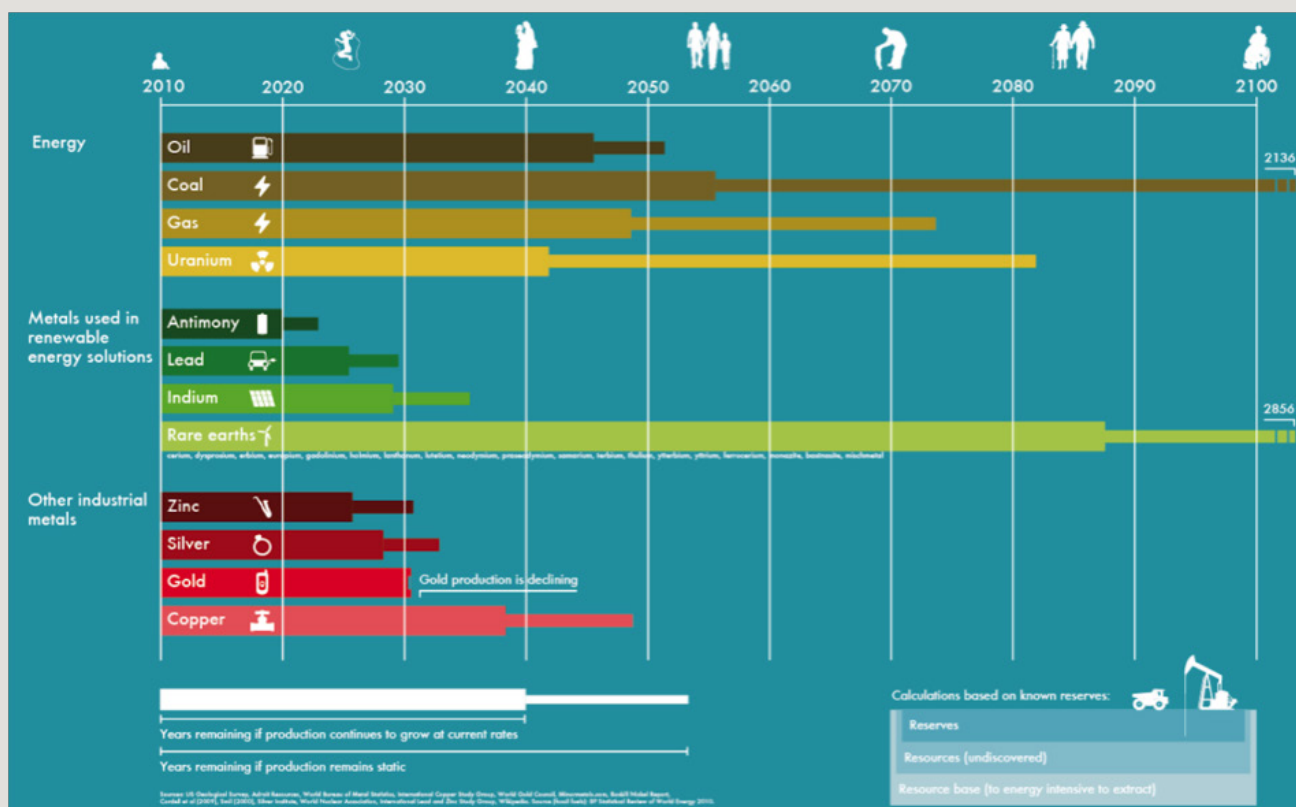
Deux points d'étonnement pour conclure :

- Alors que nos sociétés sont très individualisées et très axées sur la sur-consommation, pouvons-nous en quelques décennies accepter ce nouveau mode de vie ?
- Alors que nos sociétés sont construites autour de la valeur travail, comment imaginer et accepter un monde sans travail et sans salaire, comment faire basculer l'économie vers d'autres terrains d'utilité comme l'éducation ?

Forcément vers une industrie plus frugale en ressources non renouvelables

La disponibilité en ressources non renouvelables va décroissante, en général (Desjardins, 2014, tableau ci-dessous). En outre les moyens de production d'énergie nécessitent des matières premières elles même en stock limité (Olivier Vidal 2018 Matière Première et Energie, ISTERRE CNRS). Si l'on se projette à 2050, les industries qui utilisent plus particulièrement le plomb, l'antimoine, l'indium (pour la fabrication de sources d'énergie renouvelables) ou le zinc, l'argent, l'or, le cuivre, devront trouver des alternatives

(autres sources ou recyclage plus efficient des métaux actuellement utilisé). A plus long terme (d'ici la fin du siècle), ce sont tous les systèmes énergétiques qui devront être repensés, avec les fins annoncées des sources de pétrole, de gaz naturel, d'uranium. L'industrie 4.0 devra donc poursuivre ses efforts pour s'insérer dans une économie plus circulaire, favorisant recyclage, et réutilisation.



Conclusion

Lors de notre périple dans la problématique de l'usine du futur, il nous a été donné à voir des méthodes et des outils (fabrication additive, robots et cobots, l'usine connectée...), ainsi que des modalités, des assemblages et agrégats de différentes natures (FabLabs, plateformes de Makers, écosystèmes d'innovation, fabcities...). Reste à

s'interroger sur l'environnement global de l'usine du futur, à l'envisager à l'aune de ce que l'humanité a vécu comme (r)évolutions récentes et des défis qui l'attendent. Quels modèles de sociétés pour quelles usines dans le futur ?

Où ?

Le vieux distingo "pays industrialisés" / "pays en développement ou émergents" ne tient plus. D'abord parce que l'essentiel de la fabrication industrielle d'aujourd'hui est assuré par des pays émergents, en premier lieu la Chine ("l'usine du monde"). Ensuite parce que la prise en main et les évolutions industrielles des pays se sont singulièrement accélérées depuis la seconde guerre mondiale.

Le Japon est ainsi passé en quelques années de la ruine à l'excellence technologique, et a été suivi de près par Taiwan et la Corée du Sud, pays sous-développés, agraires, dans les années 50, la Corée étant aujourd'hui membre de l'OCDE, puis par d'autres tigres de l'Asie

(Vietnam, Philippines), et la Chine depuis 10 ans. Ce qui a pris 250 ans en Europe évolue désormais en quelques décennies ailleurs. Il n'y a pas de raison que cette accélération s'érode. Quels seront les nouveaux champions industriels dans la seconde partie du siècle, une fois le marché intérieur chinois et sa classe moyenne établis ? L'Afrique, avec ses 2 milliards d'habitants en 2050, sa diversité, sa démographie toujours active et sa population très jeune et toujours mieux formée, semble être un candidat sérieux. Quels que soient les barycentres de production industrielle dans le futur, notamment au Sud, leur localisation influencera forcément l'activité industrielle en Europe.

Comment ?

Les défis sociétaux qui pèsent désormais sont également nouveaux et engageant à des évolutions des modes de consommation et de production. Les dégradations de l'environnement, la raréfaction des ressources non renouvelables, la prise de conscience lente mais réelle des consommateurs et des citoyens pour un confort plus frugal, une fabrication de biens par des modalités collaboratives, territoriales ou

locales, les réflexions naissantes et très originales sur le statut et la valeur du travail humain dans un mode automatisé, l'action publique encore timide mais sensible vers l'économie circulaire ; tous ces éléments vont influencer l'industrie du futur, car avant tout ils imposeront le modèle de société dans lequel nous souhaiterons vivre.

Bibliographie

- M. Blanchet, *Industrie 4.0 : nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique*, Géoéconomie, vol. 5, n° 82, 2016, p. 37-53
- M. Lallement, *L'âge du faire. Hacking, travail, anarchie*, Paris, Le Seuil, 2015
- O. Lluansi et A. Galloni, *Croire en l'industrie du futur et au futur de l'industrie*, Ernst & Young, 2017
- J. Manyika et al., *Harnessing automation for a future that works*, McKinsey Global Institute, 2017
- J. Rifkin, *La troisième révolution industrielle*, Ed. Les liens qui libèrent, 2012
- T. Bidet-Mayer, *L'industrie du futur : une compétition mondiale*, Paris, Presses des Mines, 2016

Restitution des ateliers du cycle national

Amphithéâtre Poincaré - Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 25 rue de la Montagne Sainte Geneviève, 75005 Paris

Prospective de l'usine et de la fabrication

L'atelier aborde les différentes facettes et les tendances de la fabrication d'aujourd'hui, pour essayer de se projeter dans les futurs possibles. Le rapport dresse d'abord un état des lieux, des dynamiques en œuvre, autour des enjeux relevés : enjeux techniques, enjeux des marchés, enjeux des compétences, enjeux territoriaux, enjeux sociaux (emploi et travail, formation).

Deux scénarios contrastés sont ensuite présentés ; ils brossent un champ des possibles, entre persistance du concept d'usine, certes en forte évolution, et émergence de centres de fabrication délocalisée, territoriale, collaborative.

Des points d'étonnement et d'attention sont proposés et explicités, par exemple sur la protection des données, la législation du travail, la place du mouvement des "makers", le statut de l'humain et du travail dans un monde automatisé, la place des biotechnologies, et les modèles de société qui vont caractériser cette fabrication du futur.

Avec

Manuel MORAGUES, chef du Service innovation, design, numérique & usine du futur, l'Usine nouvelle

Yves WINKIN, directeur, Musée des arts et métiers

Rapporteurs du groupe

Nous sommes ravis de vous présenter le fruit de notre travail commun autour du thème « Prospective de l'usine et de la fabrication » qui pourrait se résumer par la question : que seront l'usine et la fabrication du futur ? Pour nous aider sur certains points d'étonnement de notre rapport, nous avons fait appel nous aussi à deux invités : Yves Winkin et Manuel Moragues. Yves Winkin, vous êtes directeur du musée des arts et métiers et spécialiste de l'anthropologie de la communication. Manuel Moragues, vous êtes journaliste pour L'Usine Nouvelle, et plus précisément chef du service Innovation numérique et usine du futur.

Dans notre groupe, nous avons eu la chance de pouvoir nous imprégner de notre sujet dès la première session qui s'est déroulée à la Saline Royale d'Arc-et-Senans. Cette manufacture, destinée à la production de sel, était tout droit sortie de l'imagination de Nicolas Ledoux, un architecte du siècle des Lumières. En parcourant la Saline Royale, nous avons eu sous les yeux le témoignage parfait de ce que pourrait être une usine du futur surgie du passé. Partant de là, nous avons nous aussi bâti notre rapport en commençant par les bases, en donnant les contours de la définition de l'usine traditionnelle, à savoir : un établissement industriel où à l'aide de machine et de main d'œuvre s'effectue la transformation des matières premières en produits finis. Cette simple définition traditionnelle porte en elle la plupart des axes sur lesquels nous nous sommes interrogés pour le futur, à l'horizon 2035 environ.

Le premier mot « établissement » amène à se poser la question du lieu, du territoire. Où se situeront-elles ces fameuses usines du futur ? Tout au long du cycle national, nous avons effectué des déplacements à Besançon, à Toulouse, à Lisbonne : à chaque fois, nous avons ressenti à quel point le futur des usines allait décider du futur de ces territoires.

Le deuxième mot que nous avons interrogé est celui de « machine ». Il nous amène au cœur de la révolution technologique et numérique qui se joue déjà dans les lieux de fabrication. Nos intervenants nous ont alertés notamment sur la rapidité de l'essor des imprimantes 3D.

Ces dernières investissent, semble-t-il, toute sorte de lieux de fabrication, grands ou petits. Plus encore, ils nous ont montré à quel point l'émergence des algorithmes à toutes les étapes de la production allait totalement redessiner le contour des usines. Le futur des usines sera toujours plus connecté, que ce soit au stade de la conception, des processus de fabrication ou de la transition robotique – ce qui nous amène à parler des cobots, ces fameux robots qui travaillent avec ou à la place des humains. On discutera du fait qu'ils sont de plus en plus capables d'apprendre seuls, d'adapter leur comportement aux besoins de la production.

Le mot de « main d'œuvre » nous a amené à nous demander : quelle sera la place de l'homme dans la fabrication du futur ? Ou plus précisément, quelle sera la place de l'homme par rapport à la machine dans l'usine du futur ?

Enfin, dans la définition traditionnelle de l'usine, on aboutit à des « produits finis ». Dans notre rapport, nous avons questionné cette notion qui semble déjà correspondre de moins en moins aux enjeux du marché. Les clients sont désireux de produits personnalisés, mouvants, donc pas finis. Par ailleurs, la notion de « produit fini » ne prend pas en compte le fait que les objets sont de plus en plus connectés et continueront, à la sortie de l'usine, de donner des données en permanence - les fabricants proposant de plus en plus des services. Un peu comme si dans l'usine du futur on ne parlait plus de produits finis mais de produits suivis.

Alors où seront les usines du futur ? Quel sera l'impact de la numérisation sur les chaînes de fabrication ? Quelle est la place de l'homme ? Après cette présentation générale je vous propose de découvrir les deux scénarios à partir desquels nous avons travaillé.

Scénario 1 : la continuité

Dans un premier temps, nous nous sommes inscrits dans une logique de continuité. Nous nous sommes dits que le nombre de consommateurs augmentait, que le nombre de produits finis ou de produits suivis allait également augmenter et que donc cette logique consistant à avoir des usines allait perdurer. Nous sommes donc

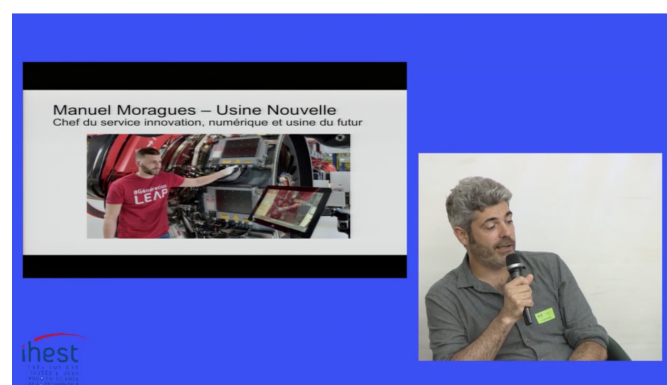
dans une logique de continuation, d'usines connectées, digitalisées, automatisées. A chaque étape de fabrication, nous allons mettre des capteurs, augmenter notre degré de suivi qualité de tous les procédés. C'est un peu l'évolution de l'usine telle qu'on la voit aujourd'hui. Dans certains pays, c'est déjà une réalité. En France, on s'y met peut-être un peu plus doucement. Des intervenants nous ont expliqué qu'ils avaient beaucoup investi à l'étranger et que finalement l'outil industriel français avait ce besoin d'être remis à niveau, informatisé, digitalisé. C'est là une vraie opportunité. Nous nous sommes donc dit que l'usine va toujours être là, chez nous, qu'elle allait continuer de produire des produits et des services grâce à cette numérisation. Cette évolution se fera avec les hommes qui sont au sein de l'usine. De nombreux postes peuvent aujourd'hui être occupés par des robots ou tout au moins assistés par un certain degré d'automatisation. Il va donc falloir organiser ce travail, ce management d'une population mixte de travailleurs, hommes et femmes, et de robots. On peut effectivement craindre qu'il n'y ait plus de travail pour l'homme, mais on peut également considérer – et c'est un peu le propos de ce premier scénario – que l'on va avoir besoin à la fois de beaucoup de flexibilité et de sobriété. Je m'explique. Flexibilité : car on a besoin d'une production de masse mais qui soit à la fois différenciée pour chaque consommateur. Cette flexibilité ne pourra être assurée que par une présence humaine. Flexibilité aussi parce qu'on va chercher à s'adapter à des ressources très diverses, à valoriser des déchets, à utiliser des bio ressources, à se mettre dans une logique d'économie circulaire. Sobriété : car nous sommes dans un contexte environnemental qui va de plus en plus se clarifier. Nous allons chercher à préserver les ressources fossiles, à limiter la pollution donc les rejets, les émissions au niveau des usines, à favoriser une économie circulaire, donc beaucoup de recyclage, etc. Tout cela va s'inscrire au niveau des usines. Dernier point : l'efficacité énergétique. L'énergie étant appelée à coûter de plus en plus cher, on va donc bien sûr chercher à la consommer de la façon la plus sobre possible. Ce premier scénario continue à envisager des usines dans nos pays avec des hommes en leur centre. Nombre d'enjeux formidables et de défis sont donc associés à ces grands mots que sont la flexibilité et la sobriété.

Scénario 2 : la disparition des usines

Dans le scénario 2, nous pensons assister, dans nos sociétés européennes, à l'horizon 2035-50, à la disparition des usines que nous connaissons actuellement. Ce scénario a été pensé dans les années 2000 par Jeremy Rifkin, dans son ouvrage La troisième révolution industrielle. Ce dernier préconise que la réorientation du système productif autour de l'économie circulaire, du développement local et de l'autoproduction de l'énergie notamment. Cette théorie est reprise aujourd'hui par des courants écologistes et décroissants mais aussi par le mouvement des Makers qui prône l'auto-fabrication de ce que nous consommons. Cette tendance se concrétise par exemple par le développement de l'agriculture urbaine, par l'autoproduction d'énergie renouvelables, ou encore par l'apparition des Fablabs, ces ateliers communautaires où l'on apprend à fabriquer ensemble. Ces différents mouvements se rassemblent autour de l'idée que la production de masse a fait son temps. Ils préconisent la disparition des grands complexes industriels que nous connaissons au profit de modes de production relocalisés, proches des lieux de vie, faisant la part belle aux circuits courts. Dans ce nouveau contexte, les usines de production de masse complexes, telles les usines d'automobiles, devraient, elles, continuer à être délocalisées dans les pays africains ou asiatiques où le coût de la main d'œuvre est moins cher. D'ailleurs, pour certains économistes, la désindustrialisation de l'Europe est une réalité en marche puisque 11% d'usines ont disparu de nos

territoires depuis 1975. Cette désindustrialisation s'accompagnerait par la disparition de l'emploi salarié. En résumé, ce scénario prévoit pour 2035, des modes de productions très localisés et minimalistes, proches de l'esprit communautaire des Fablabs, dans lesquels nous tous, nous produirons chez nous ou près de chez nous, grâce à des imprimantes 3D, l'énergie, la nourriture, les biens de consommation dont nous avons besoin. Les biens de consommation complexes, eux, seront produits hors d'Europe et seront de plus en plus partagés. Nous pensons par exemple à l'émergence des voitures autonomes. Dans un monde décroissant et écologiste, dans un monde sans emploi et sans salaire, la société de consommation actuellement très individualisée et en pleine croissance va se minimiser, se réduire et devenir de plus en plus communautaire.

Tels sont donc les deux scénarios très distincts que nous avons envisagés. Cela nous amène à ouvrir notre série de questions avec nos invités. **Yves Winkin** et **Manuel Moragues**, si l'on vous dit « usine du futur », quelle image vous vient à l'esprit ?



Manuel Moragues Une usine du groupe Safran, qui fabrique un moteur de dernière génération équipant un nombre incalculable d'avions. Cette image montre un opérateur, aidé par un écran en bas à droite, en train de brancher un des multiples câbles. Une caméra superpose les instructions de montage. Cette image me semble assez représentative de l'industrie du futur avec cette technologie clé de la réalité augmentée. Safran a aujourd'hui besoin de monter en cadence très rapide sur la fabrication de ce moteur complexe. Pour ce faire, ils ont dû installer une usine avec des outils permettant à des gens par forcément hyper formés de participer à la fabrication de ces moteurs.

Yves Winkin Cette image est l'affiche d'une exposition qui a eu lieu



chez nous au Musée des Arts et Métiers en 2016-17, intitulée Machines à dessiner. C'est une image de François Schuiten. L'idée était de se demander quelle représentation des usines du futur pouvait-on avoir au XIXe siècle ? J'ai posé la question dans mes services, et nous n'avons rien trouvé immédiatement. J'ai donc choisi celle-ci car

elle mêle du futur, du passé et du présent. Les voitures sont pneumatiques ou magnétiques. On y voit des usines du XIXe qui crachent leur fumée, ainsi que cet énorme personnage qui est en fait un sca-phandre du musée de la marine apparaissant comme une sorte de Golem au-dessus de l'entrée du CNAM. Cette image mêle donc trois réalités : passé, présent, futur. Elle mêle aussi une représentation existante, avec l'entrée réelle du CNAM au 292 rue saint martin, et une représentation totalement fantasmagorique, sortie de l'imaginaire de Schuïten. Au-delà on pourrait dire que l'on est dans un imaginaire de style punk. Pourquoi donc ne pas voir dans cette image comme une sorte d'usine du futur qui intégrerait plusieurs temporalités ?

Rapporteur du groupe Deuxième question : dans les deux scénarios que l'on a vus, lequel choisissez-vous ?

Manuel Moragues J'aurais bien du mal à choisir. Le scénario centralisé inspiré de Rifkin est de fait très séduisant. De mémoire, il s'appuyait beaucoup sur la décentralisation de la production d'énergie qui est une réalité, pas forcément en France, mais dans de plus en plus de pays. Energies renouvelables, panneaux solaires, éoliennes : on peut désormais produire au plus près des besoins. Il est vrai aussi que l'impression 3D progresse très vite et que nous disposons de tous les outils informatiques pour mettre en réseau, coordonner. Dassault Systèmes propose ainsi une plateforme internet mettant en relation des designers et des imprimeurs. Certains industriels sortent parfois les process de leurs usines (L'Oréal). Cette dynamique est donc très séduisante. En même temps, dans un secteur clé de nos sociétés prochaines par rapport à l'énergie comme les batteries électriques, les usines se chiffrent à quelques dizaines de milliards d'euros d'investissements. Idem dans les semi conducteurs. Vous évoquiez une coexistence de micro usines et de grandes usines délocalisées. Mais la délocalisation des grands centres de production n'est pas forcément certaine dans la mesure où, même en Chine, les usines étant très automatisées, le recours à une main d'œuvre bon marché n'est plus un critère. Je ne saurais donc me prononcer. Séduisant d'un côté, mais en même temps difficile d'imaginer disparaître les logiques financières de rentabilisation du capital investi, les économies d'échelle propres à l'industrie, etc. Le Do it yourself est un mouvement très sympathique, mais on n'a pas l'impression à L'usine Nouvelle qu'il diffuse réellement parmi les industriels. Cela reste vraiment du prototypage, ce qui est très utile, mais on n'est pas encore dans de la production, fut-elle en petites séries.

Rapporteur du groupe Yves Winkin, en un mot, si vous aviez le choix entre ces deux scénarios ?

Yves Winkin J'aimerais en trouver un troisième, parce que ni l'un ni l'autre ne me plaît vraiment. L'idée que les grandes usines s'installent plutôt dans les pays en développement tandis que chez nous nous en soyons réduits à des fablabs décroissants m'inquiète un peu. Je me dis qu'une tierce solution passerait peut-être par la production très sophistiquée de nano-robots. Ce qui me frappe dans les représentations que l'on a vues c'est que les robots ont toujours l'air plus grands, plus forts, alors que vraisemblablement les robots générations nouvelles seront minuscules. Il se pourrait bien qu'on les avale pour qu'ils agissent à l'intérieur, ou qu'ils travaillent un peu comme des abeilles qui construiraient leur nid. Or cet avenir là n'a pas été envisagé dans vos scénarios. Quand on pense musée, on pense en général passé. Or nous sommes également obligés de nous interroger sur ce que nous allons pouvoir conserver dans le futur. Qu'allons-nous laisser aux futures générations ? De grands robots pour montrer aux générations de 2135 ce qu'était les usines de 2035 ? Un fablab de 2035 pour montrer aux générations de 2135 ? Je ne

sais pas trop. En tout cas, l'avenir muséal n'est pas simple car nous avons énormément de mal à présenter des machines d'aujourd'hui. Mystérieuses, ces dernières se résument toujours plus à des capots sous lesquels se déroulent des choses.

Rapporteur du groupe J'en arrive à l'une des questions les plus importantes : celle de la place de l'homme dans l'usine du futur ? Où est l'expertise ?

Manuel Moragues Dans toutes les communications autour de l'industrie du futur, le leitmotiv est toujours : l'homme au cœur de l'industrie du futur. Il n'y a pas besoin d'être fan d'Orwell pour comprendre que cela ne doit pas être si simple. De fait, la place de l'homme paraît parfois assez réduite voire inférieure. Je me souviens d'une démonstration au cours de laquelle le consultant d'une usine pilote se réjouissait de pouvoir présenter des technologies consistant, pour l'une, en un écran projetant des instructions à un opérateur qui n'avait qu'à suivre, pour l'autre, en une réalité augmentée qui, par projection, montrait des gestes simples à un opérateur qui n'avait qu'à les mimer. Toute l'intelligence était dans la machine. On se retrouve dans une situation où l'opérateur n'est que le bras de la machine. Après la machine qui remplace le muscle, c'est ici la machine qui remplace le cerveau. L'intérêt à peine caché pour les directeurs d'usine est donc clair : plus besoin de former, de s'attacher la fidélité des opérateurs, etc. La machine est aujourd'hui en mesure d'analyser des masses de données impossibles à appréhender pour un esprit humain et donc de permettre une production optimale.

• Au départ ces algorithmes, il faut quand même les créer. Il y a donc une place pour l'homme pour créer ces logiciels. Si le geste qu'ils permettent de remplacer est si simple, autant le confier un robot afin que l'homme se consacre à l'analyse des données, à la gestion des algorithmes, etc. Vous prenez par ailleurs l'exemple d'une production de masse, très peu souple, très peu flexible. Peut-être que la place de l'homme se situe justement dans cette flexibilité, dans cette capacité à intégrer une matière première qui va changer, une production sur de petites séries personnalisées.

Manuel Moragues Il faut distinguer l'automatisation machine et l'automatisation cerveau. L'équation économique est simple : cela vaut-il la peine d'investir dans un robot pour faire une tâche répétitive ? Si ce n'est pas le cas, autant prendre un homme qui va être plus flexible. L'homme reste alors le bras. Un psychologue du travail me disait récemment qu'il y avait dans ce genre de cas un risque plus fort qu'avant de de-subjectivisation. Certes il faut créer les algorithmes... Mais le travail d'étiquetage des données est réalisé à Madagascar, sur les plateformes de travail à la tâche d'Amazon où l'on est payé 5 cents pour l'étiquetage de 100 images. Cela reste du travail peu valorisé. Je pense que l'essence du travail de l'intelligence artificielle version apprentissage, version réseaux de neurones, consiste vraiment à capter le savoir-faire humain, l'expérience humaine, en la transférant dans la machine. Aujourd'hui, les efforts des grands de l'intelligence artificielle tels que Google portent sur la diffusion de plus en plus importante des outils. Les spécialistes en intelligence artificielle pourront ainsi apprendre à la machine, sélectionner les données pour faire apprendre l'algorithme. Je ne suis pas sûr que la machine ne soit pas capable d'une certaine flexibilité, d'une certaine forme d'optimisation par rapport à des cas différents que l'on peut envisager à l'avance. Pour optimiser dans un environnement souple, variable, à partir de nombreux paramètres, on s'appuie plutôt sur des solutions de Big Data.



• *A quoi pourrait ressembler le musée du futur que vous rêvez de voir apparaître dans le domaine des arts et métiers ? On ne voit pas trop en effet la place de l'homme aux côtés des machines présentées, alors qu'il existait une vraie relation homme-machine.*

Yves Winkin Quand je suis devenu directeur de musée, un ami me disait que je devais remettre de la sueur sur les machines. Au Musée des arts et métiers, c'est vrai que toutes les machines ont été ripolinées et qu'on ne voit pas comment elles étaient produites et utilisées. Tout cela a été éliminé au profit d'une représentation purement esthétique ou purement technique de la machine même. Or grâce aux techniques contemporaines (numérique, hologrammes, etc.), il me semble que nous pouvons donner à voir beaucoup plus. On peut également, pour ce faire, s'appuyer sur le travail des médiateurs. Nous avons par exemple des ateliers dit des fabricateurs consistant à permettre à des jeunes avec leurs parents de fabriquer des choses. Ces ateliers ont énormément de succès. Ils correspondent à une définition des musées qui s'impose de plus en plus comme lieu où l'on partage des expériences collectives. On s'éloigne toujours plus du modèle du visiteur adulte qui circule de vitrine en vitrine. Pour moi donc, le musée du futur serait un lieu où l'on fait des choses ensemble. Votre scénario sur les fablabs s'y intégrerait donc très bien. Nous avons d'ailleurs accueilli le Hackathon des Makers il y a 15 jours au musée. Autre exemple : dans le cadre d'une convention avec une université allemande, il est possible de voir, au Muséum de Munich, un vrai laboratoire de biologie avec de vrais chercheurs au travail.

Rapporteur du groupe Tous les territoires font des efforts énormes pour attirer des sites de production, des usines. Si la France s'est effectivement désindustrialisée, il semblerait que, depuis quelques années, la balance entre le nombre d'usines qui partent et le nombre d'usines qui reviennent soit à nouveau positive. Du fait de l'automatisation, le prix de la production commence en effet à s'aligner. J'entends de ce débat que ce sont finalement les tâches de routine et le personnel peu qualifié qui devrait progressivement disparaître. En revanche, on note que tous les territoires cherchent à rapatrier les usines, à proposer des offres de formation, à constituer des bassins de personnels qualifiés, à avoir des pépinières de start-up innovantes pour que l'usine puisse bénéficier d'un écosystème favorable. C'est peut-être un peu utopique mais n'est-ce pas ce qui préfigure l'usine de 2035 ?

Manuel Moragues Vous évoquiez une vision où l'opérateur est déjà déconnecté de la machine. Je pense que c'est le contraire : la relation avec la machine sera toujours là, mais d'une nouvelle manière (avec une IA qui s'incarne, avec un cobot autonome) que nous allons devoir repenser. Aujourd'hui, nous ne sommes plus à l'époque où

nous rêvions d'une industrie sans usine. Nous avons tous compris que les centres de production étaient générateurs d'emplois pour les territoires. Pour autant, je ne suis pas sûr que l'on puisse dire que ce sont au final les emplois les moins qualifiés qui sont appelés à disparaître avec l'automatisation. Avec une intelligence artificielle, ce sont justement beaucoup de tâches qualifiées cognitives qui vont pouvoir être automatisées. On parle beaucoup actuellement de robotique process innovation, l'automatisation des tâches administratives, concernant les agents de maîtrises ou les cadres intermédiaires. A ce niveau, il peut y avoir des crispations.

Rapporteur du groupe Autre perspective que nous n'avons pas encore abordée : l'usine vue comme une île au milieu d'un océan, qui ne communiquerait pas avec l'extérieur. Dans l'usine du futur, ce n'est clairement pas le cas, dans la mesure où l'on parle de chaîne numérique étendue.

Manuel Moragues Effectivement. La vision aujourd'hui de l'usine n'est plus du tout la même : l'établissement n'est plus fermé. Il est complètement intégré en termes d'information, tant vers l'aval (les clients) que vers l'amont. Vers l'aval parce qu'aujourd'hui on ne jure que par l'usage, l'user x, l'user expérience, l'expérience utilisateur, d'où l'importance de récolter les données d'usage de ses clients. Vers l'amont car nous avons besoin de connaître au mieux la chaîne d'approvisionnement, l'état des stocks des fournisseurs en temps réel, etc. Nous avons donc une vision de l'usine reliée, complètement ouverte, y compris à l'intérieur entre la couche de logiciels dit de gestion des ressources de l'entreprise (ERP) et l'atelier de production où l'on a des automates programmables pilotés au mieux par un PC qui commande les machines. Dans la doctrine de l'usine 4.0, tous ces étages doivent communiquer. La machine de production doit être connectée au client et au fournisseur, avec des risques énormes. J'ai en tête l'exemple d'un hacker testeur qui avait réussi à prendre la commande d'un petit chariot se déplaçant dans une usine grâce à l'accès d'un fournisseur au système d'information de l'entreprise. Il était ainsi parvenu à manipuler un objet de l'entreprise. Dans un baromètre que nous avons réalisé à L'Usine Nouvelle paru en début d'année sur les risques cyber sécurité : 66% des entreprises déclaraient avoir connues un incident de sécurité en 2017, soit 11 points de plus qu'en 2016, et 26% des entreprises se déclaraient attaquées sur le système de production. On l'a vu l'été dernier avec tous les logiciels pirates. Suite au test avec le hacker, il a été dit qu'il fallait séparer absolument la bureautique de l'opérationnel. Or c'est le contraire de ce qui est préconisé aujourd'hui.

Rapporteur du groupe Merci à tous les deux. Ce sera le mot de la fin.

Grand témoin

Francis CHATEAURAYNAUD, sociologue, directeur d'études, directeur du Groupe de sociologie pragmatique et réflexive, Ecole des hautes études en sciences sociales. Il propose une mise en perspective à l'issue de chaque restitution.

Francis Chateauraynaud Merci pour ce débat et ce rapport. Il se trouve que, depuis 1999, je développe avec des collègues une Intelligence Artificielle « old fashion ». Personnellement, j'identifie des limites sérieuses au machine learning. D'ailleurs, l'IA que je développe est devenue une contre IA. Pour qu'un artefact soit intelligent, il faut qu'il y ait quand même un esprit critique dans la machine. Nous avons donc décidé de modéliser quelque peu cet esprit critique. Que serait une machine qui aurait vraiment un esprit critique ? Je vous renvoie au livre de Jean-Gabriel Ganascia, président du comité d'éthique du CNRS, intitulé *Le mythe de la singularité*, Faut-il avoir peur de l'Intelligence Artificielle ? Etant lui-même expert, il met en garde contre la manière de généraliser les capacités que l'on attribue aux algorithmes. Dans les faits, l'algorithmique est une vieille affaire en mathématique et dans les sciences en général. La nouveauté aujourd'hui tient au croisement de la puissance de calcul et de la mise en réseau. Mais les réseaux ont eux aussi leur vulnérabilité. Votre manière de scénariser manque peut-être un peu de réalisme sur certains aspects. Vos deux scénarios sont un peu extrêmes. Il y en a sûrement d'autres.

Revenons sur la prospective que vous avez un peu prise comme un exercice allant de soi. La prospective a une histoire politique, philosophique, scientifique. En France, elle s'est opposée au prévisionnisme. Cette dialectique aurait mérité d'être davantage creusée. Pour Gaston Berger, penser le futur part du principe que l'on ne peut jamais clore le futur. « Le futur n'est jamais écrit, il faut le construire ». Aussi, la prospective doit toujours s'ancrer dans des collectifs humains, des institutions, des groupes. Elle n'est jamais un exercice totalement fictif. La scénarisation mérite donc d'être replacée dans des pratiques plutôt que conçue comme une version rationalisée de la science-fiction. Votre manière de présenter les deux scénarios est un peu détachée des processus dans lesquels nous sommes déjà et pour lesquels nous avons déjà des observatoires assez précis des relations de production. Au fond, ce qui est décrit dans l'usine du futur est une forme de techno-progressisme consistant à penser que l'on aura toujours des solutions techniques. Certes, c'est une vraie tendance. Mais, ces solutions nécessitent un énorme travail de maintenance qui est le plus souvent invisibilisé. Dans une tribune d'août 2017, Yves Cochet annonçait la fin du monde pour 2035. Il est radical : pour lui, le futur n'est pas incertain, nous savons où nous allons. Tout le problème est là : pour le catastrophisme, le futur est déjà écrit ; pour le techno-progressisme, il l'est aussi dans la mesure où l'investissement (dans la recherche, la science, la technologie, etc.) va nous offrir toutes les solutions dont nous pourrions avoir besoin. Je pense pour ma part que le 3ème scénario que vous cher-



chez se trouve du côté d'un courant philosophique, celui du pragmatisme. Regardons comment nous faisons les choses ; insérons nos connaissances dans des processus déjà à l'œuvre, essayons d'en faire émerger des possibles ou de potentialiser ce qui est déjà présent, plutôt que de travailler par projection et rupture, ce qui oblige toujours après coup à régresser et à revenir à la réalité.

Dans les années 1980, EDF avait pour projet une centrale nucléaire automatique : l'idée était d'enterrer le réacteur et de le commander à distance. Dans le cadre de ce projet, j'ai été appelé à réaliser une étude sur le travail des opérateurs dans les salles de commandes... La conclusion : aucun automate ne pourra jamais remplacer ces opérateurs. Dans les années 1990, quand Framatome a fait le choix de s'appuyer sur des automates, la Loire était saturée d'effluents radioactifs. On parle aujourd'hui de réacteurs de transition dont le premier vient de diverger en Chine, avec aux commandes des opérateurs humains. Il n'est plus question de piloter ces centrales nucléaires à distance avec une chaîne d'ordinateur et des intelligences artificielles. Bref, nous sommes encore dans des choses extrêmement mécaniques et physiques et ce pour longtemps à mon avis.

Pour en savoir plus
www.ihest.fr

Institut des Hautes Études pour la Science et la Technologie
Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche
et de l'Innovation
1 rue Descartes, 75231 Paris cedex 05, France

L'IHEST est un établissement public à caractère administratif, sous la tutelle des ministères en charge de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, prestataire de formation enregistré sous le n° 11 75 42988 75. Ses formations sont référencées dans *Datadock*.