



**ENSEIGNER
L'INDUSTRIE DU FUTUR**



SOMMAIRE

PREFACE	3
INTRODUCTION - POURQUOI CE LIVRE BLANC ?	6
1. L'INDUSTRIE DU FUTUR	8
1.1. Au départ, le concept d'industrie 4.0	8
2.2. L'industrie du futur, un concept français plus global	9
1.2.1. La naissance du concept	9
1.2.2. Les piliers de l'industrie du futur	10
1.2.3. Les 9 solutions industrielles françaises	12
1.3. L'Alliance pour l'industrie du futur	13
1.4. De l'industrie du futur à l'usine du futur	14
1.5. Des visions nationales différentes	16
2. BRIQUES TECHNOLOGIQUES ET CAS D'USAGE	18
2.1. Nouveaux procédés et méthodes	18
2.1.1. Prototypage rapide	18
2.1.2. Fabrication additive métallique	20
2.1.3. Contrôles non destructifs	23
2.2. Modélisation et simulation	25
2.2.1. Modélisation multi-physique	25
2.2.2. Réalité virtuelle	26
2.2.3. Systèmes haptiques	28
2.2.4. Réalité augmentée	30
2.2.5. Jumeau numérique	31
2.3. Cyber systèmes	33
2.3.1. Robotique	33
2.3.2. Cobotique	33
2.3.3. Exosquelettes	34
2.3.4. Drones	35
2.3.5. Intégration pédagogique des cybersystèmes	36
2.4. Informatique	36
2.4.1. IoT, capteurs intelligents	37
2.4.2. Big Data	37
2.4.3. Intelligence artificielle	38
2.4.4. Cybersécurité, blockchain, cryptologie	39
2.4.5. Intégration pédagogique	39
2.5. Méthodes et management	40
2.5.1. Innovation	40
2.5.2. Management	42
2.5.3. Entrepreneuriat	43
2.5.4. Travail distant	44

3. L'EVOLUTION DES METIERS	48
3.1. La maintenance	48
3.1.1. Enjeux pour le métier	48
3.1.2. Objectifs pour le métier	49
3.1.3. Exemple d'application	50
3.2. La conception de systèmes complexes	50
3.2.1. Enjeux pour le métier	51
3.2.2. Objectifs pour le métier	51
3.3. La PLM (Project Lifecycle Management)	53
3.4. Qualité, hygiène, sécurité, environnement	53
3.4.1. Enjeux pour le métier	53
3.4.2. Objectifs pour le métier	54
3.5. La supply chain	55
3.5.1. Enjeux pour le métier	55
3.5.2. Objectifs pour le métier	56
3.6. Le bâtiment et les travaux publics	57
3.6.1. Enjeux de la filière [Etude AIF – Juin 2017]	57
3.6.2. Le BIM	58
3.6.3. Smart building	59
3.6.4. Evolutions des métiers	59
3.7. Les métiers du numérique et de l'informatique	62
3.8. Synthèse des cas d'usages briques technologiques / métiers	63
4. ADAPTER LA PEDAGOGIE	68
4.1. De nouveaux métiers, de nouvelles compétences	68
4.2. L'exemple de CESI : mise en œuvre en 4 volets	69
4.2.1. La recherche	70
4.2.2. Les plateformes technologiques	72
4.2.3. Pédagogies innovantes	75
4.2.4. De la compétence au syllabus	79
4.3. L'exemple de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers : un lieu de construction unique de la connaissance et des compétences de l'acteur de l'industrie du futur	79
4.3.1. Un paradigme de formation articulé autour du triptyque Homme/Réel/Digital	80
4.3.2. Un écosystème Arts et Métiers pour le développement du paradigme Homme/Réel/Digital	82
BIBLIOGRAPHIE	85

PREFACE

L'industrie a toujours joué un rôle important dans l'économie française. Ainsi, la reconstruction du pays après la deuxième guerre mondiale s'est faite à travers les grands chantiers de l'énergie et du transport, secteurs phares de l'industrie. Même si la part de l'industrie dans la richesse nationale baisse continuellement ces dernières décennies, elle reste toutefois déterminante sur un plan économique représentant 10% du PIB et employant 2,7 millions de salariés dans 235 000 entreprises générant 870 milliards de chiffre d'affaires¹.

Dans une démarche volontariste, la France s'est lancée dans la reconquête de son outil industriel pour contenir sa baisse et lui permettre de gagner de nouvelles parts de marché au niveau international. Les différentes actions menées par les pouvoirs publics et les structurations et organisations qu'elles génèrent mettent en évidence et en lumière la nécessité de développer les « bonnes compétences » pour les mettre au service des entreprises. Développement de compétences qui se fait à travers la formation sous toutes ses déclinaisons.

Le concept d'industrie du futur, et sa déclinaison en usine du futur, est le résultat de l'appropriation par les entreprises du secteur industriel de la majeure partie des technologies liées à la digitalisation et au potentiel fabuleux qu'offre l'usage des données massives produites. Cette évolution générera à coup sûr quelques nouveaux métiers mais transformera, certainement progressivement, la majorité des métiers actuels amenant même la disparition de certains d'entre eux.

Les principales technologies de l'industrie du futur ont été identifiées par différents cabinets internationaux de conseil en stratégie, comme Boston Consulting Group ou Roland Berger, et font l'objet de nombreux rapports et publications. Les insérer ou les renforcer dans les formations pour enseigner l'industrie du futur ne peut se faire qu'après les avoir explicitées, conçu des espaces adaptés à leur enseignement à travers des pédagogies appropriées.

Les pédagogues, auteurs de ce livre, traitent des principales technologies de l'industrie du futur et de leur prise en compte dans les parcours de formation technique.

Bélahcène Mazari
Directeur Recherche et Innovation
CESI

¹ Direction Générale des Entreprises (DGE), Insee, Eurostat et Esane, 2015

INTRODUCTION - POURQUOI CE LIVRE BLANC ?

L'industrie 4.0 et sa vision élargie, l'industrie du futur, sont devenues la réalité de nombreuses entreprises. La transition numérique révolutionne l'ensemble des pratiques du monde industriel, du grand groupe à la PME. Les technologies comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée, les jumeaux numériques, la fabrication additive, s'intègrent désormais dans de nombreux processus de la conception à la commercialisation. De nouveaux métiers comme le Data Manager ou l'expert en cybersécurité apparaissent. Les pratiques managériales évoluent...

Le monde industriel de demain est déjà là.

Face à cette (r)évolution, les acteurs de la formation et de l'enseignement supérieur s'organisent. Former notamment des techniciens et des ingénieurs sur ces nouveaux champs devient un enjeu majeur non seulement pour le monde industriel qui les emploiera, mais aussi pour l'ensemble de la société. Ces changements profonds dans l'industrie soulèvent de nombreuses questions liées à la formation :

- Quels contenus faut-il développer notamment en termes de compétences ?
- Sur quels niveaux de formation l'effort doit-il se porter ?
- Comment enseigner ? Les pédagogies doivent-elle évoluer ?
- Quels équipements et infrastructures sont nécessaires pour enseigner ces nouveaux champs ?
- Quel rôle les entreprises joueront-elles dans la formation de demain ?
- Comment structurer l'offre de formation ?

L'enseignement supérieur technique, technologique et scientifique apporte déjà des éléments de réponse en proposant des formations remarquables sur de nombreuses thématiques liées à l'industrie du futur. Le besoin de ces compétences est cependant tel qu'il est nécessaire de multiplier rapidement des parcours adaptés.

Ce livre blanc, réalisé par l'Institut de la réindustrialisation en partenariat avec le projet DEFI&Co, propose un tour d'horizon de ces nouvelles technologies et de leur impact sur les processus des entreprises. Il permet également d'appréhender les nouveaux challenges que l'enseignement, quel que soit son niveau, devra relever. Cet ouvrage s'adresse à un public de pédagogues (enseignants, professeurs, chercheurs, intervenants...) amené à développer des parcours de formations liés à ces thématiques.

1. L'INDUSTRIE DU FUTUR



1. L'INDUSTRIE DU FUTUR

Le concept d'industrie du futur est intimement lié à la décroissance constante, depuis des décennies, de l'activité industrielle et l'image négative que celle-ci véhiculait. L'émergence de nouvelles technologies et le développement inexorable des outils numériques ont permis de théoriser l'avenir de l'industrie. Mais l'industrie du futur est un concept protéiforme aux contours qui peuvent varier selon les continents.

1.1. Au départ, le concept d'industrie 4.0

La dénomination industrie 4.0 est apparue en 2011 en Allemagne. Encouragée par le gouvernement et portée par des industriels tel que Bosch et Siemens, la « smart factory » ou « factory 4.0 » fait partie intégrante de ce qui est présenté comme une quatrième révolution industrielle après la mécanisation, la production de masse et l'automatisation.

La part de l'industrie (hors construction) dans le PIB allemand atteignait 25,6% en 2017 alors qu'elle n'était que de 10% en France et 8,7% au Royaume-Uni. Le devenir de l'industrie est apparu comme un enjeu majeur pour l'économie allemande. Il est donc cohérent que ce pays ait été le premier à théoriser, sous le nom d'industrie 4.0, les bouleversements actuels et futurs de l'activité industrielle.

L'industrie 4.0 trouve son socle dans la transition numérique. Le numérique a déjà révolutionné nos vies quotidiennes. Le développement exponentiel de nouveaux outils comme le téléphone portable ou la tablette numérique a radicalement changé les comportements. Nous pouvons désormais accéder à de nombreuses informations qui sont créées, transférées, analysées sous un format numérique où que l'on soit.

Ce changement de comportement des individus est bien sûr transposable au monde de l'entreprise avec des applications directes, comme par exemple, le développement des progiciels CRM (Customer Relationship Management). L'essor des technologies numériques et de ses applications permet d'envisager des gains de compétitivité sur l'ensemble des processus d'une entreprise.

Les habitudes de travail sont aussi impactées : les réunions se font à distance, les documents sont partagés sur des plateformes collaboratives, le télétravail se développe. L'intégralité des processus d'une entreprise industrielle va être révolutionnée par ces nouvelles technologies.

L'industrie 4.0 concerne donc la numérisation de l'entreprise industrielle et de ses services.

Intégrer l'industrie 4.0 : l'exemple de Bosch Rexroth

Bosch Rexroth, entreprise du groupe Bosch, est une entreprise industrielle qui conçoit, produit et commercialise des composants et techniques électriques, hydrauliques et mécaniques. Leur développement de nouvelles solutions se basent sur 3 piliers de l'industrie 4.0 :

1. l'usine intelligente (Smart manufacturing) ;
2. les produits connectés ;
3. la supply chain connectée.

Ces piliers sont tournés vers les mêmes objectifs : assurer une qualité optimale de production, réduire les coûts et optimiser les délais de livraison. La mise en place de solutions digitales pour l'ensemble des processus d'une entreprise peut être perçue comme une révolution difficilement réalisable pour nombre d'entreprises tant du point de vue financier que du point de vue organisationnel. L'approche de Bosch Rexroth est de présenter l'industrie 4.0 non pas comme une révolution mais comme une évolution. Par exemple, la maintenance d'une ligne de production passera par l'installation de capteurs qui permettront une maintenance prédictive, planifiée. La numérisation de l'ensemble des processus de l'entreprise se fait étape par étape.

2.2. L'industrie du futur, un concept français plus global

1.2.1. La naissance du concept

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, l'industrie 4.0 se base presque exclusivement sur la transition numérique et le développement de ses nouvelles solutions, sans cesse plus puissantes et performantes. L'industrie du futur résulte de la réflexion d'entreprises françaises, organisée par le gouvernement au début des années 2010. Reprenant le même socle que l'industrie 4.0, elle l'élargit en donnant notamment une place centrale à l'homme.

Le gouvernement français a lancé en 2013 une réflexion intitulée « 34 plans pour la Nouvelle France industrielle ». L'un de ces plans était consacré à l'usine du futur, piloté notamment par les groupes Dassault et Fives. Ce travail collectif a débouché en 2015 sur une seconde phase, appelée Nouvelle France Industrielle.

Ce plan ambitieux doit amener chaque entreprise à moderniser ses équipements et ses processus via notamment la transition numérique. Les enjeux de l'industrie du futur sont clairement énoncés :

- une industrie plus connectée ;
- une industrie plus compétitive ;
- une industrie plus réactive aux besoins de ses clients ;
- une industrie plus respectueuse de son environnement ;
- une industrie plus respectueuse des travailleurs.

En complément de l'aspect technologique de l'industrie du futur, le concept français donne une place centrale à l'homme sur le plan social et environnemental.

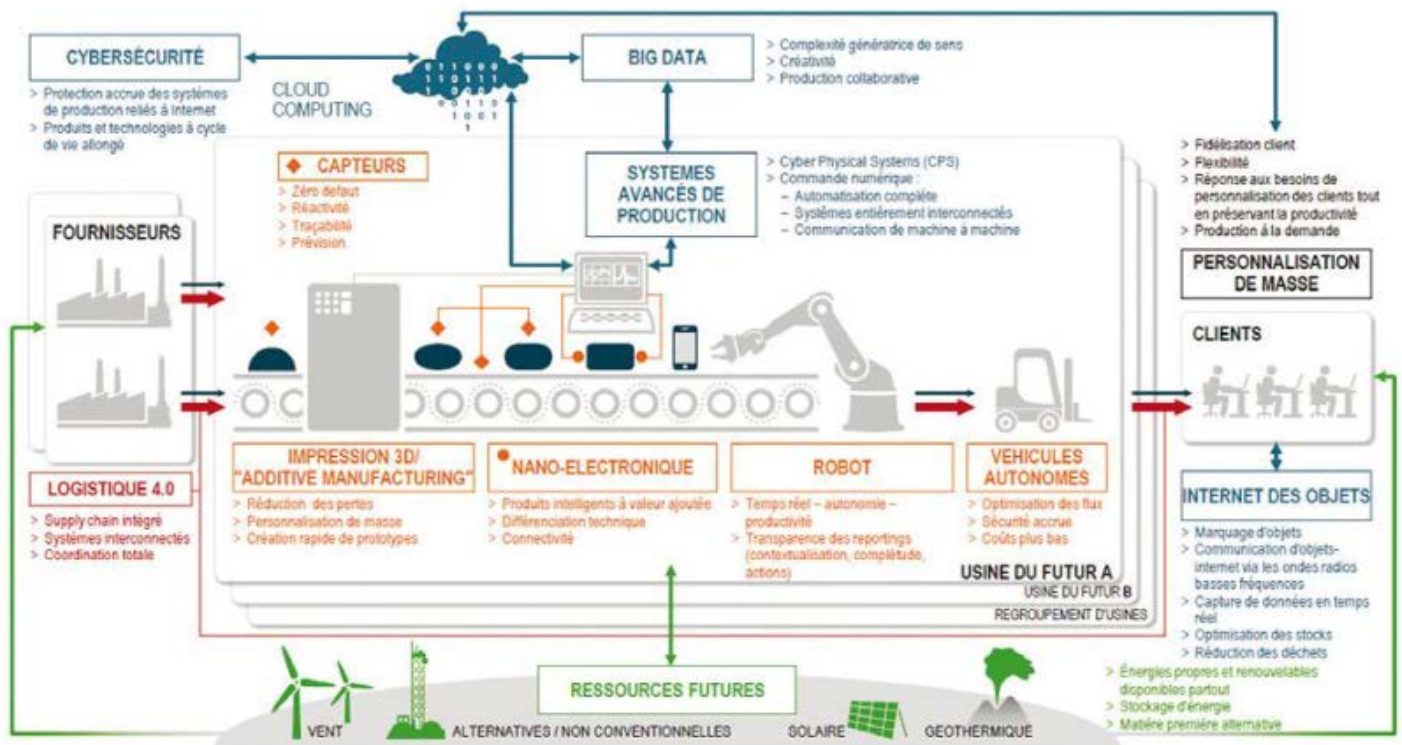


Figure 1- Le concept d'industrie du futur [Roland Berger]

1.2.2. Les piliers de l'industrie du futur

Les enjeux étant fixés, le plan industrie du futur s'organise autour de 5 piliers. Véritable projet de société, il met en avant le capital humain et les enjeux de formation.

LE PROJET « INDUSTRIE DU FUTUR » REPOSE SUR 5 PILIERS



Figure 2- Les 5 piliers de l'industrie du futur
[<https://www.economie.gouv.fr/nouvelle-france-industrielle/industrie-du-futur>]

- 1- **Développer l'offre technologique** en développant la fabrication additive, la réalité augmentée et la virtualisation de l'usine et des objets connectés.
- 2- **Accompagner les entreprises dans cette transformation** en proposant un accompagnement personnalisé pour les PME et les ETI notamment sur les solutions financières.
- 3- **Former les salariés** afin de répondre aux besoins actuels et futurs.
- 4- **Renforcer la coopération internationale sur les normes** afin d'anticiper et être force de proposition sur les orientations prises au niveau international.
- 5- **Promouvoir l'industrie du futur française.**

L'industrie du futur vue par Fives Group

« L'usine du futur devra être plus respectueuse de son environnement, grâce à des modes de production moins consommateurs de ressources et moins générateurs de rejets, plus intelligente, avec des modes de production toujours plus sophistiqués qui repensent l'interface homme-machine. Plus flexible, en utilisant des outils de production reconfigurables, l'usine pourra proposer une offre plus proche des besoins du marché, passant du 'mass market' au 'custom built'. Plus intégrée, connectée au coeur des territoires et proche des acteurs de son écosystème (clients, sous-traitants et fournisseurs), l'usine de demain contribuera à dynamiser un réseau et une économie locale. »¹

Fives est un groupe d'ingénierie industrielle né il y a 200 ans. Son activité actuelle consiste à concevoir et produire des moyens industriels, de la machine à la ligne de production pour les entreprises mondiales de tout secteur d'activité. Le futur de l'industrie est donc un enjeu majeur pour le développement du groupe.

Très impliqué dans la réflexion sur l'industrie du futur, notamment au côté de Dassault Systèmes, Fives a été sollicité en 2012 par le gouvernement français pour co-piloter le plan industriel consacré à l'usine du futur. Le groupe Fives a aussi créé en 2012 l'Observatoire Fives des usines du futur.

Lors de ces différents travaux, des leviers sont identifiés afin de rendre l'industrie française encore plus compétitive. Ceux-ci seront portés par l'Alliance pour l'industrie du futur.

Ces travaux dessinent aussi les contours de l'usine de demain :

- **performante**, basée sur l'optimisation du triptyque coût/qualité/délai ;
- **flexible**, caractérisant la souplesse de l'outil industriel afin de répondre aux fluctuations de la demande ;
- **connectée** via des équipements et des produits et portée par la transition numérique ;
- **sûre** pour l'homme et les équipements ;
- **respectueuse** de l'environnement ;
- **économe** en énergie ;
- **plaçant** l'homme au coeur de leur modèle.

Fives, en partenariat avec EDF, Trendeo et l'Institut de la réindustrialisation, développe depuis 2015 le baromètre mondial des investissements industriels qui recense toutes les annonces de créations d'entreprises industrielles dans le monde en leur attribuant une note basée sur ces mêmes critères de l'usine du futur.

¹ Fives et l'usine du futur [<http://www.fivesgroup.com/fr/fr/au-coeur-de-fives/innovation/fives-et-lusine-du-futur.html>]

1.2.3. Les 9 solutions industrielles françaises

Le concept global d'industrie du futur trouve un déploiement plus pragmatique et concret avec la mise en avant de 9 domaines industriels. Les solutions industrielles françaises prennent en compte les besoins et les demandes de chacun de ces domaines. Ils ont pour but d'accompagner nos entreprises vers un leadership international. Ces solutions sont portées par des comités stratégiques de filières.



Figure 3- Les 9 solutions industrielles

[<https://www.economie.gouv.fr/nouvelle-france-industrielle/industrie-du-futur>]

- 1- **Nouvelles ressources** ou comment produire autrement, en mettant l'accent sur la recherche et le développement, de nouveaux modes de production employant des nouveaux matériaux et des nouvelles sources d'énergie ?
- 2- **La ville durable** ou comment développer des villes plus économes de leurs ressources en incluant notamment les nouveaux enjeux environnementaux ?
- 3- **La mobilité écologique** afin de développer des mobilités moins chères, plus sûres et plus respectueuses de l'environnement.
- 4- **Les transports de demain** ou comment révolutionner les transports de biens et de personnes dans les secteurs automobile, aéronautique, maritime et ferroviaire ?
- 5- **La médecine du futur** avec un défi majeur : comment mieux soigner à moindre coût ?
- 6- **L'économie des données** engendrée par la révolution numérique ou comment créer de la valeur à partir des nombreuses informations collectées et stockées par les entreprises ?
- 7- **Les objets intelligents** générés par l'internet des objets ou comment rendre plus utiles et plus performants ces objets connectés ?
- 8- **La confiance numérique** ou comment préserver l'invulnérabilité des données numériques avec notamment le développement de la cybersécurité ?
- 9- **L'alimentation intelligente** ou comment développer une alimentation sûre, saine, durable et exportable ?

1.3. L'Alliance pour l'industrie du futur

Afin d'accompagner la mise en place du projet « industrie du futur », le gouvernement crée en 2015 l'Alliance Industrie du Futur (AIF). Le rôle de cette organisation est d'accompagner les entreprises, notamment les PME et les ETI, dans leur transformation vers les solutions futures : transition numérique, modernisation des équipements industriels, évolution du modèle économique en intégrant les technologies digitales...

Le projet de l'AIF place l'homme au cœur de cette révolution mettant en avant les savoir-faire, les compétences et le savoir être dans l'objectif d'une amélioration de la compétitivité des entreprises.

Son organisation réunit les différents acteurs nécessaires à l'essor de l'industrie française. Ses membres sont répartis dans 4 collèges : organisations académiques, organisations de recherches technologiques, organisations professionnelles et organisations de financement des entreprises.

L'AIF a pour rôle de coordonner, au niveau national, différents projets pilotés chacun par un groupe de travail dédié :

- développement de l'offre technologique du futur ;
- normalisation à l'international ;
- déploiement régional auprès des entreprises ;
- homme et industrie du futur ;
- promotion de l'offre technologique existante ;
- développement des filières ;
- promotion de l'industrie française à l'international.

Les vitrines de l'industrie du futur

L'AIF labellise des entreprises, moteurs dans le déploiement de l'industrie du futur. Choies sur des critères sélectifs d'exemplarité, d'innovation et d'engagement, ces vitrines mettent en avant des bonnes pratiques déployées dont l'efficacité et la pertinence ont été démontrées.

Ces labels sont décernés à toutes les entreprises, de la PME au grand groupe, engagées dans le déploiement d'un ou plusieurs thèmes de l'industrie du futur : management, performance industrielle, innovation technologique, transition numérique... Ils garantissent alors une visibilité nationale et internationale aux entreprises primées.



Figure 4- Les "vitrines industrie du futur"
 [www.industrie-dufutur.org/Actualités/vitrine-industrie-du-futur/]

1.4. De l'industrie du futur à l'usine du futur

Le concept d'industrie du futur propose une vision élargie du rôle de l'entreprise dans la société française. Il prend en compte la diversité industrielle de notre pays et intègre la notion de services.

Si certains, à l'aube des années 2000, prévoyaient un monde sans usine (le "fables", contraction des mots anglophones « fabrication » et « less » sans usine, sans unité de fabrication), les créations d'entreprises manufacturières recommencent depuis 2016 à être plus nombreuses que les fermetures de sites industriels (voir figure 5).

Incluse dans l'industrie du futur, l'usine du futur propose un modèle innovant, performant et intégré dans son environnement.

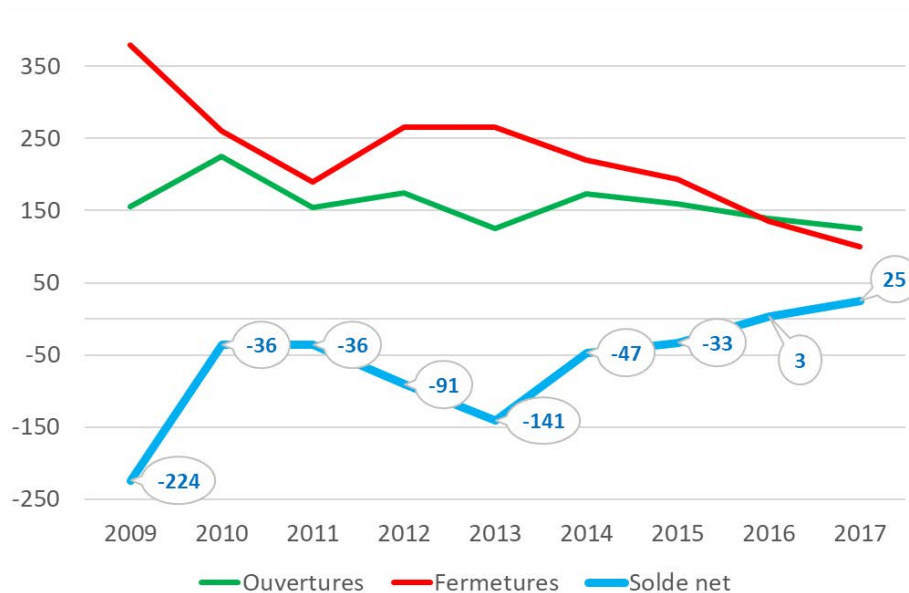


Figure 5- Créations (ouvertures) et fermetures de sites industriels de plus de 10 salariés depuis 2009 [Trendeo]

Plusieurs descriptions de l'usine du futur ont été réalisées. Nous vous proposons ici celle décrite en 2015 par l'Alliance Industrie du Futur (AIF) et la Fédération des Industries Mécaniques (FIM) :

"L'Usine du Futur est :

- une usine innovante, compétitive, performante, sûre et attractive ;
- une usine tournée vers ses clients, capable de garantir la qualité et la traçabilité des produits et de fournir des solutions complètes avec les services associés ;
- une usine en réseau avec ses fournisseurs et ses clients, capable de recomposer facilement sa chaîne de valeur pour s'adapter aux évolutions du marché et des technologies, tout en développant l'intimité digitale avec ses fournisseurs et ses clients propre à entretenir la confiance et favoriser l'innovation ;
- une usine agile, disposant de modes de production flexibles et d'outils de production reconfigurables, capable de fournir des produits et services individualisés, durables à des prix compétitifs, en petites et moyennes quantités ;
- une usine aux lignes de production et logistiques innovantes, performantes, sûres, mises au point en les simulant et en les optimisant dans le monde virtuel ;
- une usine propre, silencieuse, impliquée dans son écosystème industriel, économe en matières premières et en énergie ;
- une usine centrée sur l'humain, pour mieux prendre en compte les attentes des collaborateurs tout au long de leur vie active et mieux attirer les talents dont elle a besoin ;
- une usine qui affranchit, grâce à l'automatisation et la robotique collaborative, l'homme des tâches pénibles ou répétitives pour mettre ses fonctions cognitives au service de la qualité, de l'innovation et du déploiement du changement agile ;
- une usine qui tire parti des apports de l'internet des objets et du cloud qui permet de piloter la production à partir des objets eux-mêmes, et d'assurer une traçabilité précise des opérations."

1.5. Des visions nationales différentes

L'industrie du futur est la vision française du développement nécessaire de l'activité industrielle. De nombreux pays ont développé leur propre programme. Si le nom de ces programmes diffère, ils ont tous un socle commun.

Comme le précise Thibaut Bidet-Mayer : "Les actions mises en place pour accompagner les entreprises vers l'industrie du futur se déclinent autour de trois thèmes : le développement de l'offre de technologies liées à l'industrie du futur, le soutien à la modernisation de l'appareil de production et le développement de ces compétences pour faire face à ces transformations"¹

Cependant, les solutions envisagées divergent en fonction de la culture industrielle et des réalités économiques et sociales de chaque pays.

Basées sur la transformation digitale, l'industrie 4.0 et la smart factory développées par l'Allemagne ont servi de base aux programmes de certains pays comme l'Angleterre, l'Espagne ou les Pays-Bas. La France a intégré l'industrie 4.0 dans un concept plus global où l'homme occupe une place centrale.

D'autres pays englobent l'industrie du futur dans des programmes très ambitieux. On peut noter le programme indien Make in India lancé en 2014 par le gouvernement dont l'objectif est d'encourager et d'accompagner les entreprises manufacturières à investir et produire dans ce pays.

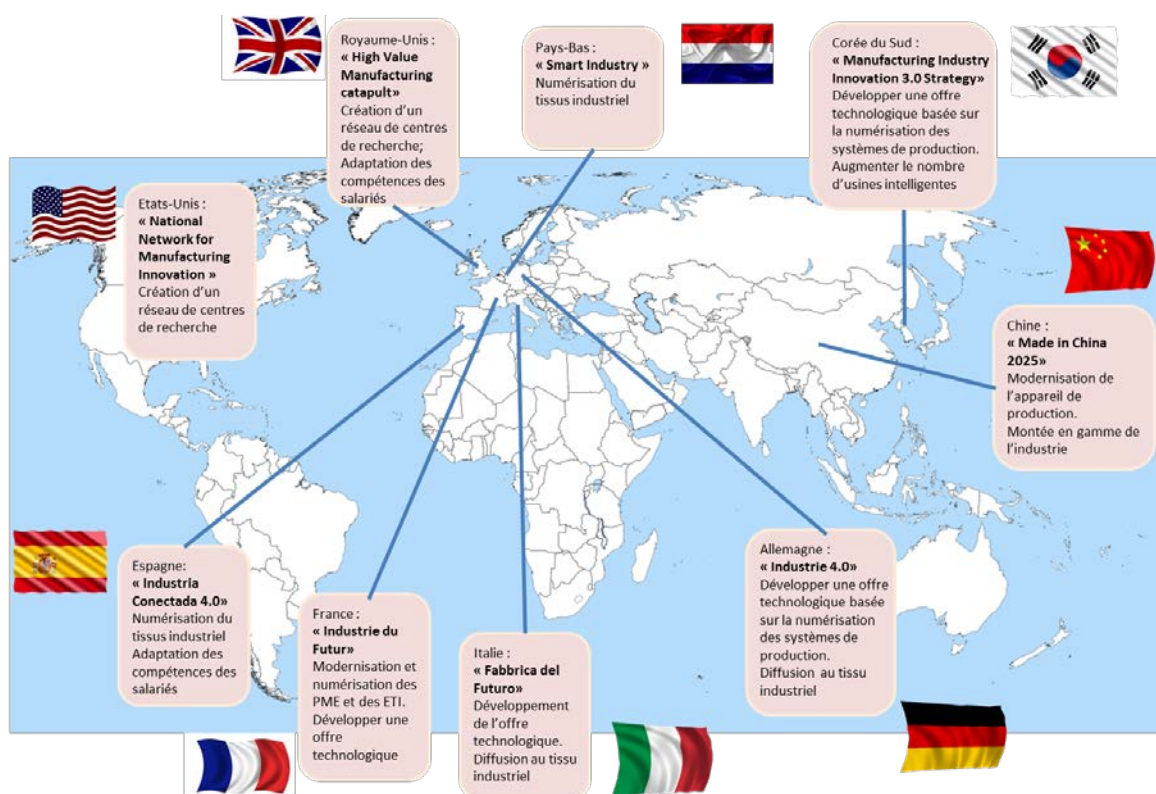


Figure 6- Les principaux programmes dans le monde pour l'industrie du futur [La Fabrique fr la documentation française / Photos Shutterstock Roger Violli]

¹ L'industrie du futur à travers le monde, La fabrique de l'Industrie, 2016

2.

BRIQUES
TECHNOLOGIQUES
ET CAS D'USAGE



2. BRIQUES TECHNOLOGIQUES ET CAS D'USAGE

L'évolution des usines dans le cadre de l'industrie du futur est directement associée à un certain nombre de briques technologiques. Elles en sont même un pilier majeur sur les concepts d'usine 4.0 que l'on retrouve en Allemagne notamment.

Nous nous proposons d'en lister un nombre réduit comprenant l'essentiel de celles-ci. Nous avons tenté également d'intégrer des briques non technologiques liées au management. Nous avons ciblé les briques les plus répandues (sur les filières et les métiers) et les plus exploitables dans un cadre éducatif.

Ainsi, nous pourrions également nous intéresser aux briques suivantes :

- sur les procédés : le MIM (Moulage par Injection du Métal), le soudage, plasma, collage... ;
- sur les matériaux : composites (matrice céramique, hybride...), nanomatériaux, nanotubes de carbone, nouveaux alliages, matériaux auto-réparants, le bio-mimétisme ;
- sur l'électronique : la RFID (Radio Frequency Identification), les MEMS (Microelectromechanical systems), la plastronique, le Heat pipe, les batteries, l'électronique quantique, la biométrie... ;
- sur l'informatique : les API (Application Programming Interface) ouvertes, le LoRA (Réseau Long Range), le LI-FI (Light Fidelity), l'informatique quantique ;
- sur l'énergie : les smartgrids, la bioluminescence...

Pour la suite nous nous référerons à 5 catégories : les nouveaux procédés, les outils de modélisation et de simulation, le numérique, les cybersystèmes et enfin le management. Chaque brique technologique sera très brièvement présentée.

2.1. Nouveaux procédés et méthodes

2.1.1. Prototypage rapide

L'objectif principal du prototypage rapide est la fabrication d'un modèle physique (maquette, prototype, outillage) dans un délai très court, à moindre coût et avec le minimum d'outillage et d'étapes intermédiaires dans le processus de réalisation.

On peut ainsi, au cours du cycle de développement d'un produit :

- détecter au plus tôt d'éventuels problèmes de conception sans conséquences majeures sur le coût final ;
- tester des solutions alternatives (choix technologiques pour la pièce, procédés utilisés pour sa fabrication...);

- valider rapidement la faisabilité industrielle de la pièce et optimiser les formes et le coût des outillages futurs nécessaires à sa fabrication en série, et donc minimiser les risques de modifications lors de l'industrialisation ;
- affiner les caractéristiques opérationnelles du produit (mécanique, aérodynamique, esthétique, ergonomique...) au travers de tests en grandeur réelle sur un prototype physique ;
- disposer d'un objet support, et éviter ainsi l'arbitrage d'éventuels conflits ou le développement en parallèle des éléments de procédés et de processus inhérent à chaque métier (obtention du brut, usinage, métrologie, assemblage, packaging...).

Intégration pédagogique

Le prototypage rapide constitue par ailleurs un moyen idéal pour tester ses idées dans le cadre des processus d'innovation. Le développement des fablab a permis notamment aux établissements d'enseignement supérieur de soutenir cette créativité et favoriser les expérimentations.

Concept né au MIT, les fablab (pour Fabrication Laboratory) sont selon la charte élaborée par ce même MIT, des lieux ouverts, accessibles à tous, où chacun peut s'exprimer et explorer ses idées. Ce sont des lieux qui mettent à disposition différentes technologies telles que des imprimantes 3D, des découpes laser, des fraiseuses, des scanners et également du matériel de bricolage classique. Des dispositifs de prototypage électronique y sont fréquemment présents tels que des cartes Arduino ou Raspberry PI, véritables micro-ordinateurs permettant de faire de l'électronique embarquée.



Figure 7- Fablab CESI Nanterre

Parfaitement adaptés aux pédagogies actives par projet, les fablab permettent de développer chez les apprenants les compétences associées.

2.1.2. Fabrication additive métallique

Apparue il y a une vingtaine d'années, la fabrication additive métallique (FAM) entre dans une phase de maturité industrielle. Elle est un constituant majeur de l'usine du futur. Ainsi, l'enjeu de ses utilisations industrielles, notamment dans la métallurgie, l'aéronautique, les transports, l'énergie et la maintenance, est désormais très fort.

En effet, ces procédés permettent d'envisager une véritable révolution :

- gain de poids des pièces fabriquées jusqu'à 60% ce qui permet de prévoir un allègement global de plus de 20% ;
- réduction du nombre de pièces à assembler par soudure de près de 90% avec pour impact, entre autres, une amélioration de la fatigue au vieillissement des pièces ;
- possibilité d'intégrer dès la fabrication des tubulures internes et de faciliter les échanges thermiques et le passage de fluides divers ;
- possibilité de réaliser des pièces unitaires et spécifiques (tel que de l'outillage) permettant d'accroître l'agilité de l'entreprise ainsi que des gains de production de plus 6 mois, comparativement à des procédés classiques ;
- mais surtout, la conception très particulière en FAM permet d'envisager des pièces qu'il n'était tout simplement pas possible de réaliser par des moyens traditionnels.

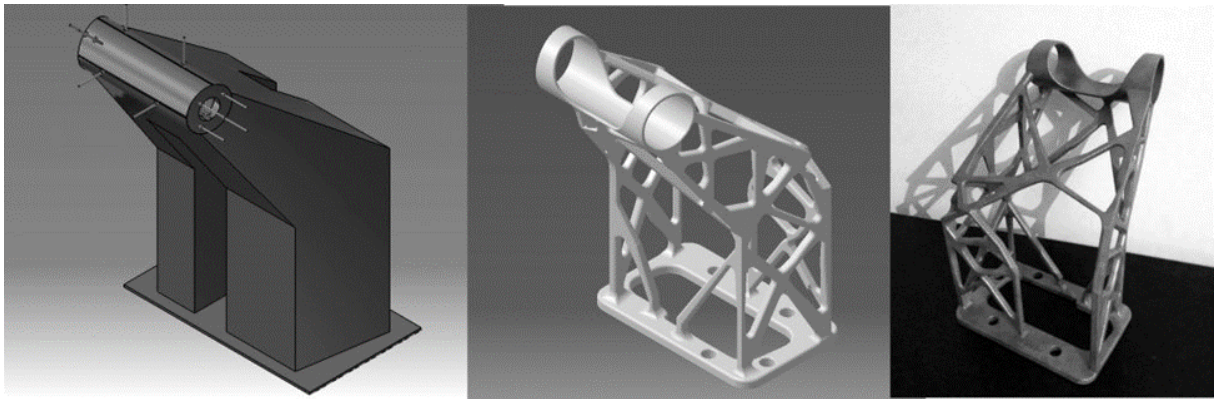


Figure 8- Ex. de support d'antenne pour satellite obtenue par optimisation topologique [Co-conception Thales Alenia Space et Poly Shape, Fabrication par Poly Shape]



Figure 9- Réalisation de pièces complexes sans soudures ni assemblages

Ainsi, les applications pour les industriels sont multiples et le potentiel industriel de la FAM est immense.

Même si la performance métallurgique de la FAM semble encore inférieure à celle des pièces forgées, l'intérêt de cette technologie lors de la conception et de la maintenance est déjà très élevé. Par exemple, la diminution importante du nombre de soudures et la conception même des pièces peut modifier leur résistance mécanique ou leur comportement à l'effort et au vieillissement.

Enfin, la FAM présente l'intérêt de répondre à des besoins précis parfois uniques des industriels (sur la maintenance : reconception, refabrication rapide de pièces cassées..., la réalisation de prototypes industriels, la micro-production...). Or la technologie demeure coûteuse. Ainsi, la mutualisation des outils et la facilité d'accès à ceux-ci est essentiel.

Sept familles technologiques sont communément admises pour la fabrication additive et représentées sur la figure ci-dessous. A noter, que l'évolution technologique est très rapide, ce schéma n'est représentatif qu'au moment de sa publication.

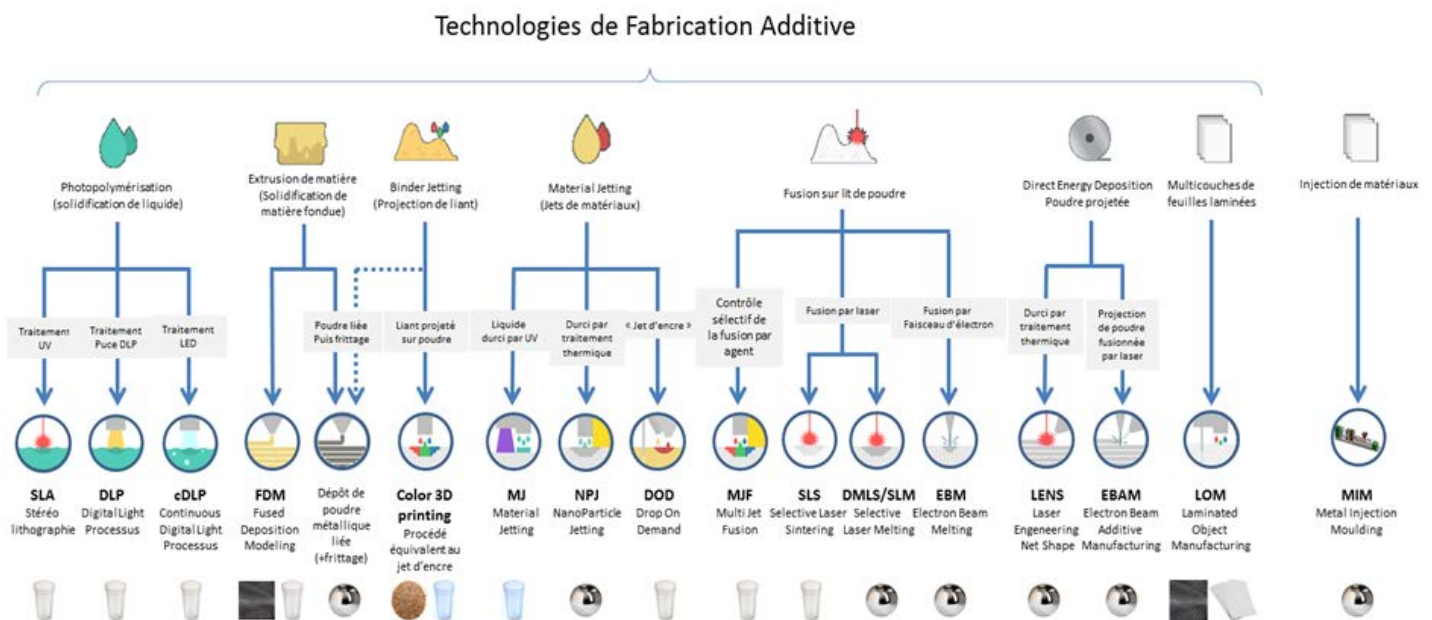


Figure 10- Les 7 familles de procédés de fabrication additive [traduit et inspiré de www.3dhubs.com/what-is-3d-printing]

Trois familles technologiques peuvent être identifiées concernant la FAM :

- 1- **Procédés de dépôt par fil de poudres métalliques liées.** La pièce est réalisée de manière proche du FDM (Fused Deposition Modeling), procédé à dépôt de fil plastique. La pièce nécessite alors un post-traitement en four de frittage pour permettre la fusion de la poudre métallique. L'inconvénient de cette technologie est de réaliser des pièces métalliques poreuses et donc de qualité métallurgique moyenne. Toutefois, cette technologie présente peu de risques industriels et reste intéressante sur le plan du prototypage.

- 2- **Procédés de projection de poudre fusionnée directement sur la pièce.** Intéressant pour la modification de fonction ou la maintenance, ce procédé reste le plus coûteux et le plus complexe à mettre en œuvre. A ce jour, ce procédé reste marginal et le moins développé.
- 3- **Procédés de frittage par laser sur lit de poudre.** L'un d'eux est connu sous le nom de SLM (Selective Laser Melting). Il s'agit de la méthode la plus courante et surtout la plus prometteuse pour la fabrication additive des métaux. Toutefois, il est nécessaire de maîtriser pleinement le risque associé au procédé. En particulier, l'usage de poudres métalliques introduit des risques de déflagration, d'inflammation et CMR (Cancérogènes Mutagènes et Reprotoxiques). Ainsi, il est nécessaire de mettre en œuvre un environnement ATEX complet, en dépression, et les procédures associées.

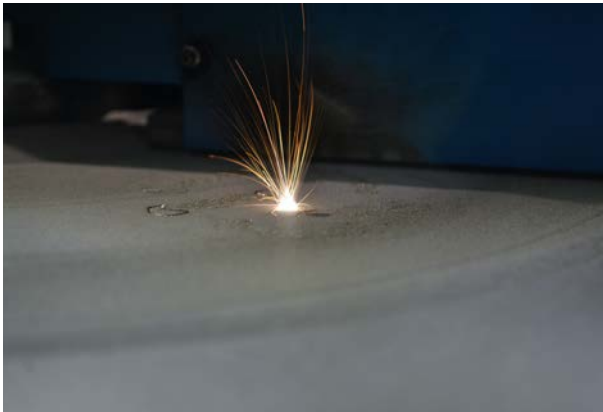


Figure 11- Fusion de la poudre métallique en lit par laser (SLM)



Figure 12- Fusion de poudre projetée (BEAM)

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance (poids, assemblage, canaux) ;
- accroissement de complexité ;
- réalisation d'outillage ;
- personnalisation de pièces / pièces uniques ;
- gestion de l'obsolescence ;
- ajout de fonction aux pièces ;
- maintenance industrielle (réparation).

Intégration pédagogique

La fabrication additive notamment métallique nécessite donc de mobiliser un nombre très important de compétences et de connaissances :

- connaissance des différentes technologies à disposition ;
- connaissance approfondie des sciences des matériaux ;
- conception innovante pour la fabrication additive ;
- maîtrise des processus de sécurité et de protection des biens, des personnes et de l'environnement ;
- maîtrise des machines.

Ainsi, au-delà de compétences associées à l'utilisation de petites imprimantes 3D à dépôt de fils plastiques dans le cadre des fablab, les établissements d'enseignement supérieur vont être amenés à proposer des parcours complets de spécialité proposant l'acquisition de ce métier.

Par ailleurs, la généralisation de ces technologies en tant que nouveaux procédés de fabrication implique que les ingénieurs et techniciens en production, en maintenance, en conception ou encore en qualité soient *a minima* initiés à ces technologies de manière à les appréhender au mieux dans leur métier.

2.1.3. Contrôles non destructifs

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader. Il est utilisé soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

La thermographie

Selon la définition de l'AFNOR, la thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge.

La tomographie

Il s'agit d'un système d'imagerie qui permet de reconstituer le volume d'un objet à partir d'un grand nombre de mesures réalisées par tranche. Cette famille de techniques permet de réaliser des contrôles métrologiques particulièrement précis et surtout d'inspecter l'intérieur d'une pièce et notamment sa structure métallurgique. C'est donc une technique très utilisée dans le milieu médical ou pour les sciences des matériaux. On distingue différentes techniques : l'IRM, la tomographie par rayon X, par émission de positrons ou de muons...

Le ressuage (en anglais penetrating testing)

Il s'agit d'une méthode très utilisée en métallurgie notamment dans l'aérospatiale, qui permet de mettre en évidence la présence de fissures sur tous types de métaux, céramiques, ou matériaux composites.

Le CND par ultrasons

Cette technique permet de mettre en évidence des défauts internes à une pièce par l'émission d'ultrasons et l'analyse de leur réflexion, les ondes interagissant avec les défauts rencontrés.

L'analyse vibratoire

Il s'agit d'une technique permettant de réaliser des prédictions de maintenance sur des machines tournantes. Le principe consiste à réaliser une mesure initiale d'une machine qui en constituera sa signature. De nouveaux relevés sont réalisés à intervalles réguliers et comparés à l'analyse initiale. Toute variation sera le signe d'un problème potentiel tel qu'un desserrement de vis par exemple.

La métrologie optique

Ces méthodes reposant sur les propriétés de la lumière présentent l'avantage d'être rapides à réaliser et souvent faciles à mettre en œuvre. Les mesures par laser permettent, par la précision de ce dernier, de réaliser des contrôles d'alignement, de rectitude, de niveau, d'angles (collimateur, auto collimateur), d'épaisseur, d'apparence, de déplacement, de vibrations.

La magnétoscopie

Cette technologie est majoritairement utilisée dans les sciences des matériaux qui doivent toutefois posséder des propriétés ferromagnétiques (donc alliages à base de fer, nickel ou cobalt). La technique permet de mettre en évidence des fissures, le flux magnétique étant dévié en présence de défauts qui sont alors révélés.

L'émission acoustique

Cette technique repose sur l'émission d'ondes élastiques transitoires dans un matériau. Elle permet de suivre l'évolution dynamique d'un défaut d'une structure et donc de suivre la détérioration de celle-ci. Cette technique est particulièrement avantageuse car elle peut s'effectuer sans arrêt de fonctionnement (et donc de production) tout en apportant un diagnostic global.

Interférométrie holographique

Cette technique est issue des recherches sur la production d'hologrammes pour laquelle, lorsque l'objet bouge ou se déforme, apparaissent des raies d'interférence. Ce phénomène est ainsi exploité en CND pour mesurer les déformations d'un objet.

Notons également le contrôle visuel (qui peut toutefois être assisté par monitoring) qui est le CND le plus simple.

On pourra également s'intéresser à l'analyse d'huiles, aux techniques par courants de Foucault, aux contrôles d'étanchéité...

Les usages industriels sont bien sûr très nombreux mais sont finalement rassemblés dans deux grandes catégories :

- 1- **En contrôle qualité de la production** : les CND peuvent être utilisés pour contrôler en continu les pièces produites et écarter les non-conformités. L'intérêt est évident sur les productions unitaires ou les produits coûteux.
- 2- **En maintenance industrielle (et domaine BTP)** : les CND permettent de mesurer l'état de fonctionnement de systèmes industriels, les niveaux d'usure. Ils facilitent ainsi la prédiction de maintenance qui devient alors conditionnelle (réalisée sous condition de l'état réel du système). En tant que générateur de données, ils sont associés à d'autres types de capteurs. L'ensemble des mesures doivent alors être compilées et analysées par IA (Intelligence Artificielle) pour réaliser des prédictions de maintenance à réaliser.

Intégration pédagogique

Tel que nous le verrons dans le chapitre 3, les CND deviennent indispensables à la prédiction du besoin de maintenance ainsi qu'au contrôle de la qualité. Ainsi, et de fait, ces éléments doivent faire partie du socle de connaissance maîtrisé par les ingénieurs et techniciens de ces domaines.

2.2. Modélisation et simulation

2.2.1. Modélisation multi-physique

Le fonctionnement de la plupart des produits industriels met en jeu des interactions entre plusieurs phénomènes physiques de natures différentes (mécaniques, thermiques, chimiques, électromagnétiques...). Il est donc nécessaire de pouvoir modéliser leur comportement, en intégrant les interactions entre les différents phénomènes physiques existants : c'est le rôle de la modélisation multi-physique.

La modélisation et la simulation multi-physique sont très étroitement liées aux approches systémiques. Ainsi, elles permettent de consolider des études complexes et donc de résoudre des problématiques scientifiques et techniques et d'aider à la prise de décision. Elles sont, en effet, une brique essentielle du prototypage virtuel. C'est pourquoi elles sont associées aux concepts de jumeaux numériques, de BIM (Building Information Modelling) et de PLM (voir les métiers de la conception de systèmes complexes).

D'usages très intéressants pour les métiers industriels, la modélisation pose la question des approches pédagogiques d'enseignement des sciences. Notamment, la modélisation multi-physique est par essence transdisciplinaire, y compris sur les approches méthodologiques. Ainsi, les approches pédagogiques par projets sont tout à fait pertinentes et adaptées.

En particulier, la démocratisation des logiciels de calcul formel implique un changement de paradigme. Il n'est alors plus forcément nécessaire (sauf sur des domaines de forte spécialité) de savoir résoudre des équations complexes ou autres pour résoudre une problématique scientifique, ni consacrer un temps trop long et important aux apprentissages techniques des mathématiques.

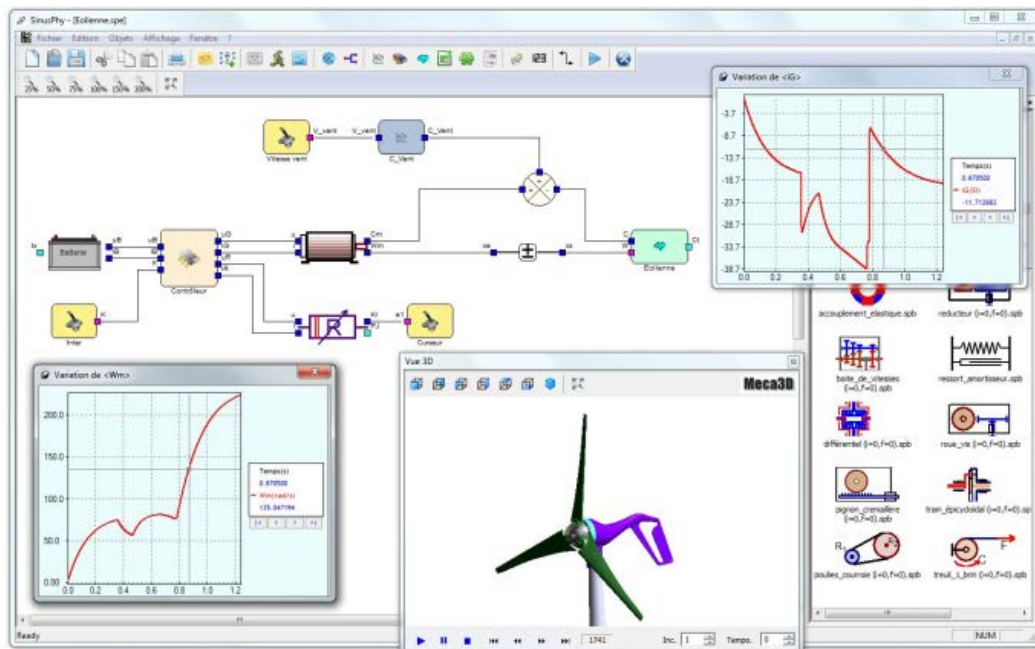


Figure 13- Scilab, logiciel de simulation multi-physique

Le principal logiciel permettant de réaliser les modélisations multi-physiques est MatLab avec Simulink développé par MathWorks.

Toutefois, plusieurs éditeurs proposent des outils gratuits très complets.

Quelques exemples :

- Scilab et XCos (<https://www.scilab.org/fr>)
- OpenModelica (<https://openmodelica.org/>)

Intégration pédagogique

En réalité, la modélisation multi-physique modifie profondément l'approche de l'enseignement des sciences par un décloisonnement complet de ces dernières. Il ne s'agit pas pour autant d'une mauvaise stratégie didactique. En effet, les systèmes physiques sont par nature à la fois chimique, mécanique, électrique, thermodynamique... avec de très fortes interactions de chaque domaine entre eux.

L'enseignement des sciences par cette approche de la modélisation multi-physique nécessite donc d'aborder la question par des pédagogies décloisonnant les domaines et conduisant à des propositions de résolution de problèmes scientifiques complexes.

En ce sens, la pédagogie par projet associant à la fois modélisation, simulation et expérimentation est particulièrement adaptée à cet enseignement.

2.2.2. Réalité virtuelle

La réalité virtuelle consiste à reproduire artificiellement une expérience sensorielle, qui peut inclure la vue, le toucher, l'ouïe et même l'odorat. Elle permet à l'utilisateur d'être pleinement immergé et de réaliser diverses simulations de la réalité.

Les moyens peuvent être des CAVE (projection stéréoscopiques 3D sur 3 à 5 faces d'un cube), des murs d'immersion, des casques, ou encore des systèmes haptiques pour le retour d'effort (voir paragraphe suivant).

Différents moyens informatiques existent pour le développement des contenus tel que Unity, par exemple, qui est aujourd'hui le logiciel le plus utilisé et par ailleurs gratuit (<https://unity3d.com/fr>).

Cependant, l'usage de ce dernier nécessite des compétences en développement informatique. Son utilisation est donc limitée pour des ingénieurs lors de cas d'usages industriels (ou pour les métiers du BTP dans le cadre de l'exploitation de la maquette BIM).

Ainsi, des solutions logicielles existent et permettent la visualisation directe de maquettes 3D réalisées sous Autocad, REVIt ou Catia. Ces solutions peuvent également autoriser la superposition de simulations techniques et scientifiques réalisées par des logiciels spécifiques tels que Fluent.

Quelques exemples de solutions logicielles :

- MiddleVR (<http://www.middlevr.com/middlevr-for-unity/>)
- Improov for Unity (<http://www.improovr.com/home/>)
- TechViz (<https://www.techviz.net/>)
- PLM Vis de Siemens (<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/open/vis/>)

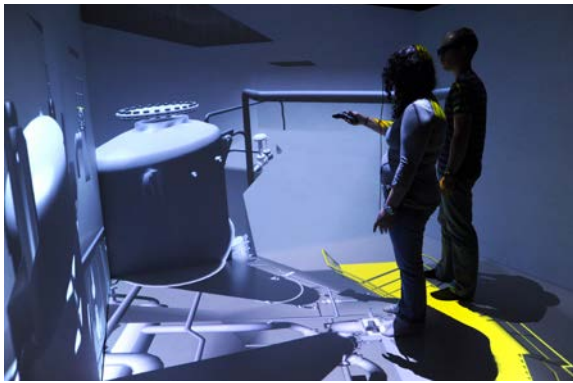


Figure 14- Cube de réalité virtuelle (CAVE) sur 5 faces



Figure 15- Casque immersif



Figure 16- CardBoard + smartphone



Figure 17- Système de réalité augmentée dans une application de maintenance industrielle

Cas d'usages industriels :

- visualisation et exploitation de la maquette numérique ;
- conception collaborative, prenant en compte tous les aspects fonctionnels du produit tout ;
- simulation, aide à la décision ;
- suivi des modifications ;
- innovation ;
- formation ;
- assistance aux techniciens ;
- exploitation, maintenance et entretien ;
- marketing et exploitation commerciale.

Quelques exemples :

- Usage pour la conception de nacelles d'avion chez SAFRAN (<http://usinedufutur.safran-group.com/realite-virtuelle/>)
- Utilisation chez Alstom Transport (<https://www.youtube.com/watch?v=h-JNNDwvP-Q>)
- Dassault System / Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=400PKgdliHI>)
- Bras haptique Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=4MfrgzFFVis>)

Intégration pédagogique

Comme nous le verrons au chapitre suivant, l'exploitation pédagogique de la réalité virtuelle peut être vue tout autant sous l'angle du développement de technologies, du développement de solutions logicielles que de l'utilisation industrielle.

Ainsi, l'intégration pédagogique de cette technologie va dépendre directement du métier préparé et du diplôme associé, mais il semble évident que la plupart des formations aux métiers techniques devront aborder cette technologie.

Concernant l'usage industriel, un parallèle peut être fait avec l'apparition de l'informatique grand public dans les années 80, où une sensibilisation était faite aux futurs ingénieurs. Selon la même philosophie, il s'agit d'exposer et de familiariser les ingénieurs en devenir à l'utilisation opérationnelle de la réalité virtuelle, notamment par la manipulation de jumeaux numériques de systèmes complexes.

Concernant la question du développement informatique pour ces technologies, de nouveaux métiers sont en train d'apparaître. Le métier d'animateur-concepteur en réalité virtuelle mobilise ainsi des compétences approfondies en programmation ainsi qu'en infographie et modélisation 3D, le tout dans une approche orientée usages et conception innovante. Des formations complètes de la mineure jusqu'au master et mastère spécialisé devront être proposées par les écoles et universités pour répondre aux besoins à venir.

Pour finir, l'intérêt tout particulier de la réalité virtuelle en formation implique une maîtrise partielle ou complète de celle-ci par les enseignants et les formateurs.

2.2.3. Systèmes haptiques

La réalité virtuelle reconstitue la réalité par une simulation. L'expérience peut être plus ou moins immersive selon les media de diffusion. Toutefois, les CAVE ou les casques ne permettent pas de simuler une perception essentielle qu'est le sens du toucher.

C'est le rôle des systèmes à retour d'effort dits haptiques dont le fonctionnement est présenté par le schéma ci-après.

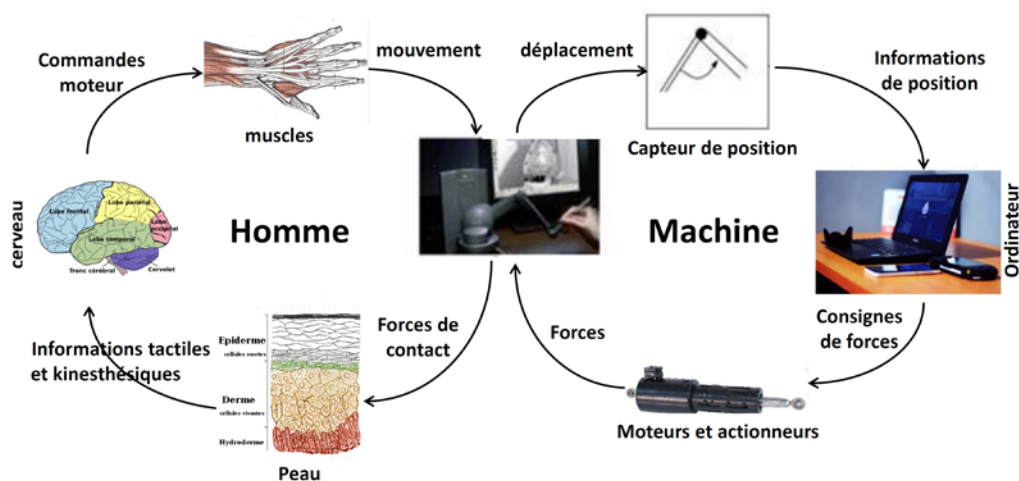
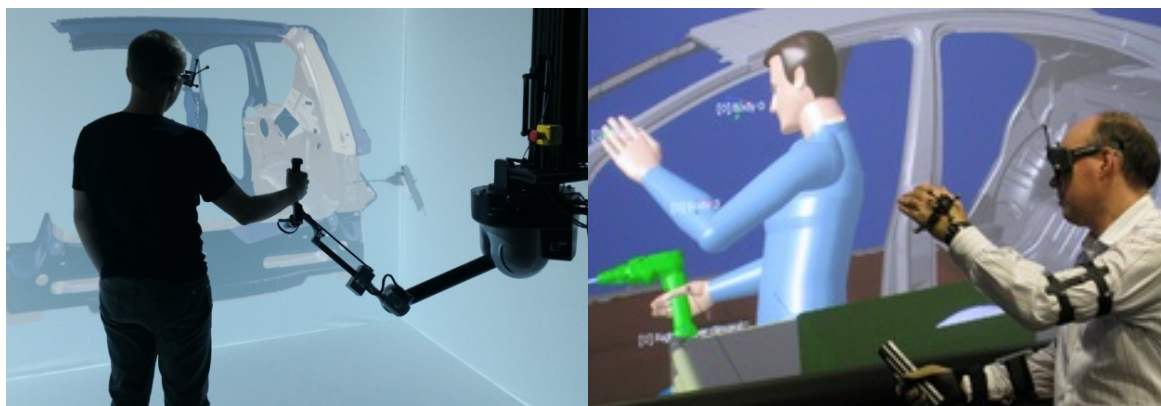


Figure 18- Interaction haptique entre l'homme et la machine [Casiez, 2004]

Les systèmes haptiques permettent ainsi de simuler le contact physique avec un objet virtuel, le poids d'un objet et le sens du toucher d'une manière générale.



*Figure 19- Bras haptique
intégré à une CAVE*

*Figure 20- Gant haptique
pour la simulation du toucher*

Ces systèmes peuvent être intégrés à des cubes d'immersion. Ils peuvent également être couplés à des systèmes de captation de mouvement (par exemple Xsens - <https://www.xsens.com/>) ainsi qu'à des capteurs biométriques (intégrés à des vêtements intelligents ou à des objets connectés).

Cas d'usages industriels :

- études ergonomiques ;
- étude de pénibilité ;
- formation aux gestes techniques ;
- conception d'un poste de travail.

Quelques exemples :

- Démonstration du Scale 1 d'Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=4MfrgzFFVis>)
- Etude du poste de travail – Dassault (<https://www.youtube.com/watch?v=wyvYp58RKnA>)
- Etude ergonomique avec Xsens + Haption (<https://www.youtube.com/watch?v=TI2p2kKd9IY>)

Intégration pédagogique

Les systèmes haptiques permettent l'immersion la plus élevée possible pour la réalité virtuelle. Ils trouvent un usage très intéressant pour les métiers de l'ergonomie, du HSE ou pour la formation en elle-même. En effet, ils permettent de reproduire le geste et de parfaire son apprentissage pour les métiers manuels notamment.

Concernant les formations d'ingénieurs, l'appropriation technologique des systèmes haptiques pourra être intéressante sur le plan pédagogique pour les métiers du développement informatique pour la 3D ou encore pour les formations de à la qualité ou les formations intégrant des modules d'ergonomie.

2.2.4. Réalité augmentée

Contrairement à la réalité virtuelle (VR – Virtual Reality), la réalité augmentée permet d'ajouter des informations dans notre champ visuel. En superposition au monde réel, des visuels se juxtaposent à l'environnement visible. Par exemple, pour des opérations de maintenance : en pointant un équipement avec un outil de réalité augmentée, les procédures adéquates vont apparaître dans le champ de vision de l'opérateur. Ainsi, il pourra intervenir rapidement en suivant les informations affichées.

On note que la rupture entre les réalités virtuelle et augmentée n'est en réalité pas si nette. On peut en effet définir un continuum progressif entre les deux, défini par Milgram.

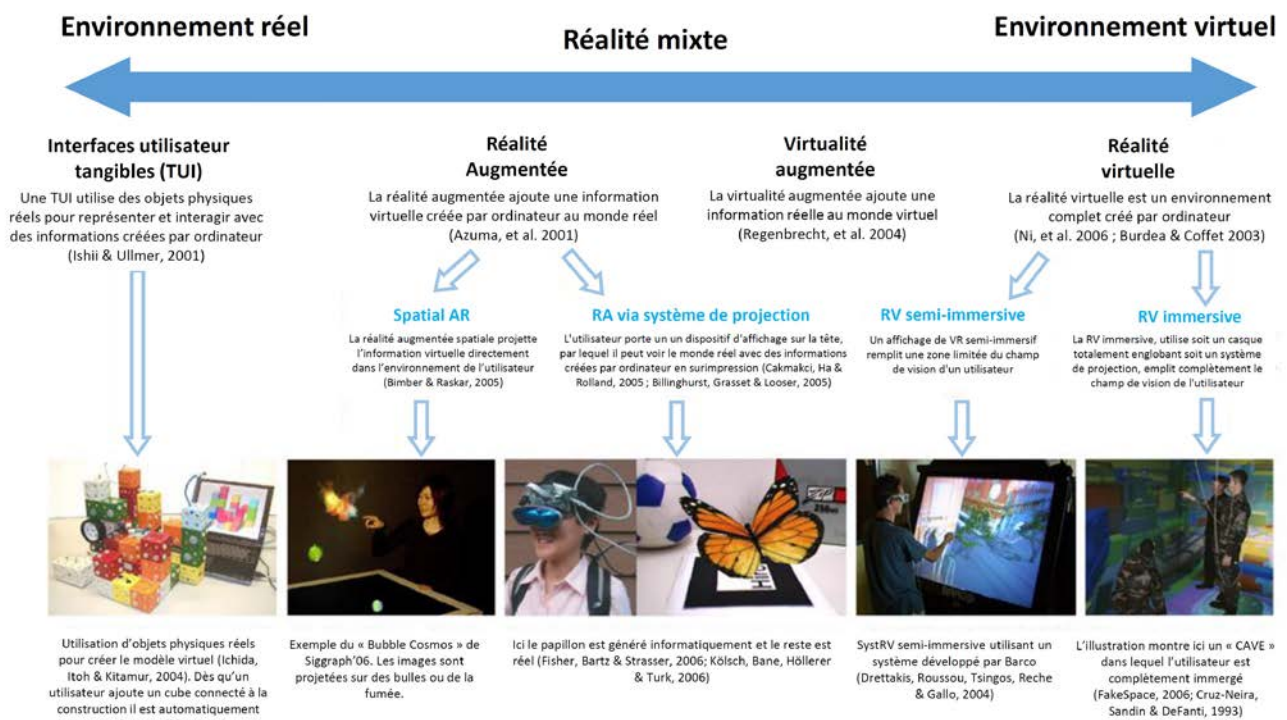


Figure 21- Continuum de Milgram
 [https://realiste.wordpress.com/le-continuum-de-milgram/]

Cas d'usages industriels :

- visualisation et exploitation de la maquette numérique ;
- conception collaborative ;
- simulation, aide à la décision ;
- suivi des modifications ;
- innovation ;
- formation ;
- assistance aux techniciens ;
- exploitation, maintenance et entretien.

Quelques exemples :

- SAFRAN : utilisation de la réalité augmentée comme assistance aux opérateurs en maintenance ou comme appui au contrôles non destructifs (<http://usinedufutur.safran-group.com/realite-augmentee/>),
- Microsoft – cas d’usages (<https://www.youtube.com/watch?v=JsSfluByteo>)
- ThyssenKrupp, utilisation en maintenance (<https://www.youtube.com/watch?v=8OWhGiyR4Ns>)
- Renault (<https://www.youtube.com/watch?v=N6iAk3I3DVU>)

Intégration pédagogique

De la même manière que pour la réalité virtuelle, l’enseignement et/ou l’usage des dispositifs de réalité augmentée va dépendre directement des métiers visés, allant de la sensibilisation à l’expertise. Les futurs ingénieurs et techniciens devront dans tous les cas se familiariser avec ces technologies car elles deviendront pour le métier un moyen aussi répandu que les calculatrices ou les ordinateurs.

Quelques cas où un enseignement approfondi sera nécessaire :

- **Les métiers de la maintenance industrielle ou du bâtiment** pour lesquels une généralisation de la technologie est plus que prévisible. Une compréhension, une appropriation élevée ainsi qu’une capacité à maintenir une veille active sur le domaine seront nécessaires pour imaginer les nouveaux cas d’usage et former les futures générations d’opérateurs.
- **Les informaticiens** pour lesquels un nouveau métier est en train d’apparaître, celui de concepteur animateur pour la 3D.
- **Les métiers de la formation** elle-même puisque la réalité virtuelle et augmentée constituent un moyen particulièrement puissant et adapté.

2.2.5. Jumeau numérique

Très intimement lié aux concepts industriels de PLM et de BIM, le concept de jumeau numérique ou « Digital Twin » a été formalisé par le Dr. Michael Grieves en 2002.

Grieves le décrit comme une mise en miroir (ou comme un jumeau) de ce qui existe dans le monde réel et de ce qui existe dans le monde virtuel. Il contient toutes les informations de « l’objet » physique c’est-à-dire une représentation de toutes les disciplines et pas seulement mécanique ou géométrique, mais aussi une représentation électronique, du câblage, du logiciel, du micro logiciel, etc. Le jumeau numérique est donc bien plus qu’une simple copie en CAO.

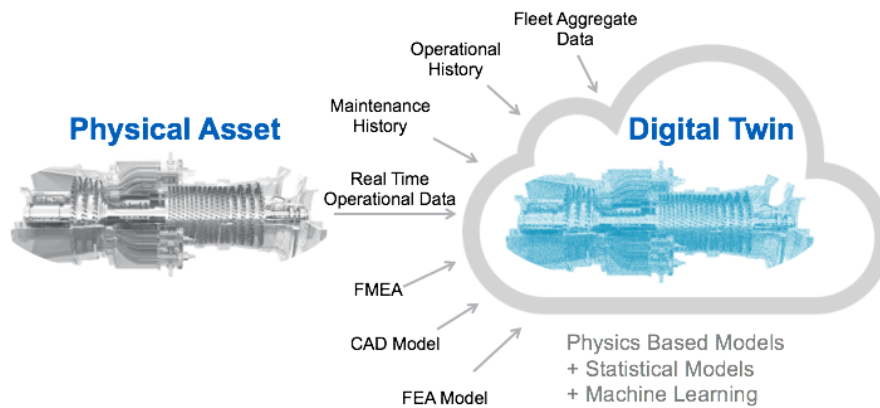


Figure 22- Principe d'un jumeau numérique ou Digital Twin d'un système industriel complexe [https://www.geoilandgas.com/]

Cas d'usages industriels :

- modélisation et simulation de systèmes complexes (intégration de la modélisation multi-physique) ;
- amélioration de la performance globale des systèmes complexes ;
- accroissement de la fiabilité ;
- meilleure appréhension de la complexité des systèmes (aide à la décision) ;
- gain de temps de conception par prototypage virtuel ;
- amélioration de la coopération des équipes projet multidisciplinaires ;
- surveillance et analyse de systèmes complexes.

Quelques exemples :

- Siemens, le DT au cœur de la chaîne numérique (<https://www.youtube.com/watch?v=oWeAYJ8CN70>)
- Conférence Digital Twin (<https://www.youtube.com/watch?v=RaOejcczPas>)
- DNV GL, définition (<https://www.youtube.com/watch?v=8ger1wrAonM>)

Intégration pédagogique

Pour ce qui est de la pédagogie, l'enjeu est double pour les ingénieurs : savoir développer et savoir exploiter les jumeaux numériques, c'est-à-dire modéliser et simuler des systèmes complexes.

Sur ce point, le parallèle sera fait avec l'apparition des logiciels de CAO qui ont progressivement remplacé les planches à dessin industriel. Ainsi, les établissements d'enseignement supérieur devront mettre en œuvre les modules et formations adaptés à l'acquisition des compétences de développement des jumeaux numériques. Tout comme cela l'a été de l'enseignement des logiciels de CAO. Evidemment, cela est particulièrement le cas pour les diplômés en conception de produits industriels.

De plus, l'utilisation des jumeaux numériques va permettre de dupliquer des équipements de formation. Ainsi, un simulateur de ligne de production installé physiquement à un endroit pourra voir son jumeau numérique exploité sur un autre centre.

2.3. Cyber systèmes

2.3.1. Robotique

Systèmes complexes associant des éléments mécaniques, électroniques, électriques, informatiques..., les robots peuvent remplacer l'humain sur des tâches simples et répétitives. Branche de l'automatique qui en permet le contrôle et la programmation, la robotique permet donc d'accroître très fortement le rendement des lignes de production tout en augmentant les temps de production. Par ailleurs, ils permettent de diminuer les erreurs (et donc les non-conformités) et présentent un fort intérêt pour la réduction de la pénibilité en réalisant les tâches les plus difficiles ou à faible valeur ajoutée.

Déjà présents dans l'industrie depuis plus de 20 ans, l'enjeu est de généraliser leur usage voire d'adapter des lignes existantes « classiques ».

Selon les définitions, les robots mobiles peuvent être parfois considérés comme des drones. De même, les robots lorsqu'ils sont sécurisés et qu'ils intègrent de l'intelligence artificielle peuvent assister les personnes et collaborer. Ils prennent alors le nom de cobots.

Cas d'usages industriels :

- automatisation des lignes de production ;
- réalisation des tâches pénibles et répétitives ;
- accroissement de la performance ;
- usine en fonctionnement continu.

Exemple :

- Robot de soudage (www.youtube.com/watch?v=sTlhzwXAOzA)

2.3.2. Cobotique

La cobotique est une branche de la robotique qui consiste à mettre en œuvre des robots collaboratifs et sûrs pour l'humain qu'ils assistent. Ce que l'on désigne par cobot.

Le cobot vient ainsi accroître la performance de l'humain tout en le dégageant de ses tâches les plus pénibles, notamment celles nécessitant des efforts physiques importants et/ou fortement répétitifs. Le cobot doit œuvrer en interprétant les gestes et les besoins de la personne pour lui apporter la meilleure réponse.

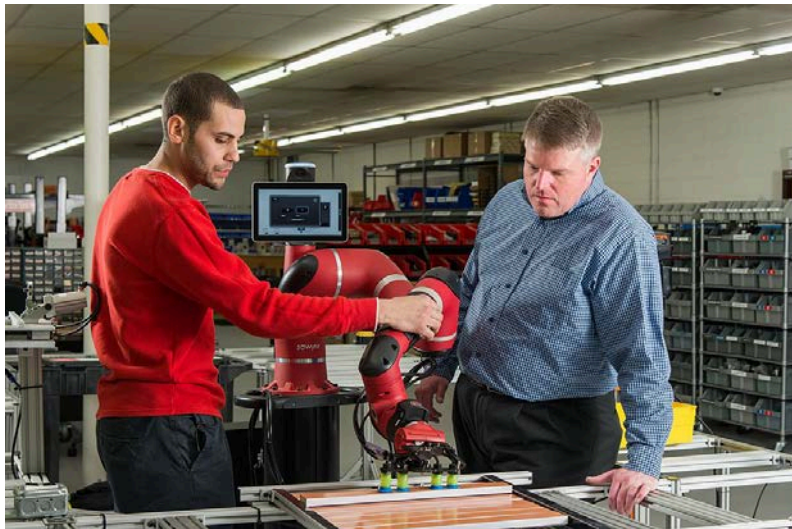


Figure 23- Cobot (collaborative robot) en assistance d'un opérateur

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance ;
- diminution de la pénibilité ;
- opérations médicales ;
- actions à distance.

Quelques exemples :

- Les cobots au secours des ouvriers (<https://www.youtube.com/watch?v=JUMpalxSLRM>)
- Témoignage d'une opératrice (<https://www.youtube.com/watch?v=lj-7iGI9Uqc>)
- Suppression des tâches pénibles (<https://www.youtube.com/watch?v=0zxmF8FpQYA>)
- Assistance au meulage (<https://www.youtube.com/watch?v=ITjVeym63WM>)

2.3.3. Exosquelettes

Un exosquelette ou squelette externe est une structure solide qui protège le corps d'un animal et ses organes. Les insectes, les crustacés ou encore les arachnides possèdent un exosquelette ou carapace externe, en opposition à l'endosquelette tel que celui des vertébrés.

Les exosquelettes biomécaniques sont développés depuis de nombreuses années pour améliorer la performance de l'être humain en particulier à des fins militaires.

Nous les voyons désormais apparaître dans l'industrie ou la compensation du handicap humain. En remplaçant complètement la fonction lésée dans le dernier cas, en améliorant la performance physique dans le premier. Ainsi, les tâches de manutention, de levage sont des applications industrielles intéressantes.



Figure 24- Exosquelette utilisé en maintenance ou pour la performance physique

Cas d'usages industriels :

- accroissement de performance ;
- suppression de la pénibilité ;
- adaptation du poste de travail ;
- compensation du handicap ;
- usages augmentés.

Quelques exemples :

- Dans une usine Renault (<https://www.youtube.com/watch?v=ztOt242mCpY>)
- Pour Fukushima (<https://www.youtube.com/watch?v=BUL53BK0m8Y>)
- Sur des chantiers (<https://www.youtube.com/watch?v=nfwrfuFNbro>)

2.3.4. Drones

La définition des drones diffère entre la France et les pays anglo-saxons. Traduction de « faux-bourdon » le drone est un aéronef sans passager qui peut être soit contrôlé à distance, soit fonctionner en autonomie. En France, on parle de drone également pour les objets terrestres ou sous-marins.

Développés initialement pour des applications militaires, ils trouvent désormais de nombreuses applications industrielles, par exemple dans le BTP ou l'agriculture. On les utilise pour des besoins de surveillance ou de transport. L'acception française inclut également la réalisation d'actions à distance.

Cas d'usages industriels :

- surveillance d'un chantier BTP ;
- surveillance des ouvrages pour évaluer les pathologies ;
- surveillance des lignes ferroviaires ;
- surveillance des cultures agricoles ;
- transport de colis ou de pièces ;
- livraison à domicile ;

- transport autonome de personnes ;
- microdrone : pollinisation de culture ;
- actions distantes en milieu sensible ou dangereux (ex : nucléaire) ;
- usages militaires.



Figure 25- Drone

Exemple :

- Les drones au service du BTP (<https://www.youtube.com/watch?v=WqXe-lzxEqU>)

2.3.5. Intégration pédagogique des cybersystèmes

A ce jour, toutes les formations d'ingénieurs intègrent des modules plus ou moins approfondis en automatisme et régulation. La massification de l'utilisation industrielle des robots ainsi que leurs interactions de plus en plus fortes avec les humains impliquent une évolution de ce champ d'enseignement avec des options ou des mineures entièrement consacrées à l'apprentissage des cybersystèmes.

2.4. Informatique

Les concepts de l'usine du futur et de la ville intelligente et durable sont directement portés par les évolutions actuelles de l'informatique qui porte la « digitalisation », terme impropre, de ces secteurs.

Nous faisons le choix de faire un focus sur un panel très restreint de briques technologiques mais qui nous semblent symboliques de la révolution numérique en cours. Nous aurions pu évoquer toutes les briques liées à la gestion du Web et des réseaux, à des technologies telles que le LoRA, le LiFi, les plateformes de services, le Cloud Computing...

2.4.1. IoT, capteurs intelligents

Terme inventé en 1999 par Kevin Ashton, l'Internet Of Things désigne les systèmes en capacité de réaliser des mesures de tout type de manière automatisée et sur des portées importantes. A titre d'exemple, un Airbus A380 contient près de 200 000 capteurs connectés, 10% seulement étant exploités pleinement. Ainsi, en moyenne, chaque vol génère près de 1,6 Go de données.

Pour les informaticiens, les enjeux sur les IoT consistent à maîtriser et harmoniser les protocoles de communication ainsi que d'amener tous les services associés qui répondent aux besoins des utilisateurs tels que l'assistance vocale. En effet, les IoT, au-delà de représenter des sources de données intéressantes, sont le cœur de la valeur ajoutée pour le client final. C'est pourquoi la question de la sécurité des IoT sera la principale préoccupation dans les années à venir.

2.4.2. Big Data

Comme pour les autres domaines, nous ne donnerons pas ici de description exhaustive de la notion de Big Data. Ce qu'il faut retenir, c'est que l'inflation exponentielle de capteurs et d'objets connectés a entraîné la création d'une quantité tellement massive de données que les bases de données classiques ne peuvent les gérer. Les enjeux du Big Data consistent à être en capacité de gérer, de qualifier et d'utiliser en un temps très court l'ensemble des données disponibles.

Ce concept très vaste est lui-même relié à de nombreux autres concepts tels que le cloud computing, les données non structurées, la réduction des temps d'accès aux bases de données, les bases de données géantes.

Evidemment, tous les domaines industriels sont intéressés par le Big Data, source d'informations inépuisable ; tant pour déduire des comportements machines ou humains, prédire des défaillances, que permettre la traçabilité unitaire des produits. L'objectif est de créer un écosystème informationnel en capacité de permettre à l'industriel d'améliorer ses processus et d'accroître sa performance.



Figure 26- Data base

2.4.3. Intelligence artificielle

Tout comme pour la fabrication additive, il n'y a pas une mais plusieurs technologies d'intelligence artificielle. On y trouve notamment les concepts de « Machine Learning », de « Deep Learning » ou encore de « Deep Reinforcement Learning ».

La finalité de l'IA consiste à permettre à des machines de réaliser des tâches habituellement dévolues à l'être humain : apprendre, dialoguer, raisonner, modifier son comportement en fonction de situations extérieures complexes, penser. L'enjeu, de taille, consiste donc à produire des algorithmes capables de reproduire des fonctions cognitives complexes. Le Deep Learning repose sur la capacité de la machine à reconnaître des situations, des formes de manière automatique à partir d'informations qui lui auront été communiquées et d'adapter sa réponse puis son comportement sur la base de règles claires. Par exemple, nous reconnaissons un chat à chaque fois que nous en voyons un, et cela très rapidement. Et pourtant il existe énormément d'espèces différentes. Cette capacité est directement liée au stockage dans notre mémoire d'un nombre extrêmement important de représentations de chats. C'est la même chose pour l'IA qui pour être en capacité de reconnaître ces animaux sans les confondre avec des chiens par exemple, accumule une quantité de données très importante puis agit par comparaison. On imagine la quantité de stockage nécessaire pour cela.

Le Deep Reinforcement Learning va plus loin quant à lui en procédant par essais-erreurs. Nous sommes donc là plus proches de ce que peut être une capacité d'apprentissage.

Ainsi, pour le moment, l'IA repose sur la capacité à gérer des bases de données et d'informations très importantes et à développer des algorithmes complexes. Ainsi, elle sera assez rapidement limitée aux capacités du Big Data, du Cloud Computing et des capacités de calculs des machines actuelles. Toutefois, l'avènement prochain de l'informatique quantique ouvrira des champs quasi illimités à l'intelligence artificielle grâce à des capacités de calcul proches de celles d'un cerveau humain voire davantage.

L'enseignement de l'informatique quantique est évidemment encore prématuré et constitue une activité de recherche très forte qui va s'intensifier à l'avenir. Au regard des progrès rapides d'entreprises telles que IBM qui prévoit la commercialisation d'un ordinateur quantique à 20 q-bits dans les prochaines années, il est naturel d'imaginer les nouveaux métiers sur ce secteur à un horizon très proche. Toutefois, cela fera appel à des compétences notamment en mathématique de très haut niveau.

Les enjeux de l'IA sont donc extrêmement forts et les cas d'usage très nombreux :

- robots et véhicules autonomes ;
- l'IA comme support de la cobotique et des assistants personnels ;
- analyse de données comportementales à des fins marketing ;
- prise de décisions complexes à partir de situations complexes et nouvelles ;
- optimisation de la gestion technique de bâtiments en vue de l'amélioration globale de leurs performances notamment énergétiques ;
- analyse massive de données et production de prévisions. Les cas d'usages sont multiples : prévisions comportementales, physiques pour l'amélioration des flux de production, de la maintenance, de la chaîne logistique...

2.4.4. Cybersécurité, blockchain, cryptologie

Les possibilités inouïes des technologies que nous venons de développer sont à la hauteur des enjeux de sécurité associés. En effet, la prise de contrôle malveillante de systèmes d'intelligence artificielle et des données qu'ils utilisent peut avoir des conséquences particulièrement dramatiques. Il est important de noter que la notion de cybersécurité est très large et concerne tout autant les questions de technique et de technologie que les questions juridiques.

Un des concepts les plus prometteurs au sujet de la sécurité des échanges et des transactions informatiques est la blockchain. Selon la définition donnée sur le site BlockChain France : *« La blockchain est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, et fonctionnant sans organe central de contrôle. Par extension, une blockchain constitue une base de données qui contient l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs depuis sa création. Cette base de données est sécurisée et distribuée : elle est partagée par ses différents utilisateurs, sans intermédiaire, ce qui permet à chacun de vérifier la validité de la chaîne. »*

La cryptologie, ou science des codes secrets, quant à elle, est l'ensemble des techniques de chiffrement qui permettent de sécuriser la transmission de données et d'informations et de vérifier leur intégrité. Il s'agit ici de garantir qu'une information ne soit pas modifiée ni consultée tout en s'assurant d'en être informé le cas échéant.

Les enjeux industriels et sociaux :

- sécuriser les données collectées puis transmises ;
- protéger les utilisateurs dans leur vie privée et sociale ;
- garantir la protection physique des biens, personnes et entreprises ;
- garantir l'intégrité des intelligences artificielles.

2.4.5. Intégration pédagogique

L'enseignement de ces briques technologiques, y compris celles que nous n'avons pas volontairement développées, dépend encore une fois des métiers préparés. Ainsi pour l'ingénieur généraliste en industrie, une sensibilisation est suffisante de manière à en comprendre les tenants et aboutissants en termes d'usages.

Les métiers de l'informatique seront eux plus largement impactés et verront la mise en œuvre de modules, de majeures ou de diplômes de spécialités totalement consacrés à ces différents domaines.

2.5. Méthodes et management

2.5.1. Innovation

Un des piliers de l'industrie du futur consiste à libérer les individus des tâches pénibles et répétitives afin qu'ils se consacrent à l'innovation ou à la qualité.

La révolution numérique, ainsi que la disponibilité, la diversité et les potentialités des technologies participent également à la transformation des raisonnements de conception et d'innovation. De nombreuses fonctionnalités et de nombreux services qui semblaient impossibles hier sont devenus en quelques années des réalités quotidiennes, même si le fonctionnement de nombreuses briques technologiques sous-jacentes échappe à la plupart des consommateurs, ainsi qu'à la plupart des concepteurs. Ces derniers doivent renoncer à une vision du monde et de la technique dans laquelle tout est maîtrisé, stable et intelligible. À l'inverse, les progrès technologiques et la vitesse à laquelle ils apparaissent leur laissent le droit de rêver et de s'affranchir de nombreuses contraintes mécaniques, physiques, et mentales. Aujourd'hui, tout est virtuellement possible.

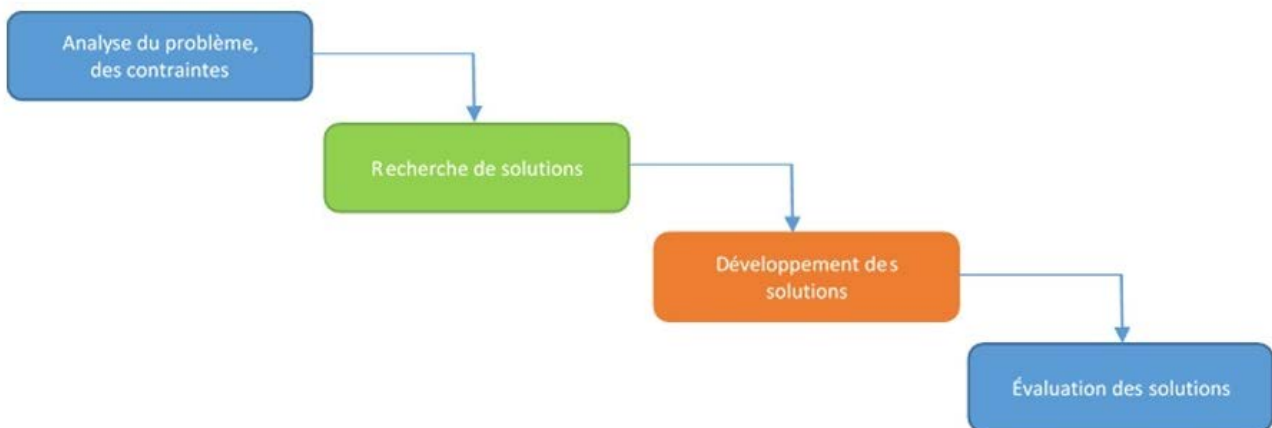


Figure 27- Processus positiviste en cascade

Avant la révolution numérique, l'innovation était vue comme un processus positiviste, dans lequel l'approche analytique et le raisonnement scientifique étaient prédominants. Ce processus issu de la révolution industrielle et du monde mécanique reposait sur l'identification des causes responsables d'un problème, la recherche de nouvelles solutions et le déploiement de celles-ci dans de nouveaux produits. L'investissement était porté sur les phases amont du processus d'innovation, avec l'analyse du problème et la recherche créative. Puis, le reste du processus se déroulait de façon linéaire, séquentielle (processus en cascade, en V, processus Stage/Gate). La bonne analyse du problème était considérée comme garante de la performance des solutions.

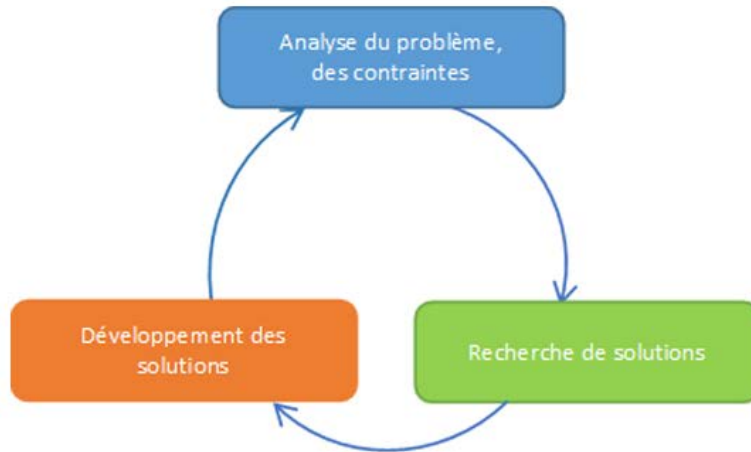


Figure 28- Processus constructiviste circulaire

La révolution numérique a donné lieu à de nouveaux raisonnements d'innovation et de nouveaux processus de conception, tels que les processus circulaires, en spirale et agiles. Ces processus relèvent d'une approche constructiviste dans laquelle le problème est co-construit itérativement en même temps que la solution. Les relations de causalité stricte sont remises en question et ces processus permettent aux membres de l'équipe d'innovation de remettre en question en temps réel leur compréhension du problème, du besoin du client, et leurs choix de solutions créatives. Le raisonnement créatif est mené tout au long du projet et n'est plus circonscrit aux phases amont.

L'analyse de projets d'innovation réalisés par des étudiants et apprentis dans le cadre de leur formation nous apporte des éléments supplémentaires quant à l'efficacité des différents processus d'innovation, et leur pertinence pour former les ingénieurs de demain.

Lorsque les apprenants peuvent choisir librement leur processus d'innovation, on observe que ceux qui obtiennent les meilleurs résultats (propositions les plus créatives, les plus en rupture avec l'existant) sont ceux qui :

- 1- **s'affranchissent des contraintes techniques** et notamment de la définition d'un cahier des charges fonctionnel strict ;
- 2- **utilisent des méthodes de créativité** jusqu'à la fin du projet et n'hésitent pas à pivoter tardivement dans leur projet ;
- 3- **focalisent sur les besoins des usagers** plutôt que sur les briques technologiques.

Ce dernier point est cohérent avec les résultats des observatoires mondiaux de l'innovation (Global Innovation 1000) qui montrent que la stratégie d'innovation la plus porteuse actuellement serait la stratégie Need-Seeker (stratégie centrée sur l'anticipation des besoins futurs des consommateurs), qui dépasse en performance les stratégies Technologie-Driver (développement de produits de valeur technologique supérieure) et Market-Reader (innovation incrémentale et personnalisation des produits basées sur l'écoute des demandes du marché). Dans la formation à l'innovation, il semble donc important d'entraîner les ingénieurs à se concentrer davantage sur les futurs utilisateurs plutôt que sur les contraintes techniques.

2.5.2. Management

La révolution numérique a entraîné une mutation progressive des processus d'innovation, mais pas seulement : elle a aussi amorcé un changement culturel au niveau mondial. L'utilisation d'outils numériques au quotidien, à la fois dans la sphère professionnelle et privée, a permis de développer un mode de communication plus horizontal et moins hiérarchique, avec les citoyens, les responsables politiques, l'ensemble des collaborateurs en entreprise, des clients et des partenaires professionnels. La circulation des informations en réseau se fait de façon immédiate et de plus en plus transparente à la fois en interne et en externe à l'entreprise.

Cette tendance a plusieurs conséquences : elle entraîne une perméabilité des frontières de l'entreprise, et rend possible une plus grande agilité de collaboration avec partenaires, fournisseurs et clients afin de s'adapter en temps réel aux besoins de l'utilisateur final. Mais l'agilité en interne à l'entreprise est aussi un puissant levier de révolution managériale. Elle rend possible des boucles de projet itératives et des circuits de décision drastiquement raccourcis.

Cependant, de nombreux décideurs tendent à se focaliser sur les investissements technologiques au détriment parfois de l'accompagnement de leurs équipes. Ainsi, alors que la transformation digitale devrait renforcer la confiance mutuelle, à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise, elle suscite encore beaucoup de peurs de la part des salariés et des managers. La révolution numérique exige de se réinventer, et cela n'est possible que par et avec le capital humain de l'entreprise. Or, 80% de l'échec des projets techniques et technologiques viendrait du sous-dimensionnement de la prise en compte du facteur humain, et de la conduite du changement.

Le rôle du leader est ici prépondérant, en particulier dans un pays comme la France, dont le profil culturel implique une « distance hiérarchique élevée ». Cela signifie que le poids du leader est décisif : celui-ci peut être un formidable levier de transformation de l'entreprise, ou un frein total à celle-ci.

L'industrie du futur sera également mise en œuvre par les collaborateurs du futur. A ce titre, il est important de s'intéresser aussi aux évolutions sociodémographiques qui contribuent à transformer les modes de management des entreprises. L'arrivée sur le marché de l'emploi et aux postes de dirigeants, des « digital natives » renforce le besoin général d'horizontalité et de démarche participative en entreprise. Les collaborateurs de la génération Y ont également plus tendance à opérer leurs choix de carrière en fonction de leur adhésion au projet stratégique de l'entreprise, sa « raison d'être », plutôt qu'en fonction de renforçateurs extrinsèques comme le salaire et le positionnement hiérarchique. Enfin, ils seraient moins sensibles au management transactionnel reposant sur l'autorité et l'attribution de récompenses en réponse à une performance professionnelle.

En conséquence, on assiste au développement d'un style de leadership appelé « transformationnel », qui se définit selon 4 caractéristiques :

- 1- Le leader transformationnel **incarne l'idéalisme**, il suscite l'admiration de ses collaborateurs et la fierté de travailler avec lui. Il transmet également l'idéalisme à travers les valeurs de l'entreprise et la manière dont il définit sa raison d'être.
- 2- Le leader transformationnel est **porteur d'inspiration et de motivation** pour ses collaborateurs, il insuffle une vision positive de l'avenir qui aide ses collaborateurs à dépasser les difficultés et les aléas du quotidien. Il donne et fait confiance.

- 3- Il est aussi **stimulant intellectuellement** de travailler avec un leader transformationnel, car il est capable de remettre en question la manière de travailler et il apporte des perspectives nouvelles sur l'activité et la résolution de problèmes.
- 4- Enfin, le leader transformationnel est à **l'écoute de ses collaborateurs**, de leurs besoins, il reconnaît leurs compétences et a le souci de les faire grandir et progresser.

Le leader doit avoir le courage de se remettre en question, de faire autrement, de perdre (dans un premier temps) le pouvoir, de se sentir parfois dépassé ou illégitime – à la manière d'un petit entrepreneur, qui lève des fonds le matin devant un aéropage de financiers, et s'attèle à la production le soir, qui n'hésite pas à raconter comment il s'est trompé une fois, dix fois, et se réinvente à chaque fois, malgré les épreuves. L'entrepreneur qui décide vite n'a pas d'autre choix que de faire confiance.

Le leadership transformationnel est appelé à continuer à se développer dans le futur car il est en phase avec les besoins des nouvelles générations en matière de style de management. Des études à grande échelle tendent également à montrer que le leadership transformationnel est actuellement le plus efficace pour atteindre le meilleur compromis entre performance financière de l'entreprise et bien-être des collaborateurs.

Enfin, une autre évolution sociodémographique laisse à penser que ce style de leadership va continuer à se développer et à se diffuser : la féminisation du management. Des travaux de recherche ayant montré que les femmes dirigeantes montraient significativement plus de caractéristiques transformationnelles que les hommes dirigeants, l'accession des femmes à des postes de plus en plus élevés en entreprise devrait également contribuer au développement du leadership transformationnel.

2.5.3. Entrepreneuriat

Tout comme pour l'innovation et le management, la révolution numérique permet à l'humain de se libérer de tâches désormais automatisées et de se concentrer sur des actions plus créatrices de valeur telles que l'entrepreneuriat.

Quel est le contexte pour les économies occidentales et notamment la France ?

D'une part, le chômage de masse est une tendance massive en France depuis près de 40 ans. L'ensemble des politiques publiques visent à réduire ce phénomène. Ainsi, un des axes prioritaires pour y répondre consiste à amener les demandeurs d'emploi à créer leur propre activité par la création ou la reprise d'entreprise. De très nombreux dispositifs favorisant cette dynamique ont été mis en place tant au niveau de l'état, des régions, des départements que des municipalités. Ces dispositifs agissent au niveau du soutien financier des créateurs d'entreprise, de la mise en œuvre des fonds d'amorçage ou d'accélération de l'activité ou encore sur l'accompagnement méthodologique et stratégique des porteurs de projet.

D'autre part, les économies de marché conduisent à une concurrence forte ce qui pousse les politiques économiques à soutenir l'innovation et la création de valeur. A cet effet, de nombreuses actions de soutien au développement d'activité sont déployées qu'il s'agisse d'aides publiques ou de stratégies d'entreprises dans le cadre de démarches intrapreneuriales.

Par ailleurs, initié en 2000, le processus de Bologne vise à créer une société du savoir, de la connaissance et de l'innovation. Elle incite les pouvoirs publics des pays membres de la zone euro à intégrer l'esprit d'entreprise dans les connaissances de base à acquérir par tous citoyens pour

vivre dans une société fondée sur le savoir. Celles-ci sont précisées par cette définition de l'éducation à l'entrepreneuriat : « *Un concept élargi de l'enseignement des attitudes et compétences entrepreneuriales, qui englobe le développement de certaines qualités personnelles sans être strictement focalisé sur la création de nouvelles entreprises ; et un concept plus spécifique de formation à la création et à la gestion d'une entreprise* ».

Ainsi le monde académique doit donc être « *en capacité de répondre à la demande sociétale de diffuser un esprit d'entreprendre auprès des jeunes en favorisant le passage à l'acte* ».

Au niveau des écoles d'ingénieurs, le document R&O – Repères et Orientations – de la CTI, Commission des Titres d'Ingénieurs, encourage fortement le développement de capacités en entrepreneuriat voire des parcours complet d'enseignement.

L'ouverture sur l'innovation et la création d'activité ou d'entreprise est assurée par des activités et des réalisations spécifiques concrètes. L'ouverture du futur ingénieur sur l'innovation et la création d'activité ou d'entreprise s'appuie sur le développement d'un état d'esprit, la réalisation d'activités et un processus de formation. Ces démarches doivent encourager la pensée divergente, le droit à l'erreur, la prise de risque, l'exercice de la créativité et de l'esprit critique, la prise en compte du besoin de l'utilisateur et l'apprentissage de l'orientation client, la capitalisation pédagogique des expériences, l'ouverture transdisciplinaire, l'engagement vers l'entrepreneuriat, la curiosité et l'ouverture sur le monde.

Un processus de formation est à mettre en œuvre à deux niveaux :

- 1- d'une part, **une formation générale**, au plus tôt dans le cursus, à tous les élèves ;
- 2- d'autre part, **une possibilité d'approfondissement**.

L'ouverture se concrétise par des activités transverses et des événements spécifiques permettant à tout élève de réaliser un projet personnel ou collectif de création (d'innovation ou d'activité) alliant notamment écoute des besoins, créativité, expérimentations, réalisation d'un business plan.

Un temps disponible suffisant doit être laissé aux élèves pour des travaux collaboratifs ou personnels ; des actions avec des étudiants d'autres filières seront recherchées ; les retours d'expériences des élèves doivent être organisés.

Pour la création d'entreprise, il est possible pour les écoles d'ingénieurs de favoriser l'accès au statut d'étudiant entrepreneur et éventuellement au diplôme national « étudiant entrepreneur » (D2E).

2.5.4. Travail distant

Les outils numériques rendent possible un mode de collaboration global, distant, permettant aux entreprises étendues de décloisonner les projets parfois entre plusieurs continents. La demande est forte de pouvoir travailler en équipe quelle que soit la localisation géographique de ses membres.

Au-delà de la distance, cela pose également la question de la temporalité de la collaboration. Le stockage des informations et des données en ligne ainsi que l'ubiquité des moyens informatiques ouvrent la possibilité de travailler virtuellement de partout. Cependant, la plupart des équipes ressentent toujours le besoin d'aménager des réunions de travail synchrones (en présentiel ou à distance) pour favoriser les échanges et la prise de décision, mais aussi créer ou renforcer le sentiment d'appartenance à l'équipe.

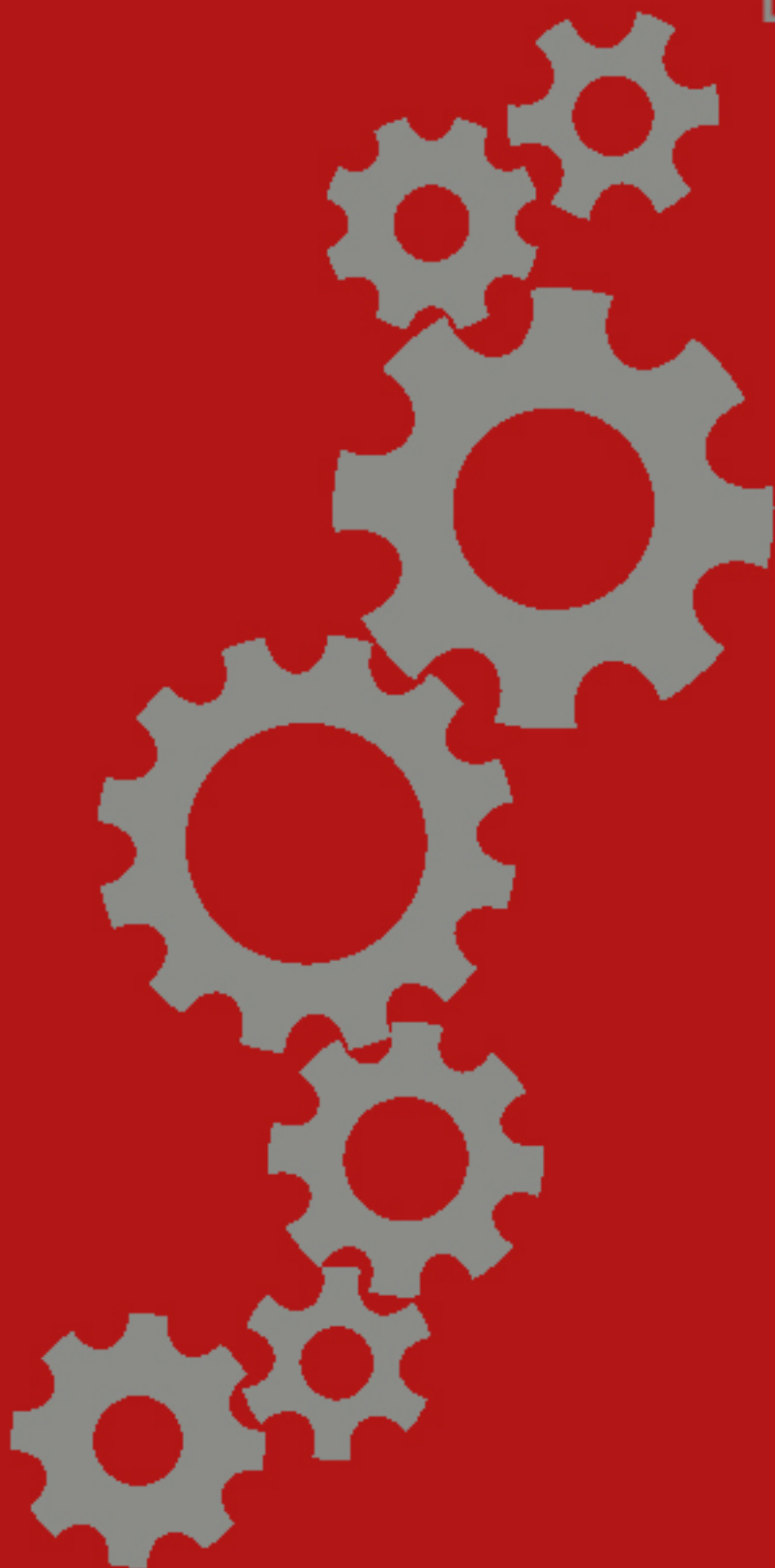
Ce contexte a poussé les chercheurs à étudier l'influence du mode de collaboration présentiel / distant et synchrone / asynchrone sur la dynamique de l'identité sociale des membres du groupe, et sur leur performance dans le travail de groupe. Il s'avère que lors du travail en ligne, les individus ne peuvent faire passer qu'une partie limitée de leur identité personnelle (a fortiori lorsqu'ils interagissent de façon anonyme). Le fait que l'identité personnelle soit moins saillante qu'en face-à-face peut être favorable à l'émergence ou à la saillance de l'identité sociale (se définir en tant que membre d'un groupe plutôt qu'en tant qu'individu). En effet, dans ce cas les collaborateurs accordent moins d'attention aux différences interindividuelles ou aux caractéristiques personnelles et se voient plus facilement comme membres du groupe. Lors du travail à distance, il est donc possible de renforcer le sentiment d'appartenance en mettant en avant les indices d'identité sociale (ex : logo de l'entreprise, nom de l'équipe, nom du projet) et en diminuant les indices d'identité personnelle (ex : nom, photos des membres du groupe).

Les études sur la collaboration en ligne en mode synchrone et asynchrone ont également produit des résultats intéressants, montrant que le niveau d'identification au groupe est similaire en collaboration synchrone et asynchrone. Contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer, le fait de travailler de façon asynchrone ne nuit pas au sentiment d'appartenance au groupe. Par ailleurs, l'appréhension de l'évaluation (phénomène néfaste à la performance) semble être inférieure en collaboration asynchrone.

L'ensemble de ces résultats de recherche laisse présager de perspectives encourageantes pour le travail à distance. Non seulement celui-ci ne nuirait pas à l'identification sociale des membres du groupe, mais des outils de collaboration bien conçus pourraient même favoriser cette identification, au bénéfice de la performance du groupe.

Enfin, la collaboration asynchrone, qui est parfois indispensable lorsque les collaborateurs sont répartis sur l'ensemble du globe, ne détériore pas non plus le sentiment d'appartenance et serait même susceptible de diminuer le stress lié à l'appréhension de l'évaluation.

3. L'EVOLUTION DES METIERS



3. L'ÉVOLUTION DES MÉTIERS

Les concepts d'usine du futur et de ville intelligente et durable modifient donc en profondeur les organisations, les processus, les méthodes de travail. D'une part, les conditions d'exercice de différents métiers de l'industrie et du BTP sont fortement différentes et vont continuer à se transformer. D'autre part, les entreprises ont besoin de pilotes projet qui vont faciliter l'intégration de ces nouveaux process et méthodes et accompagner les changements.

Ainsi, les enjeux pour l'enseignement supérieur sont forts et vont entraîner une révision radicale des méthodes pédagogiques et des syllabus de formation. Les paragraphes suivants présentent une vue globale de l'évolution de quelques métiers phares de l'industrie et un panorama plus large concernant le secteur du BTP. Cette évolution est mise en contexte au regard des enjeux pour les entreprises et des nouvelles compétences associées.

La présentation n'est pas exhaustive, d'autres métiers peuvent être étudiés également.

3.1. La maintenance

Un des métiers les plus impactés par la digitalisation de l'industrie est la maintenance. Celle-ci est au cœur de la performance industrielle car elle permet d'optimiser la production par une maximisation de la disponibilité du moyen.

Cette optimisation est réalisée par le triptyque maintenabilité/disponibilité/fiabilité. Pour cela, il s'agit de réduire le taux de pannes, d'agir uniquement lorsque cela est nécessaire et de diminuer les temps de maintenance.

3.1.1. Enjeux pour le métier

- **Réduire les coûts.** Pour cela, plusieurs leviers existent : en n'intervenant que lorsque cela est nécessaire, en évitant les opérations inutiles et en rendant les opérateurs plus efficaces lors de la maintenance elle-même. D'autres pistes peuvent être également investiguées telles que la gestion optimisée des stocks ou la gestion des obsolescences. La digitalisation des outils de production et des équipements de surveillance, avec notamment l'implantation de capteurs, permet une mise sous contrôle optimisée dans l'optique de réduire les coûts.
- **Accroître la maintenabilité.** Il s'agit ici de faire en sorte que la maintenance du moyen soit toujours possible et surtout optimisée. Pour cela, la maintenance devra être prise en compte dès la conception des systèmes. L'obsolescence des pièces ou leur usure pourront être contrôlées via des capteurs ou des contrôles non destructifs. Le développement de la maintenance prédictive par la captation de données en continue des systèmes à maintenance puis l'analyse de celles-ci par des algorithmes d'intelligence artificielle permet la mise en œuvre d'une maintenance prédictive et conditionnelle particulièrement fiable. Ainsi, le responsable maintenance devra intégrer les technologies du Big Data, du Data Scientist, ainsi que l'intelligence artificielle.

- **Accroître la disponibilité des équipements.** Là encore plusieurs leviers possibles puisqu'il s'agit de veiller à remettre en fonctionnement le plus vite possible l'équipement lors d'une défaillance ainsi que de réduire le taux de pannes.
- **Prévenir les risques professionnels et réduire la pénibilité.** L'utilisation de la réalité virtuelle, des salles d'immersion permettent de prendre en compte les enjeux ergonomiques de la conception. L'utilisation de moyens comme les exosquelettes permettront aussi une réduction de la pénibilité lors des actions de maintenance.

3.1.2. Objectifs pour le métier

Concernant la maintenance, l'impact de l'industrie du futur a plusieurs dimensions :

- mettre en place la maintenance prédictive et conditionnelle ;
- mieux préparer et anticiper les actions de maintenance ;
- prolonger la vie des équipements ;
- assister les opérations de maintenance :
 - mieux former les agents,
 - faciliter les missions des agents de maintenance.

Comme le montre le modèle suivant, les briques technologiques de l'usine du futur apportent des réponses concrètes à ces enjeux et ces objectifs.

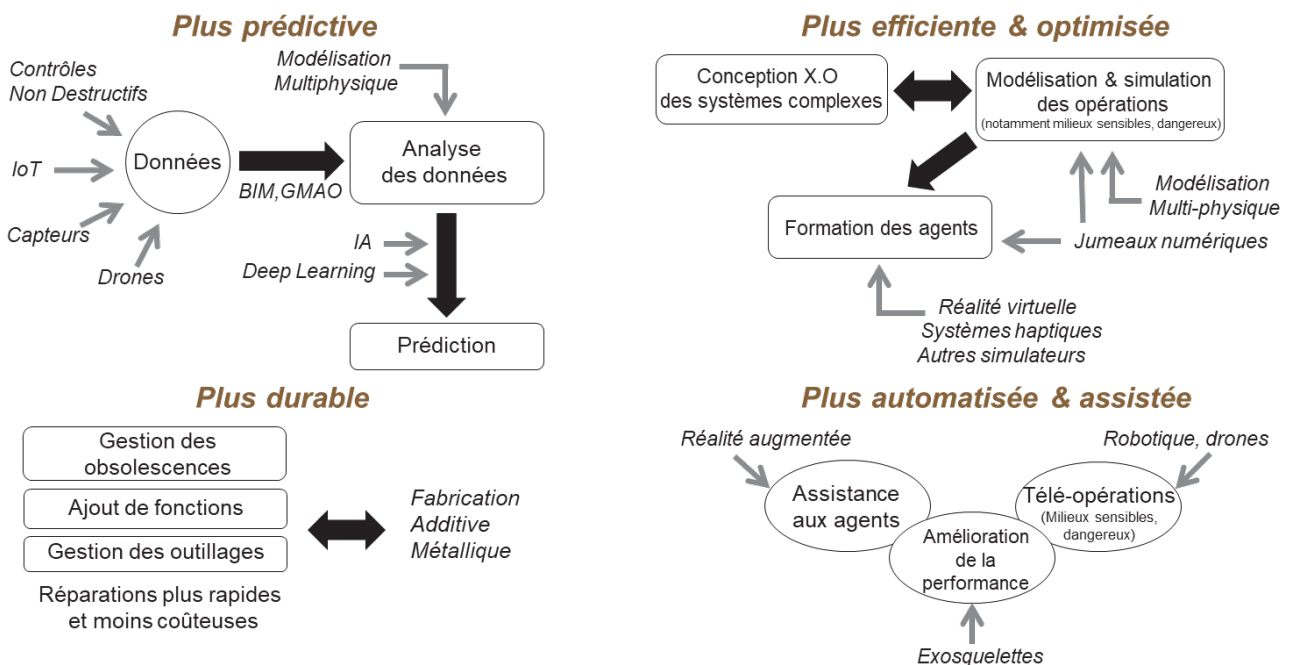


Figure 29- Evolution des métiers de la maintenance

3.1.3. Exemple d'application

Prenons un exemple concret pour illustrer l'impact des technologies sur l'évolution du métier.

Maintenance en milieu sensible et/ou dangereux

On considère comme milieux sensibles ceux pour lesquels les opérateurs doivent réaliser leurs missions dans des conditions difficiles entraînant notamment une pénibilité et/ou des risques pour leur santé ou leur vie. Ce sont par exemple les milieux hyperbares (sous-marins, tunnels, caissons), les environnements hautement inflammables ou explosifs (ATEX), soumis aux rayonnements ionisants (nucléaires, médical...) ou encore exposants à des risques CMR (cancérogène, mutagène et reprotoxiques).

Il est évident que les opérations de maintenance y sont toujours très délicates à opérer tant en phase de préparation que d'exécution. Ainsi, les outils technologiques peuvent être utilisés à de multiples niveaux et moments du processus :

- formation des opérateurs via la réalité virtuelle afin de réduire les risques lors de l'action elle-même tout en optimisant les gestes ;
- préparation de l'opération de maintenance via des simulateurs ;
- assistance méthodologique ou physique de l'opérateur sur le site ;
- téléopération. Il est à noter le développement possible de l'analyse et de la prise de décisions à distance. Un centre de contrôle permet d'assurer, en optimisant, la maintenance à distance de nombreux équipements.

3.2. La conception de systèmes complexes

La globalisation de l'économie et le développement de l'hyperconcurrence au niveau mondial depuis déjà de nombreuses années, le contexte d'évolution climatique, impose aux entreprises d'optimiser leur fonctionnement. Elles doivent donc trouver de nouveaux gisements de productivité afin de maintenir leur compétitivité.

Le métier abordé ici concerne la conception de systèmes complexes industriels et non la conception de produits manufacturiers dits simples à proprement parlé. On parle donc ici des industries automobile, nucléaire, aéronautique, navale...

Ce gisement de production est essentiellement amené par l'utilisation de jumeaux numériques, c'est-à-dire la reproduction numérique d'un système physique. Tels qu'ils ont été définis plus haut, les jumeaux numériques sont des outils informatiques complexes utilisables tant dans les phases de conception que de production et d'exploitation. Dans ce dernier cas, ils peuvent pleinement remplacer les outils habituels de GMAO en augmentant sensiblement la performance de cette dernière par l'adjonction de l'intelligence artificielle.

3.2.1. Enjeux pour le métier

- **Optimiser les coûts de développement** : en réalité cet enjeu est assez évident au regard d'une concurrence de plus en plus mondialisée et d'attentes de plus en plus pressantes des marchés. La réactivité est capitale ; les temps de développement de nouveaux produits ou de nouveaux équipements deviennent alors des enjeux primordiaux. Les 2 points suivants y contribuent fortement. Mais d'une manière générale, l'optimisation va concerner l'ensemble du processus de conception, tant sur le management des équipes projets que des outils mis à leur disposition.
- **Diminuer les temps de conception** : il s'agit ici du premier levier impactant directement le coût de développement. Cela répond également aux attentes du marché. Par exemple, les constructeurs automobiles ont divisé par 2 voire par 3 le temps de développement de leurs voitures de manière à proposer davantage de nouveautés et d'innovations à leur clientèle de plus en plus volatile, tout en gardant une maîtrise des prix proposés. De même, dans de nombreux secteurs, une demande forte de personnalisation est souhaitée. Toutefois, les clients ne peuvent accepter de prolonger leur attente. Parmi les nombreux exemples, on peut noter l'utilisation de maquettes numériques pour les multiples crash tests de l'industrie automobile.
- **Réduire voire supprimer les erreurs de conception** : principal atout du jumeau numérique, celui-ci permet par exemple de modéliser puis tester et simuler les comportements. Ainsi, tout comme l'usage du BIM en BTP, la maquette numérique permet d'anticiper et de trouver des solutions techniques à des erreurs de conception qui n'auraient parfois pu être identifiées qu'au moment de la fabrication.
- **Proposer des solutions innovantes pour le client** : comment remporter des marchés hyperconcurrentiels ? Une des possibilités est de se distinguer par une démarcation forte de son positionnement stratégique. Ainsi, la conception de systèmes ou produits complexes nécessite de modifier en profondeur l'approche de conception grâce à l'innovation, aux nouveaux procédés de fabrication (additive notamment), au management de projet, aux outils numériques.
- **Répondre aux exigences d'ergonomie et de durabilité** : pour illustrer cet aspect nous prendront l'exemple de la conception de lignes de production industrielle. Celles-ci doivent répondre à des contraintes en conception par l'intégration de la dimension HSE. Ainsi, le concepteur doit prendre en compte l'ergonomie du poste de travail et l'adaptation de ce dernier. Enfin, l'usage de cobots amène d'autres considérations (éléments communicants, espace disponible...)

3.2.2. Objectifs pour le métier

Des technologies de l'industrie du futur vont révolutionner la conception des systèmes complexes. Pour cela, les objectifs à prendre en compte sont :

- simuler au maximum avant la réalisation des systèmes ;
- favoriser l'innovation et les méthodes agiles ;
- accroître la fiabilité ;
- améliorer le suivi opérationnel et financier des projets.

Le graphe suivant montre l'articulation des briques technologiques avec l'évolution du processus de conception.

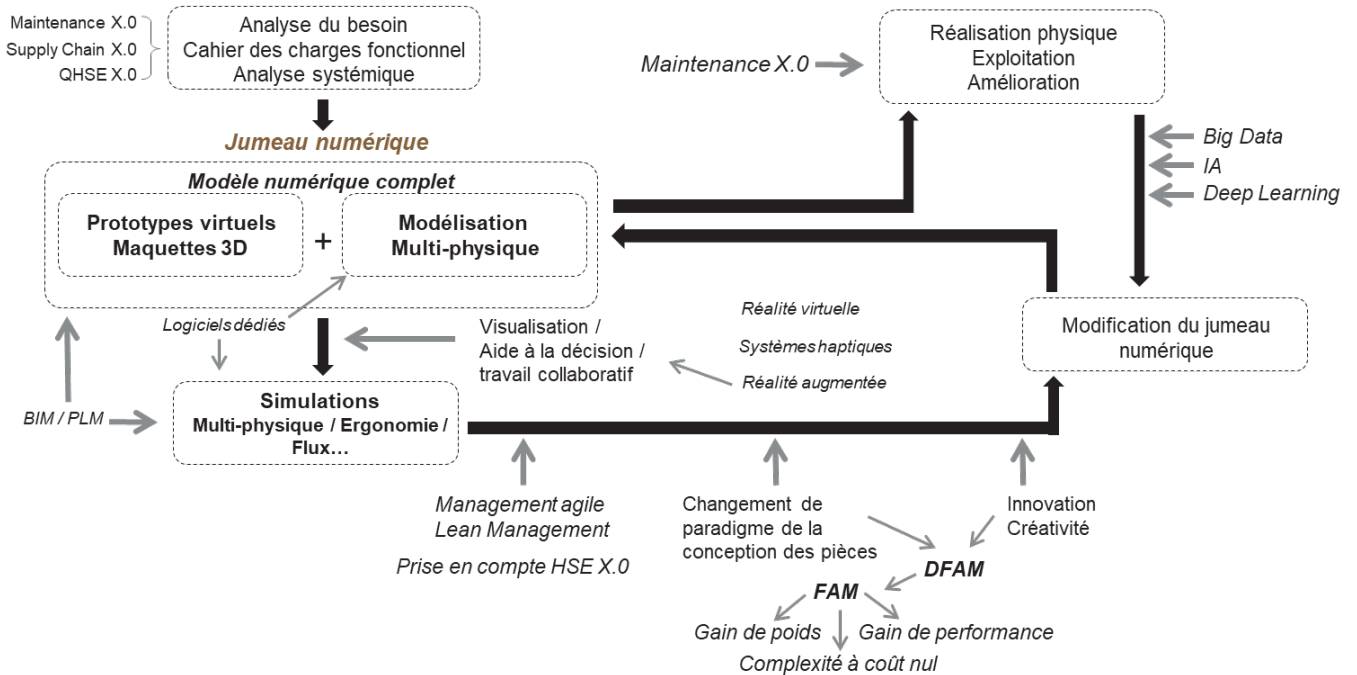


Figure 30- Evolution des métiers liés à la conception de systèmes complexes

Afin d'illustrer concrètement l'utilisation des moyens numériques pour la conception, le lecteur pourra s'intéresser à des cas concrets et vécus en entreprise telles que Alstom Transport dans le cadre de la conception de trains ou de Safran pour la conception de moteurs d'avion.

A une échelle ultime, ce processus est d'ores et déjà celui de l'industrie lourde pour la conception de navires de grand tonnage, civils ou militaires, de centrales de production électrique notamment nucléaire.

Un autre aspect intéressant de l'usage de ces outils numériques dans le cadre de la conception de systèmes complexes, concerne finalement la formation de l'utilisateur final. En effet, le jumeau numérique pourra être exploité en tant que contenu pédagogique pour former les individus : pilotes de ligne, opérateurs, techniciens, agents de maintenance... Cela à coût moindre tout en offrant la possibilité de proposer des scénarios impossibles à réaliser dans la réalité.

Evidemment, pour l'ingénieur, un apprentissage à l'utilisation et/ou au développement de jumeaux numériques devient nécessaire. Ses interlocuteurs changent également. Il devra ou doit déjà être familiarisé à l'intelligence artificielle, ou outils de réalité virtuelle et/ou augmentée...

3.3. La PLM (Project Lifecycle Management)

Le développement des outils numériques permet de décloisonner les fonctions principales de l'entreprise et notamment celle de la conception du produit. La PLM est un ensemble d'outils et de méthodes permettant de prendre en compte l'intégralité du cycle de vie d'un produit.

Les différentes étapes sont les suivantes : conception des cahiers des charges du produit et des services associés, les modes de production, les modes de distribution et de vente, les évolutions éventuelles du produit tout au long de sa vie, le recyclage du produit et son éventuel remplacement.

La transition numérique, avec notamment le développement de progiciels transverses, intégrant chacune des étapes du cycle de vie, permet une optimisation de l'ensemble de ces processus. On peut noter par exemple l'emploi quasi systématique de logiciel de CAO, le déploiement des outils de simulation numérique, l'apparition d'outils liés au « knowledge management ».

Le PLM devient de plus en plus présent dans les entreprises industrielles et demandent des compétences spécifiques. Comme le note l'APEC dans son étude « Tendances Métiers dans l'industrie », le PLM « ne bouleverse pas les métiers existants mais il entraîne des modifications sensibles dans les organisations de travail ».

3.4. Qualité, hygiène, sécurité, environnement

C'est une réalité, la prise en compte du QHSE est une priorité pour l'industrie : ergonomie, adaptation du poste de travail, suppression de la pénibilité, développement durable, satisfaction des parties prenantes. Sur l'aspect hygiène et sécurité, tout particulièrement et en seulement quelques années, la responsabilité pénale du manager ou directeur d'usine est passée de la faute de gestion à l'atteinte morale et/ou physique des personnes. Là encore, certaines technologies liées à l'industrie du futur vont faire fortement évoluer ces métiers.

3.4.1. Enjeux pour le métier

- **Accroître la satisfaction globale des parties prenantes**, au plus près de leurs attentes et besoins, par des systèmes de productions plus fiables, avec des solutions parfaitement cohérentes, par l'amélioration des conditions de travail.
- **Proposer des solutions innovantes pour le client** : permettre de répondre au mieux aux attentes parfois non encore exprimées de ses clients constitue un rêve pour toute l'industrie manufacturière. Or ce rêve n'est plus très loin. En effet la collecte massive de données sur les comportements d'utilisateurs et l'intelligence artificielle permettront de réaliser des systèmes d'aide à la décision particulièrement performants, notamment en prenant en compte tous les aspects QHSE.
- **Réduire voire supprimer les non-conformités** : cœur de l'efficacité en production, les capteurs d'une part et les moyens de contrôle non-destructifs permettent d'améliorer la performance globale par un contrôle en temps réel. Cet enjeu est ainsi au centre de l'amélioration de la performance.

- **Améliorer le poste de travail voire supprimer la pénibilité** : c'est un mouvement général qui s'opère progressivement et de manière continue depuis des millénaires, l'être humain fait en sorte de rendre son travail moins dur tout en accroissant la performance du résultat. Nous aboutissons aujourd'hui à une automatisation extrêmement forte de la production. L'humain est alors tout en partie dispensé ou allégé de ses tâches productives les plus répétitives ou difficiles. Robots, cobots et exosquelettes en sont les briques technologiques essentielles et contribuent à améliorer la performance ou libérer l'humain vers des tâches plus créatives.

3.4.2. Objectifs pour le métier

Les évolutions de l'industrie amènent de nombreux objectifs pour les métiers QHSE. Parmi eux, on peut noter :

- analyser les données des clients ou des opérateurs ;
- déployer les contrôles en cours de production ;
- accroître la fiabilité des systèmes de production ;
- améliorer l'automatisation des postes de travail et leur ergonomie.

Le schéma suivant explicite l'apport des briques technologiques pour répondre aux objectifs cités et les liens avec la conception ou la maintenance. En effet, l'apport de ces briques permet plus que jamais une véritable transversalité entre des métiers qui s'impactent les uns les autres.

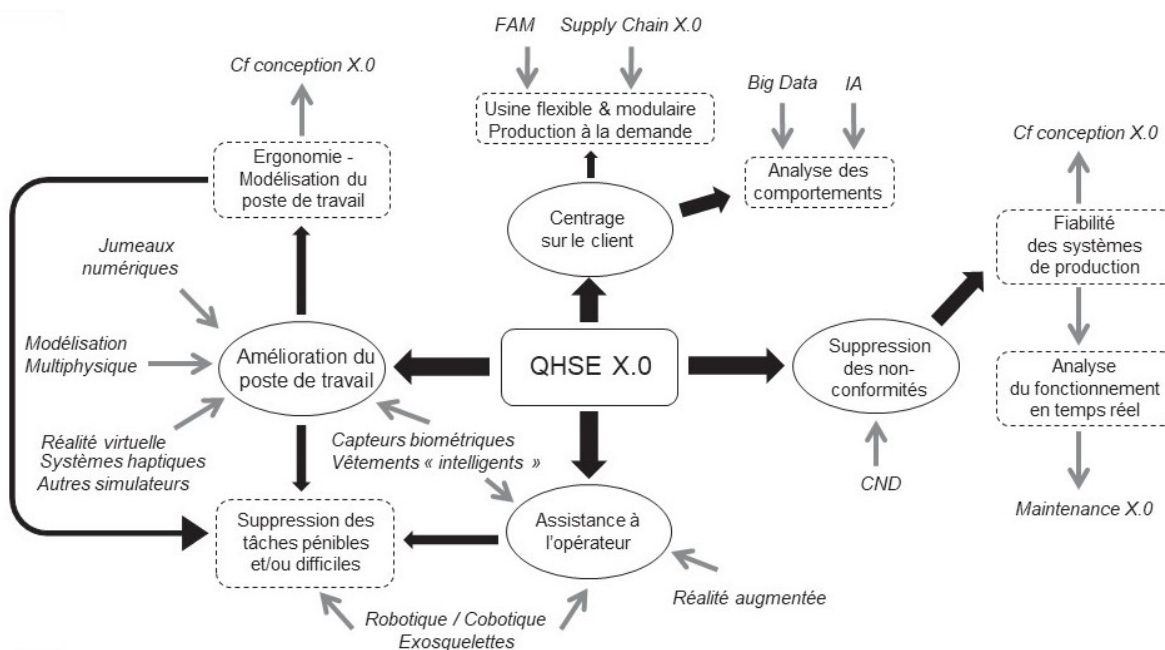


Figure 31- Evolution des métiers de la Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement

3.5. La supply chain

Selon la définition retenue sur www.glossaire-international.com, on appelle Supply chain management (SCM) ou en français Gestion de la chaîne logistique (GCL) la gestion de l'ensemble des opérations liées à la supply chain, c'est-à-dire l'ensemble de la gestion des flux circulant dans l'entreprise et avec son environnement (approvisionnement, livraison, stockage, informations, transactions financières...).

Autrement dit, la supply chain gère la totalité des ressources, moyens, méthodes, outils et techniques destinés à piloter le plus efficacement possible la chaîne globale d'approvisionnement et de livraison d'un produit ou service jusqu'au consommateur final.

3.5.1. Enjeux pour le métier

Nous l'avons vu, le concept d'usine du futur est une démarche à part entière qui vise à améliorer l'efficacité globale sur l'ensemble de la chaîne de valeur et générer une meilleure productivité. Ainsi, la logistique s'en retrouve également modifiée avec pour finalité de tendre vers une production au plus près de la demande des clients tout en optimisant les flux et en minimisant au strict nécessaire les stocks disponibles. Cela sous-entend notamment d'être en capacité de prévoir les besoins de production à venir et d'y répondre précisément. Les principaux enjeux de la supply chain amenés par l'évolution de l'industrie sont :

- **Accroissement de la performance globale** : c'est-à-dire la capacité de livrer au client le bon produit, personnalisé, dans la qualité attendue, dans le délai le plus court possible, quel que soit l'endroit voulu. Dans une perspective de plus long terme, bien que long n'ait que peu de signification, la supply chain sera en capacité de se dispenser des intermédiaires et assurera elle-même le transport au client final.
- **Une supply chain plus souple, plus fonctionnelle et plus prédictible** grâce à une amélioration globale voire automatique de la prise de décision. En cela, l'intelligence artificielle impactera durablement l'ensemble des fonctions de la supply chain.
- **Optimisation de la traçabilité des produits** : il s'agit désormais d'une exigence forte des clients, qui souhaitent avoir l'assurance du respect des pratiques éthiques, de la provenance exacte des matières et du devenir des produits. Une vue précise et détaillée sur l'ensemble du cycle de vie du produit, managé par le PLM, permet désormais d'anticiper une traçabilité maximale de tous les composants d'un produit.
- **Optimisation des coûts** : comme l'ensemble de la chaîne de valeur de l'entreprise, la supply chain n'échappe pas à la nécessité de réduire ses coûts afin de préserver les marges.

3.5.2. Objectifs pour le métier

Placés au cœur des processus industriels, les métiers logistiques sont les premiers impactés par l'industrie du futur. Comme objectifs pour ces métiers, on peut souligner :

- soutenir une production flexible, souple et personnalisée ;
- optimiser les flux et les approvisionnements ;
- connaître en temps réel les stocks et flux ;
- automatiser la prise de décision.

Le modèle ci-dessous présente les apports des briques technologiques, leurs interactions et intérêt pour le métier. D'une manière générale, il s'agit pour la supply chain d'intégrer le plus d'automatisation possible afin d'apporter le maximum de service et de valeur ajoutée pour le client.

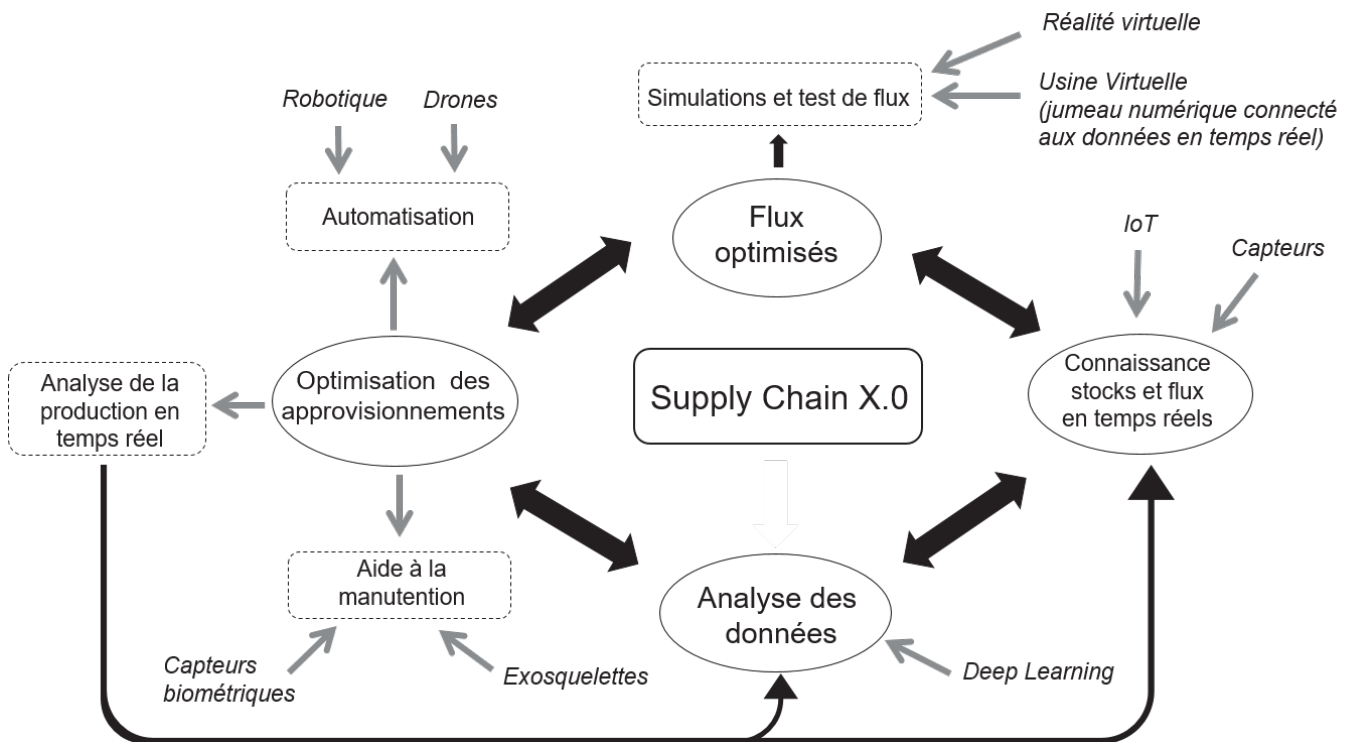


Figure 32- Evolution de la Supply Chain

3.6. Le bâtiment et les travaux publics

Bien que ce livre blanc soit dédié aux concepts d'usine du futur, il apparaît important de s'intéresser également à l'impact de l'usage des nouvelles briques technologiques pour le secteur du BTP. En effet, il y a de fortes similitudes et usages partagés pour l'ensemble des briques technologiques présentées au paragraphe précédent.

3.6.1. Enjeux de la filière [Etude AIF – Juin 2017]

Les enjeux présentés ici sont directement issus du document produit par les experts de l'AIF, Alliance pour l'Industrie du Futur, daté de juin 2017.

- **Développer des produits et services innovants et technologiques :**
 - développement de matériaux innovants (capteurs pour l'optimisation ou l'accélération des chantiers) ;
 - proposition de nouveaux services aux clients et usagers (objets connectés, performance énergétique) ;
 - accélération de la mise sur le marché des innovations (nouvelles méthodes de conception, prototypage).

- **Atteindre l'excellence opérationnelle dans la réalisation des projets :**
 - sécurisation de la conception et des études (conception partagée et collaborative, outils d'aide à la décision) ;
 - efficacité de la chaîne d'approvisionnement (préfabrication de composants, capteurs, supply chain 4.0) ;
 - réduction des temps d'inutilisation des équipements (outils analytiques, capteurs) ;
 - amélioration du suivi opérationnel et financier des projets (plateforme de gestion de projet (BIM) relevés de chantiers (drones), outils d'analyse) ;
 - prévention des risques d'accidents (cobotique, EPI connectés, surveillance des chantiers, exosquelettes) ;
 - transformation agile du business model (open innovation, entrepreneuriat, outils d'analyse).

- **Communication et collaboration au sein de l'écosystème :**
 - fluidification de la collaboration entre les acteurs du chantier ;
 - enrichissement et transmission des données entre chaque phase ;
 - attraction et rétention des meilleurs talents.

3.6.2. Le BIM

La principale évolution pour le domaine du BTP concerne l'adoption du BIM, Building Information Modelling. Celui-ci impacte l'ensemble de cycle de vie du secteur, depuis la conception jusqu'à l'exploitation, ainsi que de nombreux métiers utilisateurs.

Pour rappel, le BIM consiste à réaliser un double numérique complet d'un bâtiment (voire d'un quartier) en y intégrant les données réelles associées (types de matériaux, aspects géométriques...).

Dans le cas d'un usage optimum les gains sont assez nombreux :

- identification d'erreurs de conception, puis résolution de problème ;
- aide à la décision en revue de projet, notamment grâce à la modélisation multi-physique ;
- maîtrise des budgets grâce à une meilleure anticipation puis maîtrise des coûts ;
- amélioration globale du suivi de chantier.

Toutefois le BIM peut sembler contraignant pour les entreprises en ce sens qu'elles doivent collaborer à tous les stades en utilisant un outil unique et en harmonisant pratiques et systèmes informatiques. Ainsi, réaliser un programme immobilier en utilisant le BIM modifie en profondeur les pratiques des entreprises ainsi que leurs systèmes d'informations, avec l'obligation d'utiliser les mêmes solutions logicielles. Le BIM n'est donc en rien anodin tout en étant tout à fait indispensable. C'est pourquoi ce changement d'ampleur doit être accompagné, en particulier en formant massivement les professionnels à son utilisation sans le restreindre à un simple usage logiciel.

A noter enfin que l'exploitation du BIM est étroitement liée à la réalité virtuelle (revue de projet, aide à la décision en phase projet) ainsi qu'à la réalité augmentée (phases de réalisation en suivi de chantier, facility management).



Figure 33- Salle BIM CESI Nanterre

3.6.3. Smart building

L'autre grande révolution pour le domaine du BTP consiste en l'utilisation massive de capteurs et d'objets connectés afin de collecter un nombre croissant de données sur les bâtiments tant en phase de construction que d'exploitation. Le bâtiment connecté devient SMART, l'analyse des données collectées par des intelligences artificielles permet de connaître à tout moment l'état de la consommation énergétique, d'une part, ainsi que l'état de santé du bâtiment, d'autre part. S'ouvrent alors la voie de l'optimisation de la performance énergétique par un pilotage intelligent du bâtiment ainsi que de la maintenance prédictive de ce dernier.



Figure 34- Bâtiment intelligent CESI Nanterre

3.6.4. Evolutions des métiers

Associés à la maquette BIM du bâtiment, tous ces éléments permettent de converger vers un jumeau numérique complet de la structure exploitable pour une optimisation permanente du bâtiment.

Bien que le secteur ne développe pas en tant que tel les technologies associées à la data et à l'intelligence artificielle, il est nécessaire pour les professionnels du BTP de connaître et de maîtriser le potentiel de ces dernières afin de les intégrer et les utiliser au mieux.

Enfin, d'autres évolutions touchent aux processus de construction avec de nouveaux matériaux notamment d'origine écologique ou de nouveaux moyens de fabrication tels que les imprimantes 3D béton. Ces procédés sont intéressants à de multiples égards : rapidité, personnalisation, automatisation... Ils sont au cœur des préoccupations des professionnels du secteur pour apporter des solutions nouvelles flexibles et innovantes à leurs clients et permettent également l'ouverture d'un nouveau marché avec de nouveaux clients comme par exemple la NASA.

Tous ces éléments, qui engendrent une modification très forte des métiers du bâtiment, sont présentés en synthèse dans le graphique suivant.

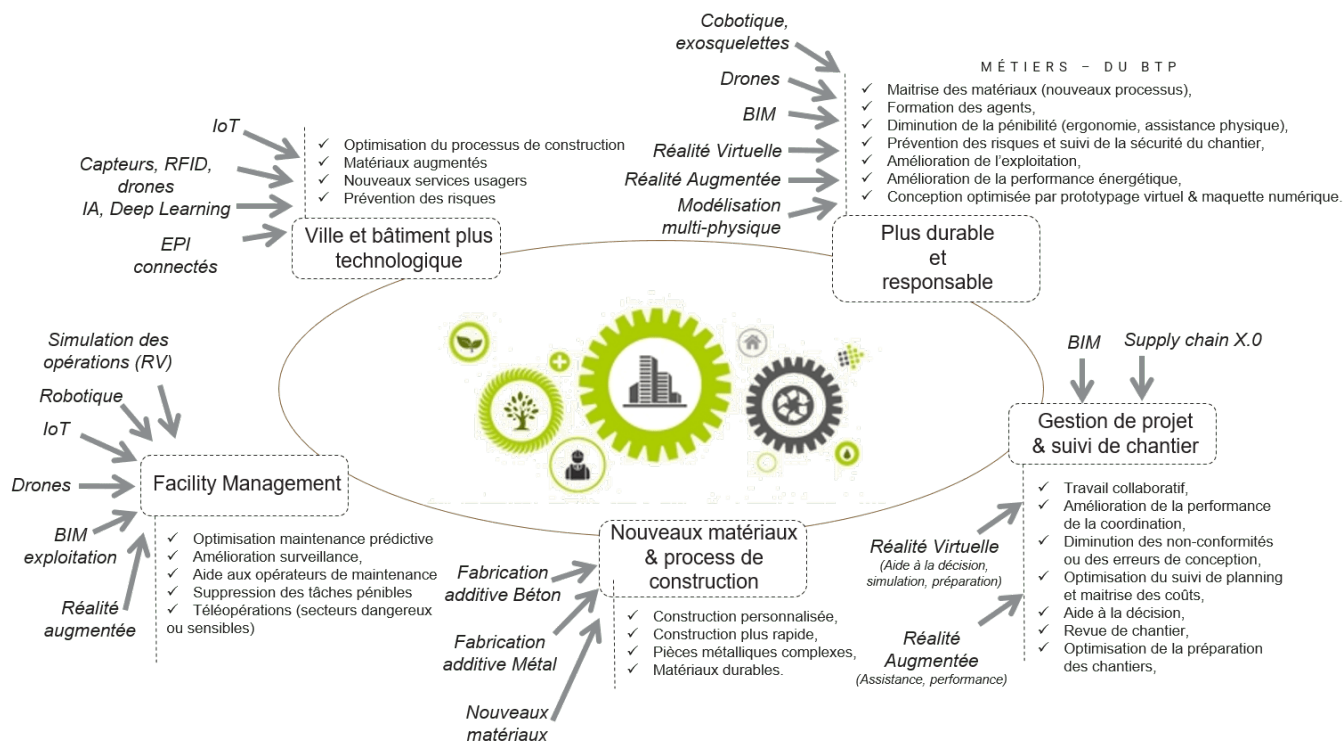


Figure 35- Evolution du domaine BTP

Le diagramme pourrait être décliné de la même manière que les métiers industriels. Le tableau suivant présente quelques usages des briques technologiques sur les métiers du Facility Management et du suivi de chantier.

Brique technologique	Technologie	BTP - Suivi de chantier (et Maintenance travaux neufs)	BTP - Facility Management
Procédés	Fabrication additive	Réalisation d'outillages spécifiques Réalisation de pièces de métallerie (gardes corps, ferronnerie) Réalisation de construction en FA béton	Gestion de l'obsolescence (outillages, pièces métalliques)
	Contrôle non destructif	Contrôle de la performance énergétique	Suivi de la performance énergétique (mesures d'étanchéité, de thermographie)
Modélisation et simulation	Réalité virtuelle	Revue de projet Aide à la décision Préparation chantier (BIM) Exploitation maquette BIM Etude de la pénibilité / ergonomie	Préparation des opérations de maintenance Formation
	Réalité augmentée	Assistance aux compagnons Contrôle de conformité des opérations	Assistance aux opérations de maintenance Visualisation des réseaux fluides
	Jumeau numérique	Préparation de chantier (BIM) Performance du suivi financier (BIM)	GMAO augmentée (BIM connecté aux capteurs et IoT) Mise en œuvre de la maintenance prédictive
	Modélisation multi-physique	Modélisations diverses du comportement des structures (plutôt en phase étude et conception)	Modélisation d'opérations complexes
Numérique	Big Data	Mesures diverses issues de capteurs	Données pour la maintenance prédictive des installations
	Internet des objets	Mesures diverses en cours de chantier (suivi séchage béton, état des matériaux) Mesures diverses en phase exploitation (pathologies)	Mesures diverses en phase exploitation (pathologies / structure...)
	Machine & Deep Learning		Analyse de données pour réaliser des prédictions de maintenance
	Cybersécurité	Protection des données lors de l'utilisation multi corps de métiers de la maquette BIM	Protection des données (bâtiments et individus)
Cybersystèmes	Robotique	Automatisation de tâches (robots constructifs positionnement automatique de parpaings / FA béton)	Téléopérations (milieux difficiles d'accès ou dangereux) Inspections
	Exosquelette	Aide à la manutention Accroissement de la performance des compagnons	Aide à la manutention Accroissement de la performance
	Cobotique	Assistance des compagnons	Assistance des compagnons
	Drones	Topographie des terrains Surveillance chantiers Suivi automatisés Convoyage	Surveillance des pathologies du bâtiment Inspection de maintenance Convoyage

3.7. Les métiers du numérique et de l'informatique

Les briques technologiques de l'usine du futur, ainsi que de la ville intelligente et durable, impactent, nous l'avons vu, un grand nombre de métiers d'ingénieurs de l'industrie et du BTP. Mais pour ces derniers, intégrer dans leurs pratiques l'usage de la réalité virtuelle et augmentée, des jumeaux numériques, des objets connectés ou encore de l'intelligence artificielle, ne signifie pas pour autant d'en maîtriser les aspects purement informatiques.

Ainsi, les ingénieurs et techniciens de ces domaines, devront plus que jamais travailler en étroite collaboration avec les ingénieurs informatiques tout en ayant les bases pour mettre en œuvre ce dialogue.

Plus précisément, les informaticiens de demain (voire d'aujourd'hui) devront s'approprier ces nouvelles briques technologiques, sachant que le Big Data, le SaaS ou le cloud computing sont en quelque sorte déjà derrière nous ou en tout cas d'ores-et-déjà bien intégrés dans les formations. De nouveaux métiers apparaissent ainsi pour répondre à ces besoins émergents :

Le data scientist

Spécialiste de l'analyse des données massives. L'objectif de cet expert, est de permettre d'extraire des informations utiles de l'immense masse de données collectées sur le Web ou via les capteurs et objets connectés. Il s'agit de construire des indicateurs fiables et intelligibles pour l'utilisateur final et de permettre la prise de décision.

L'expert en intelligence artificielle

Il s'agit ici d'un enjeu majeur pour les années à venir. En effet, analyser l'information et aider à la prise de décision est important, mais permettre la prise de décision en autonomie des systèmes informatiques l'est encore plus. On parle donc ici de concepts tels que le machine learning, le Deep Learning, le Deep Reinforcement Learning. Evidemment, cela évoque autant d'espoirs (assistance à l'humain, véhicules autonomes, optimisation des performances énergétiques) que d'inquiétudes légitimes (perte de contrôle laissé aux machines, rôle de l'humain, éthique...).

L'expert en cybersécurité

Ce point revêt trois aspects : la sécurité des systèmes collectant les données, la sécurité des données informatiques en elles-mêmes et la sécurité des programmes d'intelligence exploitant ces données. Dans tous les cas, l'expert en cybersécurité contribue à la protection globale de cette chaîne de valeur en assurant la sécurité à chacun de ces différents niveaux. Il identifie les failles probables et met en place les mesures de protection adaptées. Il est certain que l'ampleur des attaques sera de plus en plus forte au regard de la valeur grandissante de la donnée. Le déploiement massif des cybersystèmes et des machines autonomes contribuera également au succès de ce métier.

Le développeur/animateur en réalité virtuelle / réalité augmentée

Celui-ci est à la confluence de l'innovation, du jeu vidéo, de l'infographie et du développement logiciel. Il permet aux ingénieurs de pouvoir utiliser les jumeaux numériques des systèmes industriels et de les manipuler ou encore d'exploiter les lunettes et tablettes de réalité augmentée. De même il travaille avec les formateurs pour le développement de scénarios de formation en réalité virtuelle.

L'informatique quantique

L'informatique quantique repose sur la physique du même nom en exploitant les phénomènes d'intrication quantique et de superposition. Nous ne détaillerons pas ici ces principes mais on pourra retenir que contrairement à l'informatique classique binaire (suite de 0 et de 1), l'informatique quantique exploite la superposition d'états à la fois 0 et à la fois 1, le q-bit. Cela permettra la réalisation d'ordinateurs surpuissants équivalents à plusieurs milliers voire millions de nos meilleurs ordinateurs fonctionnant en parallèle. Bien évidemment, les algorithmes associés sont radicalement différents et font l'objet depuis plus de 30 ans d'intenses travaux de recherche initiés en 1994 par Peter Shor. Il faut bien comprendre qu'il ne s'agit pas d'un fantasme ou d'une fiction, IBM a annoncé le 10 novembre 2017 la réalisation d'un ordinateur quantique de 50 q-bit ; ce qui en fait déjà un ordinateur extrêmement puissant.

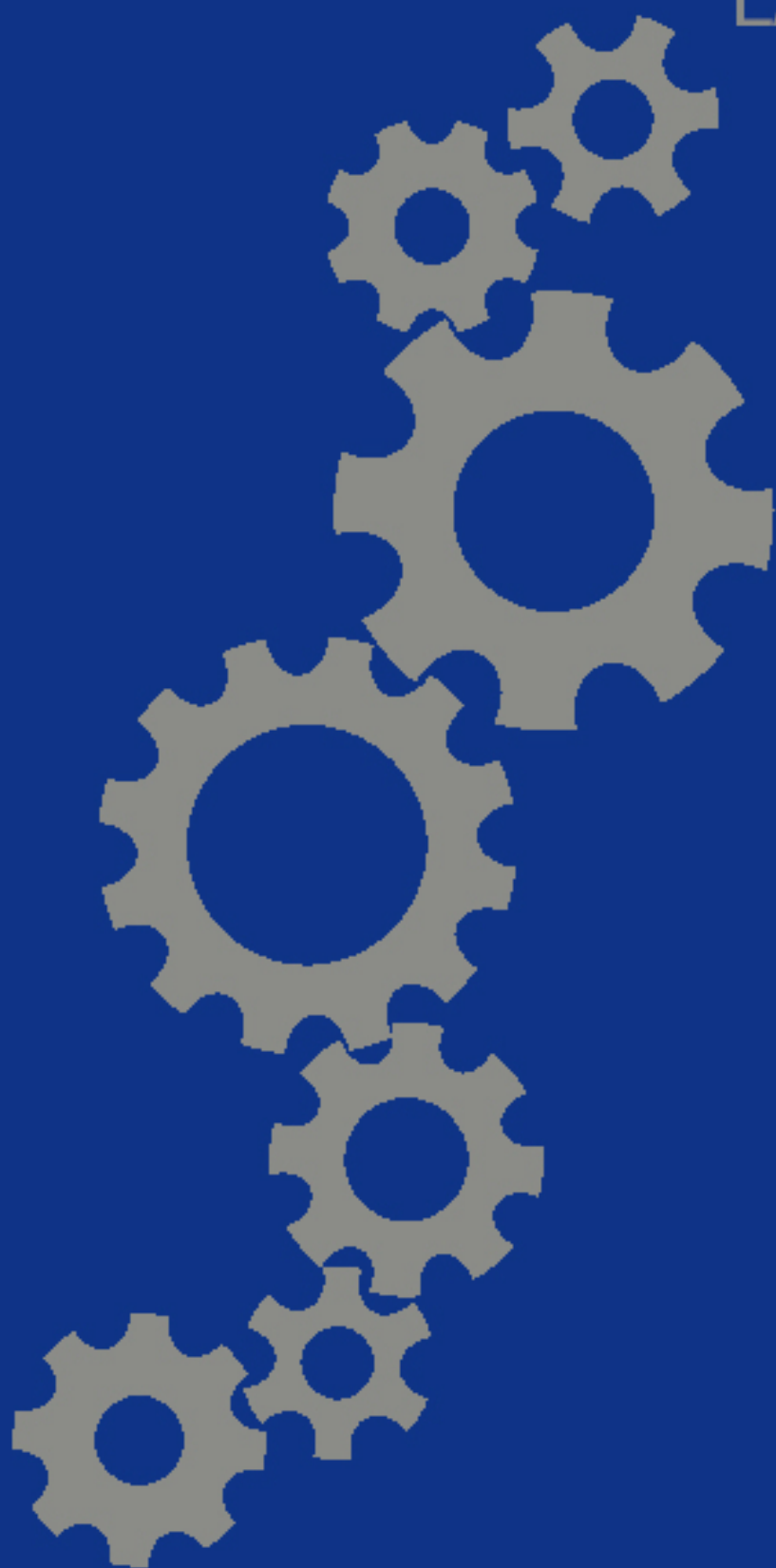
3.8. Synthèse des cas d'usages briques technologiques / métiers

Le tableau suivant présente l'utilisation des briques technologiques dans les principaux secteurs de l'industrie.

Brique technologique	Technologie	Qualité / Environnement	Hygiène / Sécurité	Maintenance	Conception de systèmes industriels (industrie lourde)	Conception produits	Production	Entrepreneuriat / Marketing	Supply Chain	BTP - Suivi de chantier (et Maintenance travaux neufs)	BTP - Facility Management
Procédés	Fabrication additive	Diminution des rebus de fabrication Gain de matière Personnalisation	Prise en compte des aspects ATEX et CMR Compréhension du procédé	Gestion de l'obsolescence Réparation rapide Création d'outilage Ajout de fonction Gain de performance (allègements, réduction assemblages...)	Gain de performance Allègement des pièces Ajout de fonction Ajout de complexité aux pièces	Réalisation de prototypes Gain de performance Allègement des pièces Ajout de fonction Complexité des pièces Gain de réactivité	Personnalisation Fabrication à la demande Réalisation d'outilage Réactivité	Réalisation de prototypes physiques Personnalisation Formes complexes	Gestion des obsolescences	Réalisation d'outillages spécifiques Réalisation de pièces de métallerie (gardes corps, ferronnerie) Réalisation de construction en FA béton	Gestion de l'obsolescence (outillages, pièces métalliques)
Modélisation et simulation	Contrôle non destructif	Monitoring en cours de production Suppression des non-conformités	Contrôle état de fonctionnement des systèmes (prédiction défaillances accidentogènes)	Etat d'usure Maintenance conditionnelle Contrôle permanent	Intégration des CND aux systèmes industriels		Amélioration de la fiabilité Mise en œuvre maintenance prédictive Détection des non conformités Contrôles métrologiques			Contrôle de la performance énergétique (mesures d'étanchéité, de thermographie)	Suivi de la performance énergétique (mesures d'étanchéité, de thermographie)
	Réalité virtuelle	Apprentissage et formation	Amélioration du poste de travail : - diminution de la pénibilité - amélioration ergonomie Prévention des risques	Formation des agents Conception d'une opération Préparation d'une opération Définition des gammes Simulation d'une opération en milieu sensible ou dangereux Amélioration de la maintenabilité	Gain de coûts de conception (moins de prototypes physiques) Diminution temps de conception Amélioration maintenabilité Amélioration ergonomie (postes opérateurs) Aide à la décision Intégration simulations multi-physiques Formation aux gestes et aux opérations	Créativité (changement des paradigmes de conception) Etude du design Etudes ergonomiques Expériences clients Etudes prospectives (immersion dans environnement futuriste)	Etude d'amélioration ergonomie Formation des opérateurs	Aide à la décision Présentation projets clients Modification projet Prototypage virtuel Amélioration produit Expériences clients Tests clients Etudes prospectives (immersion dans environnement futuriste)	Visualisation des simulations	Revue de projet Aide à la décision Préparation chantier (BIM) Exploitation maquette BIM Etude de la plénibilité / ergonomie	Préparation des opérations de maintenance Formation
	Réalité augmentée	Assistance aux agents/opérateurs : - diminution des erreurs - amélioration performance globale	Assistance aux agents : - diminution du stress - diminution taux d'accidents (prévention des risques)	Assistance aux agents (téléopération, gammes) Amélioration perception (vision infrarouge)	Conception collaborative Amélioration de systèmes existants Aide à la décision	Conception collaborative Créativité Amélioration de systèmes existants Aide à la décision	Assistance aux opérateurs Humain augmenté (vision améliorée, vision infrarouge...)	Conseils personnalisés Aide à la projection client Aide à la décision (choix de formes, design couleurs)	Assistance aux opérateurs	Assistance aux compagnons Contrôle de conformité des opérations	Assistance aux opérations de maintenance Visualisation des réseaux fluides
	Jumeau numérique			GMAO augmentée (jumeau connecté au système réel) Etude de la criticité	Simulation globale du système complexe Aide à la conception multi-métiers		Visualisation en temps réel de la ligne Supervision Simulation production		Simulation des flux logistiques	Préparation de chantier (BIM)	GMAO augmentée (BIM connecté aux capteurs et IoT) Mise en œuvre de la maintenance prédictive
	Modélisation multi-physique			Modélisation d'opérations complexes (en milieu sensible ou dangereux) Elaboration de prédictions	Intégration facteurs complexes Simulation multidomaines Prise en compte des interactions Résolutions de problèmes complexes Préalable à la conception du jumeau numérique		Intégration facteurs complexes Simulation multidomaines Prise en compte des interactions Résolutions de problèmes complexes Préalable à la conception du jumeau numérique		Préalable à la simulation des flux logistiques	Modélisations diverses du comportement des structures (plutôt en phase étude et conception)	Modélisation d'opérations complexes

Brique technologique	Technologie	Qualité / Environnement	Hygiène / Sécurité	Maintenance	Conception de systèmes industriels (industrie lourde)	Conception produits	Production	Entrepreneuriat / Marketing	Supply Chain	BTP - Suivi de chantier (et Maintenance travaux neufs)	BTP - Facility Management
Numérique	Big Data		Données physiques des personnes	Données pour la prédiction de maintenance Suivi des arrêts de fonctionnements	Données machines Exploitation retours d'expériences	Données clients Données produits	Traçabilité Etat de fonctionnement	Données clients Données produits Traçabilité de produits Données sur les contreparties	Etat des besoins en temps réel		Données pour la maintenance prédictive des installations
	Internet des objets		Etat de santé d'un collaborateur Suivi physique de la réalisation d'une tâche (pénibilité)	Captation de données	Mesures diverses sur systèmes industriels réels	Captation de données client Captation de données d'utilisation des produits connectés (pour analyse des usages)	Captation de données machines et opérateurs Données de défilement post-production	Captation de données client Captation de données d'utilisation des produits connectés (pour analyse des usages)		Mesures diverses en cours de chantier (suivi séchage béton, état des matériaux) Mesures diverses en phase exploitation (pathologies / structure...)	Mesures diverses en phase exploitation (pathologies / structure...)
	Machine & Deep Learning		Analyse de données collectées pour la modélisation	Analyse de données pour réaliser des prédictions de maintenance	Analyse de données pour amélioration continue des systèmes industriels	Analyse de données clients Prédiction comportements d'achat besoins	Analyse de données de défilement/prédiction des retours de produits en SAV	Analyse de données clients Prédiction comportements d'achat SAV Prédiction business models	Gestion intelligente des approvisionnements		Analyse de données pour réaliser des prédictions de maintenance
	Cybersécurité	Protection de données clients	Protection de données personnelles	Sûreté de fonctionnement	Protection de données confidentielles	Protection de données clients	Sûreté de fonctionnement	Sûreté de données clients	Sûreté de fonctionnement	Sûreté de fonctionnement	
Cybersystèmes	Robotique		Amélioration du poste de travail (ergonomie, pénibilité)	Téléopération en milieu sensible ou dangereux	Intégration robots à ux systèmes industriels	Automatisation de la production Suppression des tâches répétitives Diminution des tâches pénibles Augmentation des temps disponibles de production	Automatisation de tâches positionnement automatique de parpaings / FA béton	Automatisation des approvisionnements	Automatisation des approvisionnements		Téléopérations (milieux difficiles d'accès ou dangereux) inspections
	Exosquelette		Amélioration du poste de travail (ergonomie, pénibilité)	Diminution pénibilité Aide à la manutention	Intégration aux systèmes industriels	Diminution pénibilité Aide à la manutention	Diminution pénibilité Aide à la manutention	Aide à la manutention	Aide à la manutention	Aide à la manutention	Aide à la manutention Accroissement de la performance
	Cobotique		Amélioration du poste de travail (ergonomie, pénibilité)	Assistance aux agents	Intégration aux systèmes industriels	Assistance aux agents	Assistance aux agents				
	Drones		Surveillance (chantier)	Surveillance globale ou secteurs difficilement accessibles					Convoiage	Topographie des terrains Surveillance chantiers Suivi automatisés Convoiage	Surveillance des pathologies du bâtiment Inspection de maintenance Convoiage

4. ADAPTER LA PEDAGOGIE



4. ADAPTER LA PEDAGOGIE

Ce chapitre interroge la manière d'aborder pédagogiquement les concepts de l'industrie du futur. Cela constitue l'enjeu essentiel des écoles d'ingénieur pour répondre au besoin en compétences nouvelles des entreprises. Pour cela, 3 témoignages d'une mise en œuvre concrète tant en termes de vision et d'approche globale qu'en terme d'application : celle de CESI, celle de l'Ecole nationale supérieure d'Arts et Métiers et celle de Manchester Metropolitan University.

4.1. De nouveaux métiers, de nouvelles compétences

Les deux chapitres précédents ont montré la profonde transformation de l'industrie et des métiers associés, et donc l'évolution particulièrement forte des besoins en compétences.

D'une manière générale, une attention spéciale doit être portée aujourd'hui sur le développement des compétences transversales dites soft skills. Sans être exhaustif, on pourra citer la résolution de problème, la communication mais aussi le développement du sens du travail collectif, la prise de décision, le leadership, l'esprit entrepreneurial et l'ouverture d'esprit.

Concernant les compétences liées à l'industrie du futur au niveau des cycles d'ingénieur, nous avons identifié les items suivants :

- **appréhender la complexité des systèmes** par l'analyse systémique et la modélisation multi-physique en utilisant les logiciels ad hoc ;
- **maîtriser les nouveaux moyens de production et de conception**, en particulier la fabrication additive, sur l'ensemble de la chaîne numérique ;
- **mettre au point des systèmes complexes innovants, performants et sûrs** en les simulant et en les optimisant dans le monde virtuel, notamment grâce à l'utilisation de jumeaux numériques ;
- **optimiser la performance industrielle** (qualité, logistique, production, maintenance, exploitation) grâce à l'analyse de données, l'automatisation et la robotique collaborative ;
- **optimiser les coûts** par l'utilisation d'outils d'analyse prédictive ;
- **créer, innover, entreprendre et utiliser les différents moyens de prototypage** ;
- **utiliser les outils de travail collaboratif** et d'optimisation tels que le BIM ou le PLM ou des outils de travail distants ;
- **gérer les projets de manière agile** au plus près des besoins des clients en utilisant les méthodes du Lean Management et du Lean Manufacturing.

4.2. L'exemple de CESI : mise en œuvre en 4 volets

CESI, au regard de son ancrage sectoriel historique sur l'industrie, le BTP, l'informatique et le numérique et enfin le management a eu le souhait de se positionner sur les concepts d'« usine du futur » et sur la « ville intelligente et durable ».

Afin de mettre en œuvre ce positionnement, une stratégie a été élaborée autour de 4 volets :

- 1- **la recherche ;**
- 2- **le déploiement de fablabs et de plateformes technologiques ;**
- 3- **la mise en œuvre de pédagogies innovantes ;**
- 4- **l'évolution des syllabus des formations.**

Pour accompagner ce changement, CESI a répondu à un appel à projet « Partenariats pour la formation professionnelle et l'emploi » du Programme d'investissements d'avenir (PIA), piloté par la Caisse des Dépôts et Consignations pour le compte du Commissariat général à l'investissement.

En 2016, le projet « Développer l'Expertise Future pour l'Industrie et la Construction » ou DEFI&Co a été retenu et est exécuté en partenariat avec de multiples acteurs.

Les partenaires signataires sont, outre le CESI :

- les CFA : CESFA-BTP, CEFIPA ;
- les observatoires : APEC, Institut de la réindustrialisation ;
- les entreprises : AIRBUS, CISCO, COLAS, LA POSTE, AFPOLS, Union Sociale pour l'Habitat.

Le partenariat reste ouvert afin d'inscrire le projet dans les préoccupations des territoires. Au jour de l'acceptation du projet, les partenaires signataires des lettres de soutien étaient les suivants :

- les entreprises : Dassault Systèmes, EDF, ENGIE, FIVES, OGER International ;
- les groupements d'entreprise et pôles de compétitivité : Normandie AeroEspace, Energie Haute-Normandie, Fédération française du Bâtiment Languedoc-Roussillon, Cap Digital, MOVEO, Pôle TES ;
- les partenaires institutionnels : CMQ Strasbourg, Luxemburg Institute for Science and Technology, Rectorat de Rouen, Région Haute Normandie, Région Aquitaine, Communauté urbaine d'Arras, Université des métiers et de l'artisanat Nord-Pas de Calais, Rouen Métropole.
- les CFA : CESFA AGEFA – PME Pays de la Loire, CESFAHN, IRFEDD.

La veille prospective, réalisée par les équipes de LINEACT, laboratoire de recherche de CESI, et les observatoires partenaires, a permis d'identifier 5 domaines dans le champ d'activité de CESI dont les métiers sont à la fois fortement impactés par le numérique, délaissés par les femmes, tout en présentant un fort déficit de compétences (le BIM, la performance énergétique, le PLM, la performance industrielle et le Data Scientist).

4.2.1. La recherche

Le premier axe stratégique de transformation est réalisé grâce au développement d'expertises internes dans le cadre de programmes de recherche ambitieux.

La recherche à CESI est portée par LINEACT son laboratoire de recherche. Déployé sur l'ensemble des campus, LINEACT s'organise autour de 2 thématiques de recherche et 2 domaines applicatifs. Le schéma suivant présente cette organisation.



- 1- « **Apprendre et Innover** » regroupe les sciences cognitives, les sciences sociales et les sciences de gestion, ainsi que les sciences et techniques de la formation et celles de l'innovation. Cette thématique peut s'adresser à des domaines d'application plus larges que ceux de la ville ou l'industrie du futur. Les principaux objectifs scientifiques visés sont la compréhension des effets de l'environnement, et plus particulièrement des situations instrumentées par des objets techniques (plateformes, ateliers de prototypage, systèmes immersifs...) sur les processus d'apprentissage et de créativité.
- 2- « **Ingénierie et outils numériques** » regroupe des compétences dans les domaines des sciences du numérique et des sciences de l'ingénieur. Ses principaux objectifs scientifiques portent sur la modélisation et l'optimisation de systèmes, ainsi que sur le traitement et l'analyse de données et les processus de décision appliqués aux 2 domaines d'application.

Les 2 domaines applicatifs que sont la « ville du futur » et l'« industrie du futur » permettent dès lors de croiser les compétences métiers indispensables à la mise en œuvre de nos projets autour de nos thèmes scientifiques.

Plusieurs thèses ont d'ores et déjà été soutenues et plusieurs sont en cours.

Sur le champ de l'innovation, plusieurs thématiques notables ont été traitées :

- l'évolution des pratiques managériales en entreprise ;
- le dialogue Homme/Machine multimodal dans les véhicules autonomes ;
- l'impact de l'A2P2 sur le développement de l'identité professionnelle de l'ingénieur CESI ;
- la conception universelle ;
- la culture innovation dans les entreprises françaises ;
- le flow collectif dans les activités créatives.

Sur les aspects industriels et technologiques, LINEACT a soutenu des travaux suivants :

- *Le développement de méthodes et outils de réalité augmentée pour l'apprentissage d'activités ou l'assistance à distance d'opérations de maintenance complexes en milieu industriel* [thèse de Vincent Havard soutenue le 9 février 2018] ;
- *L'optimisation multi-objectives d'une infrastructure réseau dédiée aux bâtiments intelligents* [thèse de Mohamed Amin Bénatia, soutenue le 13 décembre 2016] ;
- *La contribution à l'amélioration de la maturité de collaboration des PME avec leur donneur d'ordre à travers la gestion du cycle de vie du produit (PLM)* [thèse de Sara Sadat-Mahdikhah soutenue le 30 novembre 2016] ;
- *La modélisation multi-contraintes d'un système de production flexible* [thèse de José Eloundou en partenariat avec l'INSA de Rouen, soutenue le 11 juillet 2016].

D'autres travaux doctoraux sont actuellement en cours tels que :

- *La reconnaissance de points d'intérêts pour un robot d'inspection dans un environnement contraint et dégradé ;*
- *La formalisation d'un modèle prescriptif de déploiement d'une stratégie de création de valeur optimale. Application au domaine des PME ;*
- *Le Bâtiment Intelligent : Vers une Approche Globale et Systémique Visant l'Autonomie Energétique ;*
- *Le traitement en temps réel distribués dans les systèmes cyber physique industriels ;*
- *L'analyse des données hétérogènes de parcours visiteurs dans des sites touristiques proposant des expériences numériques (RA/RV) ;*
- *La supervision d'un atelier de production flexible constitué de robots collaboratifs mobiles ;*
- *L'analyse prédictive et big data pour l'industrie du futur ;*
- *Les algorithmes et données pour le pilotage énergétique intelligent de bâtiments ;*
- *L'allocation dynamique des tâches et collaboration entre manipulateur mobile et opérateur humain dans un atelier flexible de production.*

Enfin, CESI accentue cette démarche grâce à plusieurs projets de recherche à dimension internationale tels que DEFI&Co, le programme Feder LaVI&Co dont l'objectif est de réaliser des jumeaux numériques de plateformes expérimentales présentées dans le paragraphe suivant, le programme COROT sur l'étude des robots collaboratifs ou encore le projet ANR CREAM sur la conception innovante pour la fabrication additive.

Cet important investissement sur ces programmes de recherche et ces formations doctorales permettent ainsi à CESI de développer son expertise au plus près des besoins des entreprises et de comprendre les attendus pédagogiques en termes de métiers et de compétences.

4.2.2. Les plateformes technologiques

La seconde transformation stratégique repose sur la mise en œuvre de plateformes de recherche et d'enseignement ainsi que de laboratoires dédiés à certaines thématiques.

DEMONSTRATEUR SMART BUILDING

En mars 2017, CESI campus de Nanterre a inauguré sa première plateforme dédiée aux concepts de bâtiment intelligent tels que les systèmes communicants, le pilotage via l'informatique de l'intelligence artificielle, la performance énergétique.

Il est le résultat d'une coopération entre CESI, le CEFIPA et plusieurs industriels du secteur : CISCO, Vinci Energies et sa filiale AXIANS, Philips Lighting et enfin CAPSA pour la partie structure. Le bâtiment d'une surface d'environ 200m² et réalisé en containers maritimes présente plusieurs innovations structurelles validées par les bureaux d'études et de contrôles. En effet, sa conception innovante a dû répondre à différentes contraintes liées à l'environnement du site sur une ancienne friche industrielle et en proximité de la Seine.

Sur le plan technologique, le démonstrateur permet l'étude de différents concepts et technologies mises à disposition par les partenaires industriels. Evolutif, le démonstrateur intègre différents systèmes reposant sur l'hyperconvergence et le POE (Power Over Ethernet).

D'une part, la présence de très nombreux capteurs (température, hygrométrie, détection d'ouverture, infrarouge, de présence, de consommation électrique...) et d'une station météo permettent de collecter un grand nombre de données sur le fonctionnement du bâtiment. D'autre part, grâce à la maîtrise de multiples protocoles de communication, un serveur central peut piloter les différents moyens du bâtiment pour en modifier les ambiances thermiques et lumineuses. Enfin, le comportement des usagers peut y être étudié grâce à des caméras POE, la localisation à 10cm ainsi que les différentes détections de présence.

Les premiers objectifs du démonstrateur sont liés à la recherche qui se déploie sur plusieurs axes :

- sur le domaine de la construction et de l'énergétique :
 - modèles thermiques de la structure,
 - performance énergétique du bâtiment,
 - usage du BIM en phase exploitation du bâtiment,
 - définition des règles de conception de la maquette numérique ;

- sur le domaine du numérique et du digital :
 - gestion de données massives en production continue issues de capteurs (Big Data),
 - programmation des applications de contrôles des équipements,
 - algorithmes de pilotage pour l'intelligence du bâtiment,
 - algorithmes d'apprentissage du bâtiment sur la base des modèles du machine learning mais surtout du Deep Reinforcement Learning ;

- Sur le domaine de l'usage :
 - impact des scénarios de pilotage sur les comportements,
 - confort perçu et performance des usagers,
 - ergonomie,
 - prospective sur les usages futurs,
 - analyse longitudinale de l'acceptation des technologies.

Evidemment, le démonstrateur a une vocation pédagogique grâce aux expérimentations directes qu'il permet. Ainsi, le démonstrateur devient le support pédagogique pour de multiples domaines.

Nous pouvons en particulier citer :

- l'étude de la thermique du bâtiment et la performance énergétique ;
- la manipulation de la maquette numérique ;
- l'étude et la programmation des objets connectés (IoT) et des différents modes de communication de ces derniers ;
- l'étude et la configuration des serveurs, switchs du bâtiment connecté ;
- la gestion massives de données (Big Data, bases de données géantes...) ;
- l'analyse de données et la mise en œuvre d'algorithmes d'intelligence artificielle ;
- la mise en œuvre de modèles de maintenance prédictive.

PLATEFORME USINE DU FUTUR

La première plateforme dédiée à la performance industrielle a été inaugurée le 19 novembre 2014 sur le site de Rouen. La mise en œuvre de cette plateforme a été soutenue par l'Europe, l'État, la Région Haute-Normandie et la Métropole Rouen Normandie.

Cette plateforme Usine du Futur a été dimensionnée pour appuyer le développement de l'activité sur les outils numériques fondés sur la réalité augmentée et la réalité virtuelle, outils d'optimisation de flux, robotique mobile, maintenance, PLM, analyse de données.

Elle est ouverte aux partenaires de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, des établissements du secondaire et l'ensemble des industriels régionaux toutes filières confondues.

PLATEFORME FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE

En complément de la précédente, l'établissement CESI de Nanterre accueillera en juin 2019 une plateforme industrielle dédiée à la fabrication additive métallique.

Tout comme le démonstrateur SMART Building, la plateforme, dite Unité Industrielle Autonome de Fabrication Additive Métallique, sera réalisée en containers maritimes et intégrera l'ensemble de la chaîne de production. Entièrement modulaire, l'unité constituera une preuve de concept de la flexibilité industrielle apportée par ces modes de production. Elle démontrera la possibilité de pouvoir déplacer le moyen au plus près du besoin industriel.

Ainsi plusieurs technologies et matériaux seront accessibles pour la recherche et la formation.

L'unité permettra de déployer de vastes programmes de formation qui aborderont le sujet sous différents angles visant l'acquisition de compétences telles que :

- l'identification des 7 familles de fabrication additive ;
- l'intégration industrielle de ce nouveau moyen de production ;
- la maîtrise des risques HSE associés à l'usage des poudres métalliques ;
- la conception innovante pour la fabrication additive ;
- la réalisation de pièces ;
- la réalisation des post-traitements et contrôles de fabrication.

Au-delà de la FAM, cette plateforme permettra une mise pratique directe des aspects QHSE, risques industriels, flux et process de production, simulation... Et donc constitue un terrain d'expérimentation très vaste et de grand intérêt pour les étudiants et apprentis. Le démonstrateur sera donc l'objet de la réalisation d'études de cas pratiques intégrées aux nouveaux éléments de programme dont les lignes directrices sont présentées au paragraphe suivant.

PLATEFORMES VIRTUELLES, JUMEUX NUMERIQUES

CESI est un campus d'enseignement supérieur présent sur 25 sites. La gouvernance étant unique et nationale, les diplômes sont eux-mêmes déployés de manière uniforme pour garantir l'unicité de ceux-ci.

Toutefois les plateformes technologiques ne sont déployées que sur les sites CESI de Rouen et de Nanterre. CESI a donc décidé de doubler ces plateformes par la réalisation de leur double virtuel ou jumeau numérique.

Ainsi un double objectif est visé :

- Premièrement, il s'agit de permettre à l'ensemble des étudiants de CESI de pouvoir accéder à ces plateformes technologiques quel que soit leur site de formation,
- Deuxièmement, CESI exploite l'opportunité de mettre à disposition de ses étudiants des jumeaux numériques. Ainsi ils seront à la fois familiarisés avec ces concepts innovants et incontournables de l'industrie et auront la possibilité de pouvoir les manipuler dans le cadre de modélisations et de simulations avancées.

Ces jumeaux numériques sont aussi l'occasion de pouvoir utiliser et manipuler les logiciels de création numérique associés.

FABLABS & LEARNING LABS, POUR LE PROTOTYPAGE, LA CREATIVITE ET L'INNOVATION

CESI met en œuvre depuis près de 4 ans une pédagogie active innovante permettant l'acquisition de compétences transversales et adaptée aux publics de l'ère numérique. Cette pédagogie est détaillée au paragraphe suivant.

Dans ce cadre, CESI a développé plusieurs FabLab permettant de concrétiser les projets pédagogiques réalisés. Véritables laboratoires de prototypage rapides, ils permettent de mettre des moyens numériques de haute performance à disposition des étudiants. On y trouve donc des imprimantes 3D de différentes technologies et pour différents matériaux (Polymères, composites, métaux), des découpes lasers, des cartes de prototypage électronique telles que Arduino et Raspberry, des scanners professionnels à haute résolution, ou encore des casques de réalité virtuelle et des lunettes de réalité augmentée et enfin des robots et des drones.

Ces fablabs permettant de prototyper tout type d'objets, participent au processus d'innovation et de créativité. Ils permettent l'expérimentation et sensibilisent les étudiants aux outils numériques.

4.2.3. Pédagogies innovantes

Les transformations amenées par les évolutions technologiques impactent l'intégralité de la société. Le numérique a changé nos vies quotidiennes. La formation initiale et la formation tout au long de la vie professionnelle deviennent des enjeux majeurs pour accompagner tous les salariés, actuels et futurs, dans cette transformation. Dès lors, il semble évident que les méthodes d'enseignement et de formation doivent aussi évoluer.

Le rapport « Vers une société apprenante » remis au ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche en mars 2017, invoque une remise en question de la façon d'enseigner en se basant sur de nombreuses études. Dans un monde en perpétuel mouvement, ce rapport prône le passage à une pédagogie active où l'apprenant est au centre de son projet d'apprentissage. De nombreuses technologies que nous emploierons demain nous sont encore inconnues. Le flux d'informations que nous devons gérer explose.

La pédagogie devient alors dynamique. Le rapport la définit comme suit :

« Apprendre à apprendre, à interroger et interpréter, plutôt qu'à consommer naïvement les informations disponibles, est sans doute l'enjeu majeur de l'éducation aujourd'hui. Dans cette perspective, la fonction du maître, du formateur ou de l'éducateur, passe du professeur ex cathedra qui transmet un contenu plus ou moins figé de connaissances à celle d'un guide ou d'un mentor qui oriente et accompagne, avec sollicitude, bienveillance et rigueur, le cheminement de l'apprenant et l'aide à progresser. ».

Des publics apprenants de plus en plus hétérogènes

La transition numérique influe sur les modes d'apprentissage ainsi que sur les compétences à acquérir. La fracture générationnelle semble s'amplifier mais il serait simpliste de scinder les apprenants en deux groupes aux réflexes antagonistes : les « Digital natives » et les « Non Digital natives ». En effet, les diversités sociologiques présentes dans nos sociétés entraînent des rapports à la communication, à l'autorité, à l'entreprise très diversifiés.

Ce morcellement du public oblige les institutions de formations (écoles, universités...) à faire évoluer leur pédagogie. La pédagogie nécessaire pour accompagner le développement de l'industrie du futur doit alors prendre en compte cette diversité du public où chacun va à son rythme, part d'un socle différent pour aboutir à l'acquisition des compétences visées.

Le cas de l'A2P2, pédagogie active à CESI Ecole d'ingénieurs

CESI Ecole d'Ingénieurs a déployé pour la première année en 2015, sur la formation d'ingénieur généraliste et la spécialité BTP, une nouvelle pédagogie baptisée A2P2, Apprentissage Actif par Problèmes et Projets. Ces formations ont la particularité de se faire par la voie de l'apprentissage, alternant période à l'école et en entreprise sur les 3 années de la scolarité. Cette pédagogie entend répondre à la fois aux enjeux suscités par l'évolution de l'entreprise et l'évolution des différents publics apprenants.

Une nécessaire évolution de la méthode pédagogique de l'école

CESI Ecole d'Ingénieurs a développé en 2003, l'exia.CESI, école d'ingénieurs spécialité informatique, dont la pédagogie était basée sur le PBL, Problem Based Learning. Développée en collaboration avec l'Université du Québec à Montréal, cette pédagogie PBL de l'exia.CESI s'appuie sur le fonctionnement de l'entreprise et est particulièrement adaptée au programme en alternance.

Cette pédagogie dynamique permet aux élèves d'anticiper les changements, manager des projets complexes en intégrant les paramètres scientifique, technique et humain. Elle est basée sur 4 principes fondamentaux :

1. **L'école fonctionne comme une entreprise** tant au niveau de l'organisation, de la formation que du professionnalisme attendu chez les élèves ingénieurs.
2. Les pédagogies actives utilisées s'appuient sur **l'apprentissage par problèmes et projets** proches des centres d'intérêts des élèves.
3. On n'apprend qu'**en pratiquant au-delà des connaissances**, l'école d'ingénieurs spécialité informatique développe les compétences et la capacité à agir des élèves ingénieurs.
4. La formation est centrée sur le **projet professionnel de chaque élève ingénieur**. Il doit lui permettre de mettre en perspective l'utilité de ses acquisitions.

Fort de cette première expérience, CESI Ecole d'Ingénieurs a déployé sur l'ensemble de ses formations d'ingénieurs en apprentissage, une pédagogie active : l'A2P2. Cette pédagogie place l'élève au centre de sa formation, lui permettant d'apprendre à apprendre.

La méthode

L'A2P2 est une approche pédagogique qui se rapproche du mode de fonctionnement de l'ingénieur en entreprise. Les étudiants vont travailler à la résolution d'une problématique réelle posée par un projet, et ce, en groupe coopératif de 6 personnes. Cette taille de groupe est intéressante à titre pédagogique car elle va permettre de favoriser la dynamique de groupe, les échanges de points de vue, le débat, la controverse, l'organisation nécessaire du travail d'équipe, tout en limitant le nombre d'interactions « entropiques » entre les membres.

Le projet pose une problématique réelle, proche des situations vécues en entreprise, et au contenu pluridisciplinaire. Pour la traiter, les élèves doivent réaliser des apprentissages disciplinaires, qui sont ensuite appliqués au projet, en vue de résoudre les différents problèmes qui apparaissent. Le projet est l'occasion privilégiée pour intégrer des connaissances, des méthodes et des outils en provenance de plusieurs disciplines du cursus et permet d'établir des liens entre des matières souvent apprises séparément.

Un projet A2P2 est une succession d'étapes limitées dans le temps, jalonnées par des livrables intermédiaires et débouchant sur la réalisation et la livraison d'un produit répondant à un besoin.

Ce projet se décompose en 3 phases principales.

1- une **phase de lancement**, lors de laquelle les élèves doivent se définir des rôles :

Animateur

Il gère les étapes, favorise le consensus sur le plan des discussions, suscite la participation, régule les interactions, fait expliquer une controverse et ramène au besoin ceux qui divergent vers la cible.

Scribe

Il garde une trace écrite (enregistrée sous forme numérique) de ce qui s'est déroulé et échangé. Il fait un compte rendu synthétique, il sauvegarde les documents et assure leur traçabilité (origine). Il gère un espace de stockage numérique à disposition du groupe.

Secrétaire

Il suit les discussions et inscrit au tableau ou sur l'écran les éléments nouveaux que lui indiquent ses collègues. Il inscrit les opinions du groupe et non son interprétation personnelle. Il efface le superflu, regroupe, met en évidence. Il veille à la rigueur de ce qu'il écrit (termes corrects, unités, différencie vecteur/scalaire, etc.), au besoin le groupe corrige.

Gestionnaire

Il rappelle le passage du temps, s'assure que l'on ne déborde pas dans les discussions et que le temps est utilisé correctement en vue de réaliser les étapes nécessaires. Il est aussi chargé de la logistique du groupe.

La première étape du travail de groupe est de prendre connaissance de l'énoncé du projet, de discuter le besoin et le reformuler. Le groupe reçoit également le synoptique du projet et doit identifier l'ensemble des livrables demandés à l'issue du projet.

2- Lors de la **phase de réalisation**, les élèves réalisent une succession d'itérations, PDCA « PLAN – DO – CHECK – ACT » qui mènent progressivement aux apprentissages visés et aux produits finaux. Cette phase peut durer de 1 à 5 semaines.

Au fil du projet, les boucles combinent 2 finalités :

- d'une part, des apprentissages disciplinaires ;
- d'autre part, des contributions au projet sous forme de livrables intermédiaires qui vont contribuer au produit final du projet.

Une boucle PDCA d'apprentissage vise à produire : des définitions, le choix d'une méthode, un schéma conceptuel, une démonstration scientifique, une analyse, un raisonnement, etc.

Après le dernier PDCA, c'est la phase de clôture, qui dure une journée.

Les étudiants doivent passer une soutenance lors de laquelle ils présenteront le travail réalisé sous une forme appropriée. Ils devront ensuite répondre aux questions des membres du jury et faire la preuve de leurs apprentissages.

- 3- la **phase finale d'un projet A2P2** porte sur les bilans et retours d'expérience individuels et collectifs. Le bilan permet à l'élève d'effectuer un autodiagnostic précis, de tirer des conclusions synthétiques et ciblées et de formuler des recommandations / décisions pour progresser.



Figure 36- Salle pédagogique A2P2 CESI Nanterre

Les briques pédagogiques

Si les productions sont collectives, les apprentissages sont individuels : les deux faisant l'objet d'évaluations. Les apprentissages disciplinaires sont donc réalisés de différentes façons.

Tout au long du projet, les étudiants reçoivent par le biais de leur plateforme pédagogique des ressources pédagogiques (vidéos, ouvrages de référence, bibliographie...) qu'ils devront s'approprier et sur lesquelles ils devront s'appuyer pour réaliser les livrables.

D'autres activités sont planifiées par l'équipe pédagogique. Les Séquences d'Apprentissage Modulaire (SAM) sont proposées à des moments précis dans la progression du projet, apportant des éléments permettant de répondre à un questionnement bloquant. C'est une activité limitée dans le temps (maximum 1h30) et animée par un expert du champ disciplinaire dont l'objectif n'est pas de délivrer un savoir théorique général, mais d'apporter du contenu contextualisé en répondant à des questions spécifiques préalablement soumises par les élèves.

Selon les objectifs d'apprentissage visés, les SAM peuvent également prendre la forme de travaux dirigés ou de travaux pratiques.

Une évaluation des savoirs disciplinaires est organisée de manière hebdomadaire, c'est le Contrôle Continu en Temps Limité (CCTL). Il s'agit d'une évaluation synchronisée nationalement sur l'ensemble des centres, permettant à l'équipe pédagogique un suivi régulier des acquisitions.

4.2.4. De la compétence au syllabus

Le dernier volet et non moins le plus important consiste à intégrer l'ensemble de ces concepts et dispositions à la formation elle-même afin de viser l'acquisition de ces nouvelles compétences. Cela est réalisé à différents niveaux depuis la vulgarisation et la sensibilisation jusqu'à la maîtrise complète.

Le paragraphe précédent a présenté l'approche pédagogique originale de CESI. Entièrement déployée sous la forme de projets multidisciplinaires et transversaux, elle permet d'aborder l'ensemble des concepts de l'Usine du Futur autour de cas concrets. Les situations proposées peuvent avoir été virtualisées pour une meilleure immersion sous la forme de jumeaux numériques ou d'expériences 3D. Les étudiants sont dès lors amenés à s'approprier les méthodologies du Lean, les méthodes d'optimisation de la production, la maintenance prédictive ou encore les logiques de robotisation et d'automatisation des usines.

Evidemment les aspects humains et sociaux ne sont pas oubliés afin qu'ils puissent prendre conscience de l'accompagnement au changement nécessaire lié à la transformation numérique. Le projet menant à la réalisation d'un prototype ou preuve de concept amène les étudiants à utiliser les plateformes technologiques d'une part et les outils numériques des FabLab d'autre part. Ainsi, ils intègrent progressivement les différentes briques technologiques telles que nous les avons présentées au chapitre 2.

A noter également que l'ensemble des cycles ingénieurs proposent un projet dédié à l'innovation et aux méthodes de créativité.

Au-delà des concepts généraux de l'Usine de Futur abordés dans le cycle général, des parcours experts peuvent être choisis sous forme d'option par les étudiants. 33 options de près de 6 semaines permettent d'acquérir des compétences approfondies sur la Fabrication Additive Métallique, la Maintenance 4.0, la réalité virtuelle et augmentée, l'analyse de donnée mais aussi l'innovation et l'entrepreneuriat.

Cette transformation des formations de CESI, en partie soutenue par le projet DEFI&Co, se poursuit et évoluera en fonction de l'arrivée de nouvelles technologies.

4.3. L'exemple de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers : un lieu de construction unique de la connaissance et des compétences de l'acteur de l'industrie du futur

L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Arts et Métiers) a été créée en 1780 à l'aube de la première révolution industrielle pour former des jeunes capables « d'allier l'habileté de la main (le métier) à l'intelligence des sciences (les Arts) » selon les termes de son fondateur, le Duc de Laroche-foucault-Liancourt. Créée pour l'Industrie, Arts et Métiers a fait évoluer – tout au long de son histoire – son offre de formation au rythme des besoins des entreprises. D'abord consacré au génie mécanique, l'école s'est ensuite ouverte au génie énergétique, enjeu prioritaire de la seconde révolution industrielle puis au génie industriel au moment de la troisième révolution industrielle. Mais fidèle à ce principe fondateur de confrontation des sciences à la réalité pragmatique du métier, l'école a toujours veillé à former ses étudiants en les mettant en situation réelle tout au long de leur cursus de formation.

En résumé, le modèle de formation Arts et Métiers repose sur un juste équilibre entre acquisition de connaissances scientifiques théoriques et mises en œuvre expérimentales en situations réelles sur des plateformes technologiques de niveau industriel. Ce schéma porte l'ensemble de l'activité de l'établissement tant au plan de la formation que de la recherche permettant ainsi une boucle rétroactive amenant la mise en œuvre de connaissances en situation concrète et l'enrichissement des savoirs, savoir-faire et savoir-être existants. C'est sur ce modèle que repose la formation à et par la recherche à Arts et Métiers, les plateformes technologiques devenant des lieux de rencontre des étudiants Arts et Métiers avec les 14 laboratoires de recherche de l'établissement.

Aujourd'hui, c'est dans la même logique qu'Arts et Métiers approfondie son modèle de formation pour prendre en compte les enjeux liés à la quatrième révolution industrielle naissante. L'établissement a été l'un des 2 établissements d'enseignement supérieur et de recherche membre fondateur de l'Alliance pour l'Industrie du futur.

Au contact des problématiques nées de cette nouvelle révolution industrielle, l'établissement travaille à enrichir son modèle de formation en faisant du digital un outil permettant la communication en temps instantané entre le modèle du réel et le modèle numérique pour améliorer les performances de la chaîne de production.

En outre, sur la base de ces acquis, Arts et Métiers veut renforcer son adossement à l'économie réelle pour enrichir son modèle de formation. En ce sens, il entend aujourd'hui se positionner comme un acteur économique durable contribuant par la spécificité de ses métiers (formation / recherche / transfert) au développement des entreprises nécessaires à relever les défis imposés par la quatrième révolution industrielle.

C'est dans cette logique qu'Arts et Métiers travaille aujourd'hui à l'émergence, avec ses campus et son environnement proche, d'écosystèmes de croissance propices au développement économique durable des territoires. Pour atteindre cet objectif, l'établissement œuvre à fédérer sur chacun de ses sites un ensemble d'activités et de moyens technologiques disponibles, à l'échelle du territoire, pour créer un effet d'attractivité sur l'ensemble de la filière technologique de formation et vis-à-vis des secteurs professionnels concernés.

4.3.1. Un paradigme de formation articulé autour du triptyque Homme/Réel/Digital

Le modèle de formation Arts et Métiers a pour objectifs de doter l'acteur de l'industrie du futur des connaissances et compétences nécessaires à relever les défis imposés par la quatrième révolution industrielle. Ces connaissances et compétences, regroupées en quatre blocs, sont inspirées de l'initiative CDIO (<http://www.cdio.org/>) afin de trouver un écho international.

Bloc 1 - Connaissances scientifiques et techniques, raisonnement et outils associés

Bloc 2 - Compétences personnelles et professionnelles

Bloc 3 - Compétences interpersonnelles : travail d'équipe et communication

Bloc 4 - Activités de l'acteur de l'industrie du futur dans leurs contextes

Fidèle à ses principes fondateurs, le modèle de formation Arts et Métiers revendique que connaissances et compétences ne peuvent être acquises qu'au contact du réel (plateformes technologiques, groupes humains, pratiques de l'entreprise...), espace nécessaire de construction optimale de la connaissance et de la compétence.

Dans ce modèle, la confrontation au réel se fait au travers d'une implication directe – tout au long de leur formation – des étudiants Arts et Métiers sur les plateformes technologiques de l'établissement. Ces plateformes sont développées en lien étroit entre les laboratoires de recherche de l'établissement et les entreprises pour répondre à des défis technologiques qui constituent des verrous à lever dans l'optique « Industrie du futur ». Cette approche permet de faire des plateformes des lieux de rencontre entre l'économie réelle (via l'association d'entreprises), la recherche technologique (par le biais des laboratoires de recherche) et la formation académique (en impliquant au travers d'activités pédagogiques variées les étudiants en formation). Cet outil, qui constitue une spécificité identitaire d'Arts et Métiers, permet une confrontation au réel à la fois de la recherche et de la formation. Il permet une prise de conscience par les étudiants des enjeux industriels qui sont autant de contraintes dans la mise en œuvre des savoirs qu'ils acquièrent dans leur formation.

Le digital est aujourd'hui un outil incontournable de l'acteur de l'industrie, nécessaire d'une part à l'innovation en le mettant en interaction avec le réel (réalité augmentée, Big data et intelligence artificielle...) et d'autre part à la capacité de dynamiser la performance de l'entreprise.

L'établissement travaille donc à présent à l'acquisition par les étudiants de nouvelles compétences liées à l'usage du numérique dans les métiers de l'industrie. Il s'agit ici en particulier de travailler à l'utilisation d'outils permettant une digitalisation du réel associée aux nouvelles technologies du digital permettant d'assurer une continuité numérique sur l'ensemble du cycle de vie des produits et des systèmes (créer, concevoir, mettre en œuvre, exploiter).

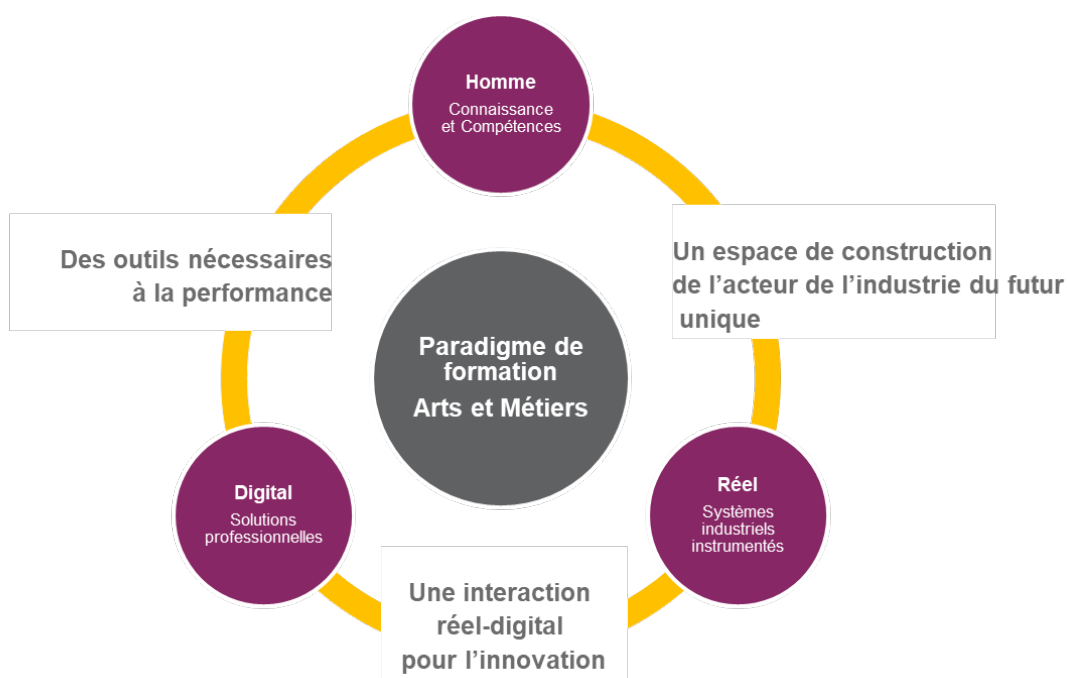


Figure 37- Paradigme de formation Arts et Métiers en réponse aux défis imposés par la quatrième révolution industrielle.

4.3.2. Un écosystème Arts et Métiers pour le développement du paradigme Homme/Réel/Digital

Pour parfaire sa connaissance réelle de l'industrie, Arts et Métiers a développé une stratégie d'implantations territoriales en se structurant comme un grand établissement de la technologie au service des entreprises et organisé en 8 campus et 3 instituts maillant le territoire français.

Les implantations des différents sites Arts et Métiers garantissent à l'établissement une proximité avec le tissu industriel français à la fois au plan géographique et thématique. En particulier, la présence dans de grandes métropoles régionales ou, à l'inverse, dans des communes plus excentrées lui permet tout à la fois de travailler avec des grands groupes industriels, leurs filiales et sous-traitant ou des PME et ETI. Ce dispositif concourt à une meilleure connaissance de l'industrie à laquelle l'établissement peut confronter ses étudiants.

Par ailleurs, l'écosystème de formation permet de décliner des formations allant du bac au doctorat qui se caractérisent systématiquement par leur orientation industrielle et s'opèrent suivant les modalités des formations initiales, par apprentissage et continue.

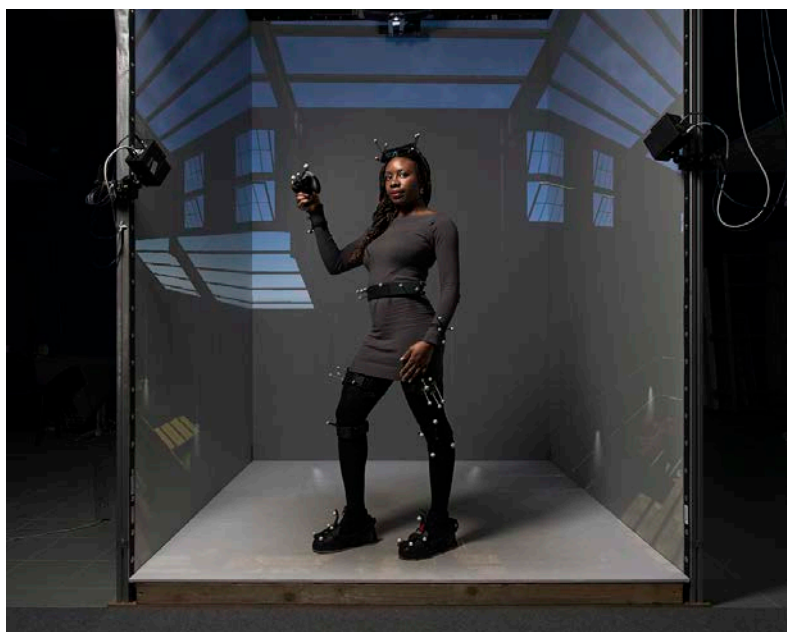


Figure 38- Apprenante Arts et Métiers [Crédit photo : Marion Gambin]

Cet écosystème est déployé sur l'ensemble des sites Arts et Métiers selon une coloration scientifique tenant compte des enjeux industriels des bassins dans lesquels se trouve l'établissement

Il repose sur :

- 14 plateformes technologiques, permettant une mise à disposition d'outils du digital associés à des ensembles technologiques à échelle 1 présents dans l'industrie d'aujourd'hui comme illustrant l'industrie du futur. Ces plateformes sont un lieu unique de déploiement d'une pédagogie inductive où les temps entre mise en situations concrètes et périodes de contextualisation peuvent être rapidement adaptés aux besoins de l'apprenant. Ces lieux d'apprentissage permettent à l'Homme de participer à l'excellence et encouragent la créativité et la montée en compétences.

- 14 laboratoires de recherche, permettant la formation par et à la recherche, gage d'innovation et d'activités de haut niveau scientifique sur l'ensemble du cycle de vie des produits ou des systèmes, et assurant les piliers scientifiques nécessaires que sont :
 - le génie énergétique ;
 - le génie industriel ;
 - le génie mécanique ;
 - l'ingénierie de la santé.
- Des partenariats forts avec des acteurs internationaux académiques, industriels et institutionnels, gage de l'apport de moyens (financiers, contextuels ou matériels) nécessaires à des équipements modernes, connectés, flexibles et réactifs et illustrant la capacité d'imaginer le produit ou le système en relation étroite avec le client, les fournisseurs et les opérateurs.
- Un ancrage en territoires matérialisé par des partenariats forts qui positionne Arts et Métiers comme un acteur économique et sociétal durable, en prise directe avec les défis sociétaux.

**The example of Manchester Metropolitan University :
the city of Manchester has a leading Role in the Fourth Industrial Revolution.**

Carl Diver, the Academic Lead on Industry 4.0 at the Manchester Metropolitan University and the first Reader in Industrial Digitalisation at a UK University, is optimistic about the opportunities in this city in the North West of England. The Industry 4.0 Conference and Exhibition takes place annually each spring in Manchester – a reflection of the city's proud contribution to the first Industrial Revolution.

Dr. Diver moved across to Manchester Metropolitan University from the University of Manchester earlier this year and is already planning and working with groups such as the Northern Powerhouse and Manchester's Combined Authority to discuss how the University can support industry and society in adopting Industry 4.0 concepts and technologies.

Historically the collaboration between the Manchester Metropolitan University and industry has always been good and the University do have aspirations to lead the way on this. One of their goals is to engage properly with industry and authorities. It has to be very much collaborative. It's also about listening to ensure the University is implementing what people are looking for.

There are 4 key areas in which the University is working :

- 1- **Teaching** – bringing digital industrialisation into the University's MSE courses under an Industry 4.0 umbrella and offering digital apprenticeships in conjunction with industry partners.
- 2- **Knowledge Exchange** – engaging with SMEs in the North West who are interested in the Industry 4.0 agenda, whether that's knowledge transfer partnerships, education or direct involvement with projects and research.
- 3- **Research** – supporting research in critical areas; matching research students with local businesses who have a research requirement; and securing funding from funding bodies, such as the Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC).

4- **Wider Engagement** – linking with the Smart City initiatives, such as CityVerve and Triangulum, the €25 million Horizon 2020 project funded by the EU in which Manchester is one of three participating cities alongside Eindhoven (Netherlands) and Stavanger (Norway); connecting with society at large to start a wider conversation and understand the human impact of technological change.

Investing in skills to help small and medium sized businesses make the transition is vital and especially for existing workers in industry. This is why building close relationships for collaboration with industry across the region will be vital if the University's Industry 4.0 programme is to have optimal impact.

“Collaboration isn't only needed between education and industry” says Dr Diver, “I'm very keen to capture everything that is happening in the University where we have digital industrialisation capabilities. Industry 4.0 isn't just engineering – it's digital arts, it's HR, it's healthcare, it's economics... from a teaching and research point of view we need to take a multi-disciplinary approach to understanding where the opportunities are for the UK as whole and what we need to be doing.”

One such multi-disciplinary initiative already being pursued by Manchester Metropolitan University is its new Print City education and innovation centre, which specialises in 3D printing.

The centre is headed up by Craig Banks, who works closely with Dr Diver. It's a great facility. From an Industry 4.0 point of view, 3D printing is a really important technology. And it's a shining light of what is possible with a multi-disciplinary approach. It brings together engineers, computer scientists and industry with artists, digital designers, people who think outside the box, to work on some interesting and innovative projects. It's a showcase of Industry 4.0 tech in action.

Showing local businesses around the centre is a great way of highlighting and demonstrating the different interests of Industry 4.0, he says.

“One of the issues of Industry 4.0 is that people aren't really sure what it is,” sympathises Dr. Diver. “Industry 4.0 has a wide remit and we want to show people it isn't just about robotics and automation. Our doors are open for SMEs to come in and have a look at the different projects we have going on. We can help them with who are the right people to speak with, to build relationships, maybe to work on a digital pilot. We want to build these relationships and, as a result, I hope the region as a whole will benefit.”

BIBLIOGRAPHIE

Générale

- AIF, « Guide pratique de l'Usine du Futur, Panorama de solutions », mai 2016
- AIF, « Études filières industrie du futur », juin 2017
- APEC, DEFI&Co « Usine du futur, bâtiment du futur : quelles évolutions pour les métiers cadres ? »
- Fabrique de l'industrie, Thibaut Bidet-Mayer « L'industrie du futur : une compétition mondiale », 2016
- GIMELEC, « Industrie 4.0, l'industrie connectée » septembre 2013
- Ministère de l'économie, « Nouvelle France industrielle », mai 2016
- Observatoire de la métallurgie « L'élaboration et la transformation des métaux par forge, fonderie et fabrication additive métallique », février 2017
- Pôle SYSTEMATIC, Christian Balle, « UdF : feuille de route », novembre 2014

Fabrication additive

- Fédération de la plasturgie, « Référentiel de compétence de la FA », 2016
- Ministère de l'économie, DGE, Benoit Rivollet, « Etude prospective – Futur de la fabrication additive métallique », janvier 2017

Réalités virtuelle et augmentée

- Casiez P. « Contribution à l'étude des interfaces haptiques - Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés », Thèse de doctorat, 2004
- Fuchs P. « Le traité de la réalité virtuelle », 5 volumes, Presses des mines, 2003

Industrie du futur

Quelques exemples d'intégration des concepts dans l'industrie française :

- A la SNCF : <https://www.youtube.com/watch?v=O4benpqaQ28>
- Chez SAFRAN : <http://usinedufutur.safran-group.com/>
- Chez PSA : <https://www.youtube.com/watch?v=igW-MyX7Pkl>
- Chez Schneider Electric : <https://www.youtube.com/watch?v=yilYpJzY-PY>

A l'étranger :

- Chez Bosch : <https://www.youtube.com/watch?v=GKhSTjraHIU>
- Chez Mercedes : <https://www.youtube.com/watch?v=ZYPpTWtQTFY>

L'industrie du futur est déjà là. L'intégralité des processus des entreprises voit leur organisation révolutionnée par la transition numérique. Des technologies comme les jumeaux numériques, les fabrications additives, les réalités virtuelle et augmentée... arrivent à maturité pour être utilisées dans de nombreuses fonctions. L'enseignement et la formation, à tous les niveaux, doivent désormais intégrer ces changements radicaux dans leurs cursus.

Cet ouvrage propose une présentation des concepts « industrie du futur » et « industrie 4.0 » et revient sur leur genèse. Ils proposent également une description des briques technologiques les plus utilisées ainsi que l'impact de leurs utilisations dans différents métiers industriels. Enfin, il amorce une réflexion sur la nécessaire évolution de la pédagogie. Ce document est la première étape de la réflexion d'un ensemble d'acteurs pédagogiques conscients de la révolution industrielle en cours.

DEFI&Co

CESI anime un consortium DEFI&Co pour former aux métiers de demain dans l'Industrie et dans le BTP. En février 2016, le consortium animé par CESI, leader de l'enseignement supérieur et de la formation professionnelle, et regroupant des partenaires institutionnels, industriels et territoriaux, était lauréat de l'appel à projets « Partenariats pour la formation professionnelle et l'emploi » géré par la Caisse des Dépôts pour le compte de l'Etat au titre du Grand Plan d'Investissement (GPI). Le projet d'un montant global d'environ 17,8 millions d'euros est doté d'un financement de 7,8 millions d'euros du PIA.

Le projet DEFI&Co ambitionne de développer pendant 5 années, à partir de travaux de recherche, des formations innovantes et qualifiantes de niveaux 3 à 1 dans le but de qualifier plus de 15 000 étudiants, apprentis ou stagiaires de la formation continue ; avec une attention toute particulière à l'intégration des femmes aux emplois de demain. Ces formations concernent :

- L'industrie du futur (gestion du cycle de vie de produits ou PLM, production et maintenance)
- Le bâtiment du futur (maquette numérique pour le bâtiment ou BIM, performance énergétique)
- Les métiers de l'analyse de données liés à ces deux axes (« Data Scientists »)

L'Institut de la réindustrialisation

L'Institut de la réindustrialisation a été créé en janvier 2015. Ses membres fondateurs sont le Groupe des Industries Métallurgiques (GIM), Syntec-Ingénierie (fédération des professionnels de l'ingénierie) et 2 écoles d'ingénieurs, l'EPF et CESI. L'Institut de la réindustrialisation a pour ambition de devenir un pôle créateur et diffuseur de connaissances et d'expertises. Cet institut se veut force de proposition en abordant des thématiques liées à la revitalisation industrielle de nos territoires tout en sensibilisant les étudiants, les apprentis, le grand public et les acteurs de demain sur ces enjeux.

Les auteurs

- Christophe Bourgognon, Responsable du Département Recherche, Transfert & Innovation, CESI IDFC
- Stéphanie Buisine, HDR, Responsable Recherche et Innovation, CESI IDFC
- Gwénaél Guillemot, Directeur de l'institut de la réindustrialisation
- Xavier Kestelyn, Directeur général adjoint en charge des formations, Arts et Métiers
- Léandra Müller Segard, Responsable de la majeure Engineering & Management, EPF Ecole d'ingénieur-e-s
- Morgan Saveuse, Directeur des études, CESI Ecole d'ingénieur