

**ENJEUX
ET PANORAMA
DES SOLUTIONS**

Édition Mars 2018

LE GUIDE

**DES TECHNOLOGIES
DE L'INDUSTRIE
DU FUTUR**



**MEMBRE FONDATEUR
DE LA FRENCH FAB**

[#industrie_futur](https://twitter.com/industrie_futur)

L'Alliance Industrie du Futur, association loi 1901, rassemble et met en mouvement les compétences et les énergies d'organisations professionnelles, d'acteurs scientifiques et académiques, d'entreprises et de collectivités territoriales, notamment les Régions, pour assurer, en particulier, le déploiement du plan Industrie du Futur. Elle organise et coordonne, au niveau national, les initiatives, projets et travaux tendant à la modernisation et à la transformation de l'industrie en France, notamment par l'apport du numérique. Elle s'appuie pour cela sur des groupes de travail dédiés. Son action est relayée en régions par des plateformes régionales, s'appuyant sur les réseaux des membres de l'Alliance, les collectivités pour accompagner les PME/ETI au plus près du terrain.

L'Alliance Industrie du Futur rassemble 35 membres : l'AFM (Association Française de Mécanique), l'AFDET (Association Française pour le Développement de l'Enseignement Technique), l'AFNeT, l'AFPC (Association Française des Pôles de Compétitivité), Arts & Métiers ParisTech, Bpifrance (Banque publique d'investissement), CCI France (Assemblée des CCI France), le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), l'école CentraleSupélec, le CERIB (Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton), le CETIM (Centre technique des industries mécaniques), Consult'in France (Syntec Stratégie et Management), la FIEEC (Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication), la FIM (Fédération des industries mécaniques), la Fédération de la Plasturgie et des Composites, la FIT (French Institutes of Technology), France Industrie, France Invest (Association Française des Investisseurs pour la Croissance), le GIFAS (Groupement des Industries Françaises de l'Aéronautique et Spatiales), le Gimélec (Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés), l'Institut Mines-Télécom, l'Institut de Soudure, le pôle de compétitivité EMC2, l'ISTP (Institut Supérieur des Techniques de la Performance), le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), la PFA (Plateforme automobile), la plateforme SCAP industrie du futur (Système cyber-physiques adaptatifs de production du Lab-STICC), RTE (Réseau de transport d'électricité), le SYMOP (Syndicat des machines et technologies de production), le Syntec Ingénierie (le syndicat des entreprises d'ingénierie), le Syntec Numérique (syndicat professionnel des éditeurs, et sociétés de Conseil en Technologies), TECHINFRANCE (Association Française des Éditeurs de Logiciels et solutions Internet), l'UIC (Union des Industries Chimiques) et l'UIMM (Union des Industries et Métiers de la Métallurgie), l'Union des Industries et des Métiers de la Métallurgie Paca (UIMM Paca).

Elle est présidée par Philippe Darmayan. Ses Présidents d'honneur sont Pascal Daloz et Frédéric Sanchez.





SOMMAIRE

PREMIÈRE PARTIE

AVANT-PROPOS	3
L'ORIGINE DE LA DÉMARCHE	5
LES ENJEUX MAJEURS DE L'ENTREPRISE	10
▶ ENJEUX MAJEURS DE L'ÉVOLUTION DES MARCHÉS	12
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN TECHNOLOGIQUE	14
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ORGANISATIONNEL	29
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL	34
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN SOCIÉTAL	40
LES LEVIERS DE COMPÉTITIVITÉ ET LE RÉFÉRENTIEL DE L'INDUSTRIE DU FUTUR	44

DEUXIÈME PARTIE

FICHES THÉMATIQUES	50
▶ OBJETS CONNECTÉS ET INTERNET INDUSTRIEL	51
▶ TECHNOLOGIES DE PRODUCTION AVANCÉES	71
▶ NOUVELLE APPROCHE DE L'HOMME AU TRAVAIL/ORGANISATION ET MANAGEMENT INNOVANTS	115
▶ USINES ET LIGNES/ÎLOTS CONNECTÉS, PILOTÉS ET OPTIMISÉS	130
▶ RELATIONS CLIENTS/FOURNISSEURS INTÉGRÉES	157
▶ NOUVEAUX MODÈLES ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX/STRATÉGIE ET ALLIANCES	164

AVANT-PROPOS

► **L'INDUSTRIE DU FUTUR, UN PROGRAMME D'EXCELLENCE INDUSTRIELLE À LA FRANÇAISE**

Le 20 juillet 2015, l'Alliance Industrie du Futur est officiellement créée. Son rôle : accompagner les entreprises françaises et notamment les PMI dans la modernisation de leurs outils industriels et la transformation de leur modèle économique par les technologies nouvelles, tout en plaçant l'être humain au cœur du processus. Il s'agit de resituer l'industrie française au centre du développement économique du pays, ce qui passe par une amélioration de la compétitivité des entreprises.

La prise de conscience remonte à quelques années, au rapport Gallois de novembre 2012. Ce rapport met en évidence le retard de l'industrie française par rapport à ses consœurs allemande et italienne, notamment en matière de robotisation. L'idée germe alors que, si la France a raté ce premier train de la modernisation, une deuxième chance lui est offerte avec la digitalisation de l'économie. La robotique et l'Usine du Futur deviennent ainsi respectivement le 32^e et 34^e plans stratégiques de la Nouvelle France Industrielle, lancée en septembre 2013 par Arnaud Montebourg, ministre du Redressement productif.

En avril 2015, Emmanuel Macron, nouveau ministre de l'Économie, de l'innovation et du numérique, propose une organisation plus resserrée de la Nouvelle France Industrielle, en capitalisant sur les acquis du plan Usine du Futur. Ce projet est amené à jouer un rôle central avec un périmètre élargi qui englobe désormais la modernisation et la numérisation de l'industrie, des moyens d'intervention renforcés, une dimension internationale plus forte et une gouvernance fédérant les acteurs de l'offre aux niveaux national et régional.

Outre la modernisation de l'outil de production, il s'agit d'accompagner les entreprises dans la transformation de leurs modèles d'affaires, de leurs organisations, de leurs modes de conception et de commercialisation, dans un monde où des nouveaux outils tels que ceux basés sur le numérique, la fabrication additive, les nouveaux matériaux, ou encore la robotique collaborative font tomber la cloison entre industrie et services.

► **DU GUIDE PRATIQUE DE L'USINE DU FUTUR AU GUIDE DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE DU FUTUR À DESTINATION DES PME-ETI**

Le groupe de travail DOTF (Développement de l'offre technologique du futur) a décrit les sept technologies clés pour le développement de l'Industrie du Futur sous forme de fiches techniques : digitalisation de la chaîne de valeur, automatisation/transitique/robotique de process, fabrication additive, monitoring et contrôle, composites et nouveaux matériaux/assemblages, place de l'homme dans l'usine, efficacité énergétique et empreinte environnementale des entreprises/intégration dans l'écosystème.

Le guide des technologies de l'Industrie du Futur a pour vocation de démystifier l'Industrie du Futur : c'est possible, concret, et voilà comment se l'approprier ! Il est constitué de fiches explicatives qui mettent en avant les leviers de compétitivité et doivent aider un chef d'entreprise à agir rapidement. Après la publication d'une première version début 2016,

le sous-groupe de travail « Guide Industrie du Futur version 2 » a démarré son travail de mise à jour en 2017 et propose cette nouvelle version lors du salon Global Industrie, le 27 mars 2018.

La Fédération des Industries Mécaniques (FIM) et ses syndicats, le CETIM, la FIEEC et ses syndicats, le CEA, TECH IN France et le Syntec Numérique sont à l'origine de ce travail démarré en 2014 et qui a abouti en 2015 à la publication du guide de l'Usine du Futur : une véritable référence intégrant une lecture de la transformation des entreprises, au-delà des habituelles références technologiques, par des leviers de compétitivité permettant à l'usine de se transformer vers plus de compétitivité, de flexibilité, et un meilleur impact environnemental, social et sociétal. Sans ce travail inestimable, piloté à l'origine par la FIM, cette nouvelle version, plus riche, n'aurait jamais pu exister.

Après trois années, l'Alliance Industrie du Futur et ses 35 membres, ont mis à jour ce travail et publie ce nouveau guide des technologies de l'Industrie du Futur, enrichi de nouvelles briques technologiques ou de leviers de compétitivité. L'Industrie du Futur s'étend aujourd'hui à des aspects qui ne concernent plus seulement le cœur productif mais tout l'environnement lié aux chaînes de valeur et aux transformations des « business models » des entreprises grâce à l'apport du digital.

Le présent guide rappelle, dans une première partie, l'origine de la démarche, définit les bases du concept de l'Industrie du Futur et en décrit les enjeux majeurs. Pour chaque enjeu, des déclinaisons génériques renvoient vers des fiches plus précises, fiches que l'entreprise pourra s'approprier et utiliser pour se guider sur le thème évoqué. Ces fiches thématiques, descriptives des différents composants ou macro-briques de l'Industrie du Futur – qu'ils soient relatifs à des nouvelles technologies, à des modes d'organisation ou à des équipements particuliers – sont toujours orientées vers la mise en œuvre en entreprise (y compris PME et TPE). L'ensemble de ces macro-briques constitue le référentiel de l'Industrie du Futur.

Ce guide pratique est donc à disposition des entreprises, pour les accompagner dans l'appropriation du sujet, pour leur faciliter la mise en œuvre des différents composants de l'Industrie du Futur lorsqu'elles décident de construire une nouvelle usine ou de moderniser un atelier existant. En tant que fournisseur d'équipements de production, ces fiches sont également une source d'information pour adapter l'offre aux besoins de demain.

Il constitue également une contribution aux programmes publics de soutien des entreprises dans le cadre de l'Industrie du Futur. En effet, les pouvoirs publics, conscients de l'importance de l'industrie pour la richesse nationale et des défis de nos sociétés vieillissantes face aux pays émergents, ont décidé de lui donner un élan pérenne. Cela se traduit par une volonté de moderniser l'outil industriel et améliorer sa compétitivité par l'innovation et l'évolution technologique. Ils mettent en œuvre des programmes d'accompagnement des entreprises destinés à encourager la Recherche et Développement ainsi que l'investissement dans les technologies innovantes, disponibles sur le marché (fabrication additive, robotisation...). Ces programmes, se référant à l'Industrie du Futur, sont déjà initiés.

Ce référentiel est enfin à disposition des acteurs de la recherche, pour contribuer à ce que leurs nombreux programmes, conduits autour de la thématique « Industrie du Futur », répondent aux besoins des industriels et de l'économie du pays.

L'ORIGINE DE LA DÉMARCHE

Le monde doit faire face à de très grands enjeux tels que le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources naturelles, l'accroissement de la population et l'amélioration de la compétitivité.

► UNE DÉMARCHE POLITIQUE DES PAYS DÉVELOPPÉS

On constate, depuis de nombreuses années, une baisse régulière de la part de l'industrie manufacturière dans le PIB national. Une réaction forte est donc nécessaire pour que les entreprises retrouvent productivité, compétitivité et profitabilité, capacités d'investissement et d'innovation, et restent ainsi engagées dans la compétition mondiale.

Il s'agit de trouver des solutions pour développer la compétitivité des entreprises, tout particulièrement des PME. Cela implique de répondre aux besoins des clients par le développement d'un « marketing client » au lieu d'un « marketing produit », d'apporter plus de fonctionnalités, d'augmenter la qualité et la sécurité des produits et d'aller vers des solutions et des services associés, dans le cadre d'un travail collaboratif en réseau avec les autres parties prenantes : fournisseurs, prescripteurs, collectivités territoriales, acteurs de la R&D...

L'Industrie du Futur, telle que nous l'avons décrite dans notre avant-propos, est l'une des réponses pour garantir la compétitivité des pays industriels matures.

► L'INDUSTRIE DU FUTUR, DANS LA NOUVELLE ÉCONOMIE

La nouvelle économie se caractérise par les grandes tendances suivantes, qui constituent autant de challenges que d'opportunités pour l'Industrie du Futur :

- 1- un niveau global beaucoup plus développé, partagé, focalisé sur l'optimisation. Pour l'Industrie du Futur, ceci concerne les problématiques d'optimisation de chaîne des fournisseurs, les plateformes de collaboration globale, les systèmes de traçabilité et d'économie écologique et énergétique ;
- 2- un niveau local, celui de la bulle logicielle de l'utilisateur (l'ensemble des interfaces fixes ou nomades auquel il a accès) et ses usages, par lequel on met à la disposition de l'utilisateur l'ensemble des services dont il a besoin pour exercer sa fonction avec le maximum de puissance (*empowerment*). Pour l'Industrie du Futur, c'est à ce niveau que la vision de « l'homme au centre de l'usine » prend tout son sens ;
- 3- un niveau intermédiaire qui était auparavant très bureaucratique et obèse, et qui est, dans la nouvelle économie, *lean*, automatisé, rapide, désintermédié et dématérialisé. C'est grâce à l'Internet des objets (local) connecté au big data (global) que ce niveau intermédiaire peut être rendu très simple, et surtout automatisable. Pour l'Industrie du Futur, ce niveau est celui de la modélisation et du pilotage des lignes de production et des lignes logistiques, des procédés, des flux de valeur nécessaires à la livraison des services utiles aux agents de production (maintenance, formation, etc...).

L'Industrie du Futur s'inscrit à plein dans cette révolution. À ce titre, le projet français se différencie de nombreux autres projets internationaux qui mettent souvent l'accent exclusivement sur l'automatisation et la modularité des systèmes de production (cyber-systèmes).

L'automatisation est importante, mais elle s'appuie toujours sur les principes de l'ancienne économie et n'adresse pas les questions que posent les *digital natives*, ou les *makers*. Le programme « Industrie du Futur » a bien l'ambition d'adresser tous les niveaux de l'usine ainsi que les aspects de la nouvelle économie. Il est à ce titre beaucoup plus vaste.

La nouvelle économie sera en outre la révolution de l'expérience : après le développement des produits, puis des services liés aux produits, l'expérience procurée par le produit et les services associés devient un élément critique. Elle caractérise le ressenti de l'utilisateur au cours de l'usage, d'abord dans le monde virtuel, puis dans le monde réel. C'est un paramètre clé dans une économie centrée sur les usages.

► LA NOUVELLE GÉNÉRATION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION AUTOMATISÉS : LES CYBER-SYSTÈMES

Au milieu de la seconde partie du XXe siècle est survenue la troisième révolution industrielle tirant sa source de l'électronique, des télécommunications, de l'informatique et de l'audiovisuel. Aujourd'hui, une quatrième révolution industrielle est en marche pour les systèmes automatisés, fondée sur l'accroissement de la vitesse de traitement de l'information et des capacités de mémoire ainsi que sur le développement massif des réseaux de communication.

Cette nouvelle mutation technologique, liée à l'arrivée du numérique et caractérisée par une interconnexion totale des machines et des systèmes au sein des sites de production (et entre eux), ainsi qu'à l'extérieur, ouvre la voie à une nouvelle organisation des moyens de production aussi bien au stade de l'approvisionnement que de la fabrication et diffusion des produits.

Cette nouvelle révolution industrielle de l'automatisation s'appuie en particulier sur l'introduction massive de systèmes cyber-physiques, pouvant être définis comme des systèmes embarqués complexes conçus pour interagir avec leur environnement de manière continue *via* l'association d'éléments physiques, informatiques et de communication.

En plus de cette communication *machine-to-machine*, les technologies de l'information démultiplieront les possibilités de communication entre collaborateurs d'un même site, de sites différents ou d'entreprises différentes, pour plus d'échange et de coopération. La qualité de ces relations favorisera l'émergence d'une intelligence collective qui peut constituer un facteur important d'efficacité des équipes dans les entreprises.

Le concept d'Industrie du Futur ne se contente pas d'optimiser des solutions existantes mais intègre de réelles transformations amenant des solutions nouvelles pour les technologies et les modes d'organisation. Il conduit à aborder la production industrielle comme un système aux dimensions multiples : techniques, organisationnelles, économiques, humaines et sociales.

Plusieurs pistes d'évolution des systèmes de production sont aujourd'hui avancées dans de nombreux rapports publiés récemment : personnalisation des produits de marchés de grande série (*mass customisation*), flexibilité de l'outil industriel, économie circulaire (recyclabilité des matériaux, limitation ou suppression des déchets...), économie de la fonctionnalité, économie de la connaissance, établissement de communautés d'acteurs à forte interopérabilité, innovation collaborative...

► **UNE DIMENSION TECHNOLOGIQUE TRÈS ORIENTÉE « NUMÉRIQUE », NOUVEAUX MATÉRIAUX ET NOUVEAUX PROCÉDÉS DE PRODUCTION**

De nouveaux outils de communication de l'entreprise étendue se développent et vont impacter l'Industrie du Futur : cloud computing, big data, réseaux sociaux, espaces collaboratifs, Internet des objets... L'accès aux nouveaux outils numériques permettra d'accélérer l'adoption des techniques de fabrication les plus avancées, d'accompagner la transition énergétique et d'améliorer les conditions de travail des opérateurs.

Les données s'installent au cœur de la stratégie des entreprises. S'appuyant sur des réseaux de capteurs, les usines de demain produiront en permanence de l'information sur les procédés de production, la gestion des stocks et l'acheminement des lots, et seront connectées en permanence avec les produits qu'elles ont fabriqués. Toutes ces données devront être analysées afin d'optimiser la maintenance et d'améliorer la qualité. Pour les valoriser, il convient de tenir compte des particularités de ces données massives, hétérogènes, nécessitant un traitement rapide. L'enjeu est de transformer des données brutes en informations à forte valeur ajoutée, permettant de produire plus vite, avec une meilleure qualité et à moindre coût. Une stratégie devra être développée afin d'éviter une dépense d'effort (argent, temps) pour traiter des informations inutiles ou inversement de manquer des opportunités de création de valeur en omettant d'utiliser des informations disponibles. L'Industrie du Futur saura optimiser ses systèmes d'informations, les dimensionner à l'utile, voire les redimensionner régulièrement et à haut niveau (revue de Direction).

Les produits du futur fabriqués dans nos pays développés seront de plus en plus complexes, constitués de matériaux intelligents. Ils seront connectés, interopérables, sûrs... et feront appel à des technologies modernisées sans cesse et des modes de production évolués (production silencieuse, fabrication additive/impression 3D, capteurs intelligents, robots collaboratifs, intelligence artificielle...).

Les produits du futur seront constitués de matériaux en association de plus en plus complexe, de sorte que chacun d'eux apporte son avantage spécifique dans le produit final (légèreté, conductibilité, résistance, dureté...). À la diversité croissante des matériaux (nouveaux matériaux métalliques, composites, nanomatériaux, biomatériaux...) s'ajoutent des combinaisons de plus en plus variées entre eux. Les technologies d'assemblage sont donc l'un des points clés de l'Industrie du Futur.

Dans ce contexte, la cybersécurité devient un enjeu majeur : la mise en place de moyens de prévention du piratage des données, et du risque de prise de contrôle de l'outil de production à distance, est primordiale. L'Industrie du Futur sera consciente collectivement

de ses avantages concurrentiels et s'organisera pour identifier et préserver au mieux ses informations stratégiques. En complément des moyens techniques, la protection passera aussi par une sensibilisation des acteurs de l'Industrie du Futur sur la valeur financière de ces actifs immatériels.

► UNE DIMENSION SOCIÉTALE PLUS AFFIRMÉE

Un autre enjeu de l'Industrie du Futur réside dans une évolution radicale de la vision de l'industrie par le citoyen français. Il faut ré-enchanter l'industrie et l'usine de manière à attirer les talents et motiver les jeunes, en mettant l'homme et la femme au cœur de l'Industrie du Futur : l'association des collaborateurs au projet de l'entreprise, à sa stratégie, aux choix technologiques (ingénierie collaborative, *open innovation*) ainsi que le développement de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE), du bien-être des salariés et de leur formation tout au long de la vie professionnelle. L'adhésion des collaborateurs au projet d'entreprise ne peut que favoriser leur engagement et leur implication.

La démarche française, en plaçant l'homme et la femme au cœur de l'Industrie du Futur, lui permet de se distinguer sur le plan international. La technologie et l'organisation permettent de le décharger des tâches pénibles, répétitives, pour qu'il se concentre sur les tâches à forte valeur ajoutée.

L'Industrie du Futur s'appuie sur un ensemble de briques que les industriels peuvent assembler, intégrer et utiliser selon leurs besoins.

LES ENJEUX MAJEURS DE L'ENTREPRISE

▶ ENJEUX MAJEURS DE L'ÉVOLUTION DES MARCHÉS	12
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN TECHNOLOGIQUE	14
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ORGANISATIONNEL	29
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL	34
▶ ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN SOCIÉTAL	40

Entreprendre, c'est prendre des risques en développant de nouvelles idées. Celles-ci se traduisent en nouveaux produits ou services à mettre sur le marché. La réussite dépendra aussi bien du caractère innovant de l'offre que de la capacité à proposer celle-ci à des conditions économiques « de marché ».

Entreprendre, c'est aussi, jour après jour, consolider son offre en l'améliorant. Cette amélioration peut porter aussi bien sur la nature de l'offre que sur la manière dont elle est produite. Pour les activités industrielles, l'outil de production dans son écosystème est une composante primordiale.

Au sein de l'écosystème, l'ensemble des règles (obligations, normes...) et des facteurs de coûts (niveaux des salaires, taxes...) étant arrêtés, c'est la manière de faire qui fait la différence. Si le client, plus que jamais, conduit l'entreprise, ce sont ses hommes et ses femmes qui la font, en mettant en œuvre les technologies nouvelles. Le citoyen, producteur ou non, s'invite aussi dans ce mouvement en demandant une proximité de son lieu de vie et de travail, en se souciant de l'impact écologique des produits ou des conséquences des processus de fabrication. À la différence d'hier, toutes ces considérations doivent être prises en compte simultanément.

L'Industrie du Futur cherche précisément à englober l'ensemble de ces enjeux.

1^{er} enjeu : l'évolution des marchés

Il n'y a pas d'entreprise sans clients, en France et à l'international, et pas de clients sans prendre en compte leurs attentes, les offres alternatives et la valeur de l'offre.

2^e enjeu : l'offre technologique

Pour rendre l'offre compétitive, les systèmes de production connectés permettront de rester au plus près du client. Les nouveaux procédés, les composants intelligents ou mécatroniques et les nouveaux matériaux élargiront l'offre ou la rendront plus compétitive.

3^e enjeu : un nouveau modèle organisationnel

Repenser les processus de fabrication se fera avec une organisation où l'humain au travail sera plus responsable, où l'organisation sera plus apprenante, plus collaborative. C'est l'enjeu différenciant du modèle français.

4^e enjeu : l'environnement devient incontournable

Il n'y a plus aujourd'hui de production sans prise en compte des aspects environnementaux. L'Industrie du Futur non seulement porte son propre impact comme une donnée constituante mais, en plus, il s'agit de la concevoir comme un modèle de développement durable.

5^e enjeu : la dimension sociétale

Enfin, produire en France implique la reconnaissance de la démographie, des compétences et des lieux de vie. L'Industrie du Futur est intégrée à la cité.

L'Industrie du Futur met l'homme et la femme au centre de cette excellence opérationnelle. Au travers de ces cinq enjeux, il s'agit de trouver des solutions pour permettre aux entreprises de rester dans la course économique mondiale. Il faut donc développer productivité, valeur ajoutée et ainsi capacité d'innovation et d'investissement, et *in fine* compétitivité et rentabilité des entreprises, tout particulièrement des PME.

Chaque entreprise va pouvoir modeler son ou ses « usines » en fonction des attentes de ses clients, de ce qu'elle produit et de ses compétences. Chaque équipe pourra définir les conditions qui lui sont propres pour une production renouvelée, innovante et compétitive, source de croissance et d'emploi. Chaque site industriel est, et sera, différent. Chaque projet est unique et personnalisé. Chaque entreprise doit pouvoir, en fonction de sa taille, sélectionner ses pistes d'actions.

► ENJEUX MAJEURS DE L'ÉVOLUTION DES MARCHÉS

Depuis de nombreuses années, les marchés se sont mondialisés. Les entreprises et les systèmes de production sont pris dans un nouveau contexte, plus complexe qu'auparavant, où contraintes et objectifs se déclinent différemment, voire sont nouveaux. Les notions de performance et d'efficacité se sont élargies pour embrasser court terme et long terme, et prennent une dimension éthique. La performance doit être assurée dans un environnement international où les incertitudes et les variabilités techniques, économiques, sociétales et humaines n'ont jamais été aussi importantes et rapides.

La montée en gamme

L'essentiel de la compétitivité se joue davantage sur la qualité des produits, la richesse des services associés et leur degré d'innovation que sur les seuls coûts. La stratégie de montée en gamme d'une entreprise consiste à améliorer la qualité et le niveau de service des produits qu'elle propose, de façon à augmenter son chiffre d'affaires par la hausse du prix de vente de ses produits, voire à préserver ou augmenter ses ventes par l'avantage de la qualité des produits. C'est en partie la démarche inverse de celle de la réduction des coûts et des bas prix (*low cost*).

Le rythme élevé de l'évolution des technologies, ainsi que leur diffusion massive, sont des sources permanentes d'innovation aussi bien au niveau des solutions et des usages que des techniques et des organisations de production.

 **Voir fiches : « Chaînes de valeur et offres du futur » ; « Veille, prospective et intelligence économique » ; « Internationalisation et export » ; « Ruptures marketing et ruptures stratégiques ».**

Le changement piloté par le client


Les exigences variées et changeantes des clients pilotent la production. C'est une nouvelle approche du consumérisme à laquelle il faut répondre pour créer de la richesse partagée et générer des emplois. On passe à un marché de l'offre personnalisée qui nécessite une nouvelle organisation de la production.

Les immenses sites industriels destinés à fournir des produits standards à la plus vaste zone géographique possible laisseront la place à des sites de taille plus réduite, conçus pour fournir régionalement des produits et dotés de moyens de production adaptés à des séries plus modestes, pouvant répondre à des marchés de plus en plus volatils et imprévisibles.

Cet enjeu implique de répondre aux besoins des clients par le développement d'un « marketing client » au lieu d'un « marketing produit », d'apporter plus de fonctionnalités

aux produits, d'aller vers des solutions globales et des services associés, d'augmenter la qualité et la sécurité des produits, de mieux maîtriser sa production avec les technologies les plus compétitives et les plus adaptées aux besoins des marchés.

Dans ce contexte, l'entreprise du futur sera d'autant plus compétitive qu'elle saura discerner, avant et mieux que ses concurrents, les besoins à venir de ses marchés, en termes de produits, de services et d'amélioration des processus. On pense naturellement au big data, ou encore à l'Internet des objets. Mais l'homme aura toute sa place, notamment par sa créativité, son propre esprit d'entreprise et sa capacité d'écoute des clients.

 **Voir fiches :** « Digitalisation de la relation client » ; « Nouvelles relations économiques » ; « Innovation ouverte et collaborative ».

Des processus adaptés

L'Industrie du Futur se nourrit de procédés flexibles, agiles, permettant de produire des objets de façon économe et compétitive. L'Industrie du Futur doit pouvoir évoluer rapidement avec l'accélération du rythme de mise sur le marché des nouveaux produits. La flexibilité et la reconfigurabilité constituent donc des enjeux clés.

Les marchés actuels se caractérisent de plus en plus par leur variabilité, tant au niveau des quantités de produits à fabriquer ou à vendre par période qu'au niveau des fonctionnalités attendues, amenées à s'adapter à des besoins toujours plus spécifiques dans un contexte de raccourcissement des délais de mise sur le marché. Les systèmes de production du futur se doivent d'être rentables tout en étant flexibles et réactifs.

 **Voir fiche :**
« Intégration et chaînage numérique des processus ».

Concevoir des fonctionnalités plus que des produits

La concurrence internationale exacerbée que rencontrent les fournisseurs de produits et d'équipements leur impose, pour préserver et développer leurs positions sur leurs marchés, de monter en gamme leur offre de façon continue. Les caractéristiques techniques et la qualité intrinsèque des produits sont depuis longtemps des facteurs de différenciation. Aujourd'hui, les fournisseurs doivent apporter toujours plus de valeur à leurs clients, en intégrant les multiples fonctions d'usage du produit et les services associés. Une bonne partie de ces fonctionnalités, qui répondront aux grands enjeux sociétaux (vieillesse de la population, santé, sécurité et liberté, mobilité, lien social, transition énergétique...) reste encore à inventer.

L'étape ultime consiste à vendre l'usage d'un produit plutôt que le produit lui-même.

 **Voir fiche :**
« Economie de la fonctionnalité ».

Au-delà de l'adaptation permanente de l'outil de production à l'évolution des produits à fabriquer, ces tendances de fond nécessitent des changements profonds de marketing – afin de comprendre et d'anticiper les besoins et les attentes de ses clients (consommateurs finaux ou industriels intermédiaires) – et d'organisation de l'entreprise, pour apporter les services associés. Dans ce cadre, les entreprises doivent organiser et structurer une veille stratégique permettant de surveiller les évolutions (technologiques, concurrentielles, réglementaires...) et détecter les signaux faibles pour mieux anticiper.



Voir fiche :

« Veille, prospective et intelligence économique ».

Ces mutations sont d'autant plus rapides que la filière intègre verticalement toute la chaîne de valeur.

Le domaine industriel n'échappe pas à ces enjeux : le fournisseur de produits intermédiaires intègre de plus en plus l'usage final des produits et va contribuer au développement de son marché (ex : allègement et résistance pour une structure en composite), et le fabricant de machine de production, au cœur de l'Industrie du Futur, va intégrer de multiples fonctions process, maintenance, traçabilité, etc., au-delà des performances classiques de qualité et de productivité.

► ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN TECHNOLOGIQUE

L'enjeu est de livrer au client l'objet technique et ses fonctionnalités conformes à la demande dans le délai le plus court possible, au prix négocié. Avoir la certitude de recevoir le produit commandé dans les conditions convenues et à la date prévue est un facteur essentiel dans la prise de décision et la fidélisation des clients.

L'adaptation rapide des processus pour des produits personnalisables (petites et moyennes séries) passe par le développement de nouveaux procédés de fabrication agiles : la capacité à se reconfigurer très rapidement en fonction de la demande avec l'interopérabilité entre machines et l'amélioration de la coopération entre tous les acteurs de la chaîne de valeur.

Les nouvelles technologies à la base de la compétitivité

Les nouvelles technologies, qu'elles soient intégrées dans le processus de production ou dans le produit, constituent un levier majeur pour permettre aux entreprises de proposer des solutions enrichies, plus sûres, plus flexibles, plus fiables et compétitives. Elles constituent un vaste champ d'amélioration de la compétitivité globale de l'entreprise. Il est donc indispensable de réduire les temps d'innovation, de conception, de production, de distribution par l'usage massif des modèles et échanges de données numériques, et d'adopter les processus de management, de conception, de fabrication et de distribution qui se prêtent le mieux à ces échanges.

Le développement et la combinaison de nouvelles technologies telles que nanotechnologies, micro et nano-électronique, matériaux avancés, systèmes de production avancés, Internet mobile, Internet des objets, cloud, stockage de l'énergie, mécatronique et plastronique... vont fortement impacter les produits et les systèmes de production de

demain. Les principaux enjeux concernent à la fois les technologies (principes physiques, modélisation et simulation, applications) en tant que telles mais également leur conception, leur mise en œuvre et leur interaction avec les utilisateurs.

Au même titre que l'interopérabilité, la sécurité est un enjeu important de l'usine connectée. Les industriels doivent désormais se conformer à certaines exigences en termes de cybersécurité.

La modernisation de l'outil productif passe par de nouveaux processus, l'acquisition de nouvelles compétences, de nouvelles façons de piloter la production. Toutes les technologies nécessaires ne sont pas forcément disponibles à l'instant.

L'industrie numérique et connectée

L'Industrie du Futur s'appuie sur plusieurs axes technologiques, dont un est transversal à tous les autres: l'axe relatif aux Technologies de l'Information et de la Communication. Il permet, en effet, d'intégrer et de connecter des technologies entre elles ainsi qu'avec le système d'information nécessaire aux opérations humaines.

Les Technologies de l'Information et de la Communication, accessibles au milieu industriel, ouvrent la voie à l'usine connectée et numérique. Elles permettent notamment :

- ▶ une communication continue, instantanée et intégrée d'informations relatives aux processus de production (conception, fabrication, logistique et maintenance) ainsi qu'aux produits fabriqués ;
- ▶ la simulation du produit, du procédé, du poste de travail et même de l'usine, de la logistique et de la chaîne de fournisseurs ;
- ▶ l'autodiagnostic et l'autoadaptation des procédés et des équipements de production, ainsi que le contrôle en continu des produits.

Les TIC sont basés sur des logiciels spécifiques : bibliothèque de l'usine numérique, ingénierie numérique, nouveaux outils de communication de l'entreprise étendue, Internet des objets.

Les autres axes technologiques, indissociables du concept d'Industrie du Futur, sont:

- ▶ les nouveaux procédés de fabrication agile, permettant de réagir très rapidement aux évolutions de la demande (quantité, qualité, évolution du produit, adaptation à des besoins spécifiques...), pouvant se réorganiser rapidement : affectation des opérateurs, réorganisation de l'atelier, interopérabilité des équipements, relation flexible et interactive avec le réseau de fournisseurs ;
- ▶ les machines intelligentes : équipements de production capables d'intégrer des composants intelligents et de les utiliser afin de répondre à une fonction donnée. La complexité des informations et des besoins traités qualifie le degré d'intelligence de l'équipement ;
- ▶ les nouveaux matériaux : les produits du futur seront constitués de matériaux en association de plus en plus complexe, de sorte que chacun des constituants matériaux apporte son avantage spécifique dans le produit final (légèreté, conductibilité, résistance, dureté...) ;
- ▶ le contrôle, la surveillance et la traçabilité : par des capteurs miniaturisés, économes en énergie, en autonomie décisionnelle et par des nouvelles techniques de traitement du signal et d'imagerie numérique.

Les Technologies de l'Information et de la Communication

Les TIC forment la colonne vertébrale de l'Industrie du Futur, notamment les aspects décrits ci-après.

Ingénierie numérique - modélisation et simulation :

Outils permettant de modéliser et de simuler le fonctionnement d'un produit ou d'un procédé (y compris poste de travail) dans un environnement numérique homogène et sur l'ensemble de son cycle de vie.

Ces outils permettent de mettre au point les procédés, et de les optimiser dans le monde virtuel, à un coût très faible une fois que l'investissement initial de numérisation a été fait. Il s'agit de la mise en œuvre de très nombreuses co-simulations effectuées de manière itérative, qui font intervenir l'ensemble des disciplines concernées afin de trouver les optimums technico-économiques pour les produits et les processus de fabrication.

Le prototypage virtuel permet, avant réalisation matérielle, de montrer une réalité virtuelle tendant à représenter l'objet à réaliser le plus fidèlement possible. Il rend plus facile les modifications éventuelles sans avoir recours à des prototypes physiques. Le prototypage virtuel permet un gain de temps non négligeable quant aux tests de fonctionnalités et d'intégration environnementale.

La réalité augmentée désigne les systèmes informatiques qui rendent possible la superposition d'un modèle virtuel 3D ou 2D à la perception que nous avons naturellement de la réalité, et ceci en temps réel. Elle désigne les différentes méthodes qui permettent d'incruster de façon réaliste des objets virtuels dans une séquence d'images. Elle s'applique aussi bien à la perception visuelle (superposition d'image virtuelle aux images réelles) qu'aux perceptions tactiles ou auditives. La réalité augmentée permet de comparer avec précision le virtuel (ce qu'on a prévu de faire) avec le réel (ce qui existe et qu'on voit). Cette technologie est clé en particulier pour garantir la conformité aux spécifications, mais aussi pour les instructions, la formation, etc. Dans l'industrie, ses applications sont multiples et touchent la conception, le design, la maintenance, l'assemblage, le pilotage d'équipements, la robotique, l'implantation, l'étude d'impact...



Voir fiches : « Conception et qualification virtuelle des systèmes de production » ; « Conception et simulation du produit » ; « Infrastructures big data et calculs distribués » ; « Logiciels de simulation de procédés » ; « Maquette numérique de l'usine » ; « Réalité augmentée » ; « Réalité virtuelle ».

Logiciels de l'usine numérique :

Différents logiciels constituent la bibliothèque de l'usine numérique :

- ▶ conception et fabrication assistées par ordinateurs (CFAO) ;
- ▶ bibliothèque de composants ;
- ▶ système d'ordonnancement de la production ;
- ▶ progiciels de gestion de la production et de la maintenance assistée par ordinateurs ;
- ▶ supervision : outil collaboratif avec vision 360° du process et tableaux de bord ;
- ▶ réseaux sociaux d'innovation ;
- ▶ gestion du cycle de vie des produits (PLM).



Voir fiches : « Gestion et pilotage de la production » ; « Réseaux d'entreprises et sites intégrés » ; « Digitalisation de la relation client » ; « Digitalisation de la supply chain » ; « Nouveaux outils de gestion des connaissances et des compétences ».

Interfaces et protocoles de communication des systèmes :

L'Internet des objets permet de coupler de manière très simple les objets entre eux. Il permet également de coupler des objets aux capteurs et actuateurs qui permettent de les faire fonctionner ou de compléter leurs fonctions de base par des services à valeur ajoutée supplémentaires. Enfin, il permet de connecter toutes ces informations au big data sur le cloud, pour valoriser ces données au niveau global.

Une application particulièrement importante est l'utilisation de capteurs de type RFID ou autre pour détecter la présence d'un produit en cours de production et obtenir, via le cloud, l'historique de ce produit et ses propriétés, ainsi que les gammes opératoires, les instructions, et la destination finale du produit. Ce type de dispositif permet ainsi de piloter la production directement à partir de ces étiquettes, de manière beaucoup plus légère qu'à partir de systèmes centralisés.



Voir fiches : « Communication et agilité des machines » ; « Composants et sous-systèmes électroniques » ; « Fiabilité des systèmes mécatroniques » ; « Infrastructures de simulation » ; « Infrastructure big data et calculs distribués » ; « Réseaux industriels sans fil » ; « Réseaux industriels traditionnels ».

Échanges d'information sécurisés :

La sécurité des systèmes d'information est l'ensemble des moyens techniques, organisationnels, juridiques et humains nécessaire et mis en place pour conserver, rétablir et garantir la sécurité du système d'information.

La sécurité est un enjeu majeur pour les entreprises. Sa finalité sur le long terme est de maintenir la confiance des utilisateurs et des clients. La finalité sur le moyen terme est la cohérence de l'ensemble du système d'information. Sur le court terme, l'objectif est que chacun ait accès aux informations dont il a besoin.



Voir fiche :
« Cybersécurité ».

Internet des objets :

L'Internet des objets est une « *infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux Technologies de l'Information et de la Communication interopérables existantes ou en évolution¹* ».

C'est « *un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant²* ».

Avec l'Internet des objets, l'objet physique devient – par le biais de son intelligence logicielle associée – un véritable acteur dans les chaînes de valeur ou les processus dans lesquels il est engagé, au même titre que le sont les humains, les organisations ou certains systèmes d'information.



Voir fiche :
« **Internet industriel** ».

Internet mobile, cloud computing, médias sociaux orientés applications industrielles :

L'Internet mobile est l'ensemble des technologies destinées à accéder à Internet au-delà des stations de travail et des PC fixes.

Le déploiement de smartphones et de tablettes équipés d'écrans à haute définition, et d'accès aux réseaux mobiles 4G dans les usines, facilite l'accès à l'Internet mobile ; les développements de sites Web et de nombreuses applications mobiles dédiés à ces smartphones ont accéléré la généralisation de l'Internet mobile.

L'usine du futur s'appuiera sur des dispositifs favorisant les échanges d'informations (puces RFID, tablettes tactiles) ; cette connectivité offre plus d'efficacité aux opérateurs et permet aussi de piloter la production à distance. La machine envoie des informations relatives au processus en cours, permettant de constituer des tableaux de bord, d'émettre des alertes...

Par exemple, les produits dotés d'une puce RFID auront en mémoire la tâche et les conditions de leur production, ce qui leur permet de contrôler le bon déroulement de leur propre fabrication. Quand le produit avance sur la chaîne de production, les informations s'actualisent.

Le cloud computing, ou « l'informatique en nuage », est un système d'informations et de services réalisés via Internet, permettant de fournir et d'utiliser les aptitudes des systèmes informatiques, qui est basé sur les nuages : un parc de machines, d'équipements, de réseaux et de logiciels maintenu par un fournisseur, que les consommateurs peuvent utiliser en libre-service *via* un réseau ...

Le cloud computing désigne donc un ensemble de processus qui consiste à utiliser la puissance de calcul et/ou de stockage de serveurs informatiques distants à travers un réseau, généralement Internet. Ces ordinateurs serveurs sont loués à la demande, le plus souvent par tranche d'utilisation selon des critères techniques (puissance, bande passante...) mais également au forfait.

1. UIT.

2. *L'Internet des objets* de Pierre-Jean Benghozi, Sylvain Bureau et Françoise Massit-Folléa.

Le cloud computing se caractérise par sa grande souplesse d'utilisation : selon le niveau de compétence de l'utilisateur client, il est possible de gérer soi-même son serveur ou de se contenter d'utiliser des applicatifs distants. Selon la définition du National Institute of Standards and Technology (NIST), le cloud computing est l'accès *via* un réseau de télécommunications, à la demande et en libre-service, à des ressources informatiques partagées configurables. Il s'agit donc d'une délocalisation de l'infrastructure informatique.

Un réseau social est un ensemble d'individus ou d'organisations reliés par des interactions sociales régulières. L'expression « médias sociaux » recouvre les différentes activités qui intègrent la technologie, l'interaction sociale (entre individus ou groupes d'individus) et la création de contenu.

Les médias sociaux utilisent l'intelligence collective dans un esprit de collaboration en ligne. Par le biais de ces moyens de communication sociale, des individus ou des groupes d'individus qui collaborent créent ensemble du contenu web, organisent ce contenu, l'indexent, le modifient ou le commentent, et le combinent avec des créations personnelles. Les médias sociaux utilisent de nombreuses techniques, telles que les flux RSS et autres flux de syndication web...

Les médias sociaux permettent en particulier l'innovation multidisciplinaire collaborative en interconnectant les multiples compétences internes et externes.



**Voir fiches : « Applications industrielles nomades » ;
« Environnement ouvert » ; « Cloud et big data ».**

Big data :

Le big data, littéralement les données massives, est une expression anglophone utilisée pour désigner des ensembles de données qui deviennent tellement volumineux qu'ils en deviennent difficiles à travailler avec des outils classiques de gestion de base de données ou de gestion de l'information...

Il s'agit de méthodes et d'outils pour le traitement rapide de grandes quantités de données non structurées, permettant notamment de donner une orientation avec une probabilité associée de réalisation d'un événement. Le big data permet par exemple d'analyser les données de production pour en déduire la combinaison de paramètres qui a conduit à une situation de non-qualité, permettant ainsi la prévention de telles situations et l'amélioration continue des processus.



**Voir fiche :
« Cloud et big data ».**

Les nouveaux procédés de fabrication agiles

Le concept de l'Industrie du Futur repose sur des technologies innovantes, de façon à pouvoir répondre le plus vite possible aux fluctuations des besoins, mais aussi pour maintenir l'outil de production à la pointe du progrès. Les avancées de plus en plus rapides de la technologie en général imposent de limiter la vétusté de l'outil de production, afin de maîtriser l'investissement. Dans le cas contraire, les sauts technologiques peuvent vite devenir infranchissables.

Les principaux procédés de l'Industrie du Futur sont décrits ci-après.

Fabrication additive :

La fabrication additive regroupe l'ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un modèle numérique (NF E 67-001). Elle englobe la fabrication directe, le prototypage rapide, l'impression 3D... Il existe différents procédés se différenciant par la manière de déposer les différentes couches de matériaux et par les matériaux eux-mêmes. L'utilisation de poudres multiples permet la création de pièces issues de la fusion de plusieurs matériaux. L'insertion de capteurs dans les matériaux permettra de rendre les produits du futur de plus en plus intelligents.

Exemples de la fabrication additive :

- ▶ pour les polymères : dépôt fil, frittage laser ;
- ▶ pour les métalliques : SLM (fusion sur lit de poudre par laser), EBM (fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons), DMD (projection de poudres fondues dans un rayon laser).



Voir fiche :

« Fabrication additive ».

Flexibilité des procédés de fabrication conventionnels :

Les procédés de fabrication dits « conventionnels » (usinage, forgeage, frappe, découpage/ emboutissage, compactage, assemblage...) ont leur place dans l'Industrie du Futur. Le défi consiste à savoir mettre en œuvre, sur ces procédés *a priori* maîtrisés, les innovations technologiques et numériques qui permettront de s'adapter, à coût maîtrisé, aux évolutions de la demande client (taille de la série, qualité, personnalisation des produits...) et de l'environnement.

Les objectifs consistent à :

- ▶ donner de l'agilité aux procédés :
 - en évitant la fabrication d'outils coûteux et longs à réaliser,
 - en s'appuyant sur la modélisation tant pour la conception des pièces, des gammes et des outils (réduction des temps de démarrage série),
 - en s'équipant de machines et équipements permettant de gagner en temps de cycle et de programmation, voire avec des équipements d'usinage robotisé,
 - en facilitant et automatisant la manipulation des pièces dans les machines ou équipements,
 - en donnant de la souplesse dans la gestion de la production *via* une intégration numérique croissante,
 - en mettant en œuvre de nouveaux matériaux à performances accrues ;
- ▶ maîtriser/optimiser la qualité/fonctionnalité des pièces, et minimiser les rebuts :
 - en mettant en œuvre des méthodes de contrôle *in situ* qui permettront de vérifier les objectifs qualité nécessaires pour garantir la performance du process et/ou d'anticiper les actions de maintenance à mener (contrôle à l'intérieur de l'outil ou en sortie de ligne),
 - en s'équipant de machines instrumentées autoadaptatives,
 - en intégrant des opérations de fabrication indirectes dans les outils (traitement thermique, assemblage...);

- capitaliser les savoir-faire et expertises métier *via* des outils en ligne, qui faciliteront la prise de décision tant pour la conception des pièces et des outils que pour l'amélioration continue des opérations de fabrication ;
- diminuer les consommations énergétiques et impacts environnementaux :
- en s'appuyant sur la simulation pour optimiser le transfert d'énergie,
- en diminuant/supprimant la lubrification.



Voir fiches : « Automatisation, transitique, robotique de process » ; « Formage et usinage innovants ou optimisés » ; « Machines programmables innovantes ou optimisées » ; « Procédés Near Net Shape » ; « Assemblage innovant ».

Fonctionnalisation de surface :

Les exigences concernant la tribologie et les surfaces des pièces sont de plus en plus élevées et multifonctionnelles.

Les objectifs consistent à :

- ▶ mettre en œuvre des procédés plus innovants en termes de performance et de coûts :
 - en investiguant de nouveaux procédés : traitements par voies sèches par exemple (plasma, vapeur, projection de poudres...), traitement hybride (duplex), etc.,
 - en développant la robotisation pour l'accrochage et le déplacement des pièces à traiter et dont le cheminement sera réorganisé pour permettre une meilleure gestion des flux dans les ateliers,
 - en s'appuyant sur le développement des GPAO et du contrôle des paramètres des procédés de production pour mieux maîtriser le process,
 - en s'appuyant sur la simulation pour le choix du meilleur couple matériaux/procédés ;
- ▶ répondre aux enjeux environnementaux et de santé (classement des installations, importance des critères écologiques, REACH...) avec des solutions qui répondent au cahier des charges fonctionnel :
 - en modernisant les équipements liés au process lui-même mais également aux équipements annexes,
 - en mettant en œuvre des procédés alternatifs « propres » : dépôt sol-gel, applicable à la plupart des métaux usuels et se déposant à partir de précurseurs non toxiques et sans composés CMR (cancérogène, mutagène et reprotoxique), liquides ioniques ;
- ▶ améliorer les propriétés de service et/ou performances des matériaux par l'ajout de fonctionnalités innovantes à la surface des pièces (fonctionnalités parfois combinées) : fonctions électriques, optiques, magnétiques, catalytiques, tribologiques, esthétiques, antibactériennes... :
 - en s'appuyant sur les technologies de micro et nano-structuration de surface (texturation laser, grenailage, *skin pass*...),
 - en optimisant les procédés déjà industrialisés (traitements superficiels – PVD, CVD, grenailage, cémentation, carbonituration...),
 - en mettant en œuvre des procédés combinés : usinage-formage de pièces métalliques, moulage des plastiques avec modification sélective par laser intégré au moule ;

- ▶ augmenter la durabilité des surfaces vis-à-vis des sollicitations de service (frottement, par exemple) :
 - en adaptant les techniques de traitement, en particuliers DLC et nitruration, et s'appuyant sur l'usage de la texturation de surface et du biomimétisme ;
- ▶ reconverter des produits en leur donnant une autre fonction et s'ouvrir ainsi de nouveaux marchés.



Voir fiche:

« **Fonctionnalisation de surface** ».

Assemblages par procédés de soudage innovants :

Les procédés de soudage innovants doivent apporter une réponse à des défis technologiques tels que l'allègement des structures, la maîtrise des coûts et de la qualité, ou encore la fiabilité et l'augmentation de la durée de vie des appareils. Dans de nombreux cas, les matériaux utilisés vont évoluer, avec par exemple l'utilisation croissante d'alliages d'aluminium, d'aciers à très haute limite d'élasticité et de matériaux dits « nobles ». L'idée générale est d'avoir le bon matériau au bon endroit, et le procédé d'assemblage doit être adapté aux matériaux en présence et à leurs épaisseurs.

Les procédés de soudage innovants sont, bien entendu, des procédés nouveaux, mais également des évolutions significatives de procédés établis de longue date qui répondent à des besoins croissants :

- ▶ capacité à réaliser des assemblages multimatériaux, en particulier entre des métaux ou alliages incompatibles sur le plan métallurgique ;
- ▶ augmentation substantielle de la productivité, soit en termes de vitesse de soudage, de taux de dépôt ou encore de nombre de passes, généralement grâce aussi à la robotisation ;
- ▶ amélioration de la qualité des soudures, avec des procédés garantissant l'absence de défauts rédhibitoires ou plus robustes d'un point de vue opératoire pour absorber la variabilité de préparation des plans de joint.

Exemples de procédés de soudage innovants :

- ▶ à l'état solide : soudage par friction-malaxage (FSW) et par impulsion électromagnétique (MPW) ;
- ▶ par fusion : soudage laser et hybride laser-MAG, variantes MIG-MAG à court-circuit contrôlé, variantes MIG-MAG à forte pénétration.



Voir fiche:

« **Technologies de soudage à hautes performances** ».

Microfabrication :

Les évolutions des marchés conduisent à une tendance constante de miniaturisation des produits. La mécatronique en est un exemple flagrant. Il faut introduire de plus en plus de fonctions, et donc de services, dans des volumes de plus en plus petits. Les entreprises doivent alors intégrer des technologies de microfabrication, voire de nanofabrication, ou s'allier avec des partenaires de confiance. Aujourd'hui, pratiquement toutes les technologies de fabrication macro disposent de leur alter ego dans le monde micro : micro-usinage, micro-assemblage, micro-perçage, etc.

Des micro-usines complètes sont développées : les Desktop Factories.



Voir fiche :
« Microfabrication ».

Les machines intelligentes

L'Industrie du Futur implique de disposer de machines dont l'intelligence permet d'affranchir l'humain de tâches dénuées ou pauvres en valeur ajoutée, et de traiter les données afin d'informer ou de réagir de façon autonome à une situation donnée.

Les principales technologies sont les machines et outils intelligents, et la robotique collaborative.

Machines et outils intelligents :

Les machines et outils intégrant des composants et des sous-systèmes intelligents regroupent les équipements de production capables d'intégrer des informations et de les utiliser pour répondre à une fonction donnée. La complexité des informations et des besoins traités qualifie le degré d'intelligence de l'équipement. Parmi les fonctions spécifiquement traitées, sont répertoriées l'adaptation rapide au changement de production, la capacité à réaliser plusieurs opérations, la communication entre équipements, l'optimisation du cycle de vie de l'équipement, de la maintenance, de l'interface opérateur, ou de la consommation énergie et matière, et les boucles d'auto-adaptation (auto-correction des paramètres du procédé ; par exemple : couple, vitesses de coupe...). Ces équipements intègrent les aspects mécanique, thermique, électronique et informatique (mécatronique).

Citons les familles :

- ▶ les robots industriels et machines auto-adaptatifs ;
- ▶ les robots collaboratifs (y compris cobots) ;
- ▶ les machines-outils multifonctions ;
- ▶ les équipements pilotés à distance ;
- ▶ les équipements de fabrication additive (y compris machines prototypage rapide, imprimantes 3D).

L'Interface homme/machine joue un rôle très important. Son objectif est d'augmenter la surface d'échange entre les équipements et les intervenants afin d'améliorer l'efficacité et la compétitivité du couple homme/machine. Il s'agit donc de moyens et d'outils (matériels et logiciels) mis en œuvre permettant à un intervenant de contrôler et de communiquer avec son équipement, machine, ligne...

Ces moyens et outils assurent :

- ▶ la commande de l'équipement par l'intervenant ;
- ▶ la récupération des données recueillies sur l'équipement et son milieu environnant ;
- ▶ l'analyse et le traitement multicritères de ces données ;
- ▶ l'enregistrement des événements et des données ;
- ▶ la transmission des résultats aux différents intervenants concernés. Cette transmission doit être personnalisée à chaque typologie d'intervenant en fonction de l'événement : la bonne information à la bonne personne au bon moment et sous la bonne forme ;
- ▶ la mise à disposition d'autres informations, du type documentations, modes opératoires, etc.

Ces outils permettent de déployer « l'homme augmenté », c'est-à-dire l'homme et la femme dotés à travers ces interfaces de toutes les informations dont ils ont besoin (plans, gammes, instructions, données techniques, formation, historiques, etc.) mais aussi, et surtout, de tous les services en ligne dont ils peuvent avoir besoin (maintenance, aide à la qualité, approvisionnement, services généraux, etc.).

Le résultat est que l'homme augmenté peut être responsabilisé – *empowered* – et devenir un véritable entrepreneur interne avec de nouvelles relations au travail.



Voir fiches :

« **Composants intelligents** » ; « **Machines intelligentes** ».

Robots collaboratifs :

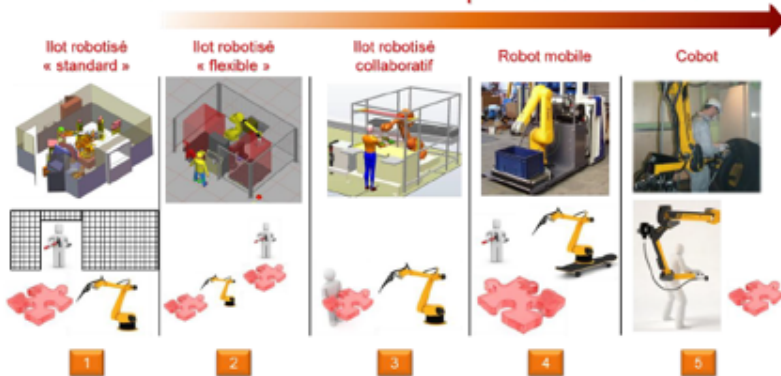
Le robot collaboratif est un robot conçu pour travailler dans une zone commune avec l'opérateur de production. Il intègre les fonctions de sécurité nécessaires pour une interaction directe avec un humain dans un espace de travail coopératif défini.

Les robots collaboratifs intègrent des capacités améliorées d'interaction en toute sécurité avec l'homme et les procédés. Ils peuvent être autoadaptatifs, c'est-à-dire capables de capitaliser les situations réelles rencontrées pour une prise de décision raisonnée.

On peut classer les typologies d'applications industrielles en cinq catégories, comme évoqué dans le graphique ci-dessous :

- ▶ îlot robotisé « standard » : sans interaction prévue entre l'opérateur et le robot ;
- ▶ îlot robotisé « flexible » : solution avec apport de solutions techniques en matière de sécurité ;
- ▶ îlot robotisé collaboratif : solution mettant en œuvre une collaboration entre l'opérateur et le robot, avec une interaction qui peut être ponctuelle (selon les besoins) ou quasi-permanente ;
- ▶ robot mobile : solution introduisant la mobilité du robot ;
- ▶ cobot (contraction des mots « *collaborative robot* ») : un équipement robotisé permettant d'assister un opérateur dans ses tâches, notamment par la démultiplication des efforts et une réduction de la pénibilité engendrée par une tâche manuelle.

Interaction croissante entre l'opérateur et le robot



 **Voir fiches : « Assistance aux gestes et dépénibilisation » ; « Cobotiques et exosquelettes ».**

Les nouveaux matériaux

Dans le cadre de l'Industrie du Futur, il est indispensable de considérer le couple matériaux/procédés dès la conception (ex : poudre métallique Co-Cr pour réalisation des pièces médicales avec procédé de fabrication additive par fusion laser). De même, il serait illusoire d'imaginer des procédés avancés de fabrication, ainsi que la modélisation des procédés, sans une connaissance approfondie des matériaux (et en particulier des nouveaux matériaux).

Les nouveaux couples matériaux/procédés de l'Industrie du Futur doivent permettre :

- ▶ d'améliorer la performance économique des entreprises par le biais de procédés augmentant la productivité des ateliers et la qualité des pièces fabriquées ;
- ▶ de prendre en compte les évolutions sociétales et réglementaires vers des produits plus respectueux de l'environnement.

L'évolution des matériaux induira :

- ▶ d'adapter les procédés classiques par des innovations (ex : emboutissage à haute température sur des THR) ;
- ▶ de développer des nouveaux procédés de mise en œuvre (fabrication additive).

Parmi les évolutions matériaux notables, on note :

- ▶ pour les métalliques :
 - les aciers à très hautes performances (THR), spécifications d'allègement et de sécurité, tout en préservant leur facilité de mise en œuvre. Leur résistance peut atteindre plus de 2 000 MPa,
 - les superalliages, développés en vue d'applications à haute température. Ils disposent d'une résistance élevée à la corrosion et au fluage, et d'une meilleure tenue mécanique en conditions extrêmes et/ou aux chocs. Les bases nickel ou cobalt, avec addition de rhénium ou de ruthénium, sont envisagées pour la construction de nouveaux moteurs d'avion à température de combustion plus élevée ou pour les nouvelles motorisations automobiles à haut rendement énergétique,

- les alliages légers avec l'utilisation, aujourd'hui, d'aluminium-lithium en aéronautique, d'aluminures de titane pour les aubes de turbine, ou d'alliages de magnésium pour des pièces semi-structurelles comme les éléments de carrosserie ou de sièges ;
- ▶ pour les élastomères : de nouveaux caoutchoucs émergent, offrant des propriétés spécifiques par l'incorporation de polymères et d'additifs modifiés, ou par un traitement particulier lors de la mise en œuvre. Par exemple, des élastomères fluorés sont en cours d'étude et peuvent tenir jusqu'à 315°C ;
- ▶ pour les composites : le défi composite dans le cadre de l'Industrie du Futur sera d'intégrer massivement les composites dans des marchés à gros volume et, sans doute, à grandes cadences. Pour ce faire, il sera nécessaire de :
 - diminuer les temps de cycle de fabrication (usage des composites à matrice thermoplastique par exemple),
 - développer des procédés « grande cadence » (procédés de drapage automatique, pultrusion, procédés voies liquides – RTM, enroulement filamentaire, placement de fibres ou de rubans de fibres, assemblages multimatériaux),
 - réduire les coûts (procédés Net Shape, réduction des pertes « matériaux » et rebus, hybridation des procédés pour fonctionnaliser les pièces au maximum),
 - en parallèle aux développements menés pour les composites à matrice organique, on assiste au développement des composites à matrice céramique pour les tenues à haute température et à l'abrasion ;
- ▶ les nanomatériaux : matériaux nanostructurés/nanoadditivés pour augmenter les performances.

Différentes contraintes, dont environnementales *via* l'allègement, mais aussi liées à l'optimisation de la répartition des matériaux au sein d'une pièce ou d'un ensemble en fonction des sollicitations subies, conduisent à concevoir des pièces multi-matériaux, réalisées dans des matériaux choisis pour satisfaire aux besoins spécifiques (tenue à la corrosion, légèreté, propriétés mécaniques...).

Les conceptions multi-matériaux permettent de bénéficier des avantages de chacun des constituants. Elles améliorent les caractéristiques des produits (allègement, absorption chocs...) ainsi que la qualité perçue (surfaces...), et répondent à des problématiques croissantes de complexité de produit, tout en prenant en compte la compatibilité des matériaux et les contraintes environnementales. Mais elles nécessitent de mettre en œuvre des techniques d'assemblage de matériaux dissemblables respectant ces fonctionnalités, tout en garantissant une qualité de liaison assurant des propriétés optimales de l'ensemble obtenu.

Parmi les technologies mises en œuvre, on peut citer :

- ▶ les techniques d'assemblages de deux matériaux métalliques dissemblables : brasage, brasage diffusion et les procédés de soudage à l'état « solide » tels que le soudage diffusion, le soudage par friction, le soudage par friction-malaxage, le soudage par impulsion magnétique (SIM) ;
- ▶ les techniques d'assemblages entre un matériau métallique et un matériau composite ou plastique : le vissage, le collage, le rivetage-collage, le soudo-collage, le clinchage, le surmoulage.

Ces conceptions nouvelles nécessitent :

- ▶ des méthodologies de dimensionnement d'assemblages hétérogènes, la détermination des modèles de comportement et les bases de données correspondantes obtenues par des essais de caractérisation ;
- ▶ des moyens de qualifier la qualité de l'assemblage obtenu, préférentiellement par méthodes de contrôle non destructif, et sa durabilité en fonction des sollicitations de service.

Les composites ne sont plus de nouveaux matériaux à proprement parler. Le défi composite dans le cadre de l'usine du futur sera d'intégrer massivement les composites dans des marchés à gros volume et, sans doute, à grandes cadences. Pour ce faire, il sera nécessaire de diminuer les temps de cycle de fabrication, de développer des procédés « grande cadence » et des assemblages multi-matériaux, de réduire les coûts...



Voir fiches : « Aciers à très hautes performances, alliages et superalliages » ; « Composites à fort volumes » ; « Matériaux intelligents et adaptatronique, matériaux fonctionnels » ; « Matériaux non métalliques et fluides biosourcés ».

Contrôle, surveillance, traçabilité

L'Industrie du Futur, numérique et connectée, se doit en toute logique de se doter de tous les moyens de contrôler les opérations et les fonctionnalités attendues des produits et services, de surveiller son outil de production ainsi que son écosystème (incluant son propre impact) et d'assurer la traçabilité des événements, matériaux et transactions avec les parties prenantes. Cela passe par la captation des informations, leur analyse et leur mémorisation.

Capteurs et actionneurs :

Un capteur est défini comme un système intégré comprenant le moyen de réaliser une mesure. Il comprend la détection, la transmission et l'analyse de l'information établie. Les capteurs ont pour vocation d'être intégrés dans des systèmes complexes.

On recense trois types de capteurs :

- ▶ les capteurs physiques mesurent une variation (déplacement, température, lumière, masse...) donnant un renseignement sur son environnement ;
- ▶ les capteurs chimiques transforment de l'information chimique en un signal analytique utile ;
- ▶ les capteurs biologiques consistent en des systèmes de reconnaissance biologique réalisés à l'aide de biopuces, micro-organismes, ADN... Ils sont perçus comme complémentaires aux autres capteurs par leur mesure à l'échelle moléculaire.

L'intégration des capteurs dans des matériaux est considérée comme une voie technologique pour le développement de matériaux intelligents car ils permettent d'assurer le lien entre le matériau et son monde extérieur et lui confère ainsi une capacité d'adaptation.

La connexion à Internet des capteurs implantés dans les objets du quotidien, les composants, les machines, les containers, les infrastructures et tout type d'objets physiques, offre un énorme gisement de valeur économique. Des puces RFID doublées de GPS, de capteurs de température, humidité, accéléromètres, dynamomètres, etc. pourront être implantés dans la plupart des maillons des chaînes de production et d'approvisionnement, permettant d'améliorer la productivité des usines avec la maintenance prédictive et des fonctions

additionnelles de supervision, d'optimiser la gestion des flux et de réduire la variabilité ainsi que les coûts liés à la gestion des stocks.

Une énorme capacité de traitement d'information est nécessaire pour utiliser les données rassemblées, pour les confronter et enfin délivrer la bonne information (cf. big data, cloud...).

 **Voir fiche :**
« Capteurs autonomes et communicants ».

Contrôle, surveillance et traçabilité :

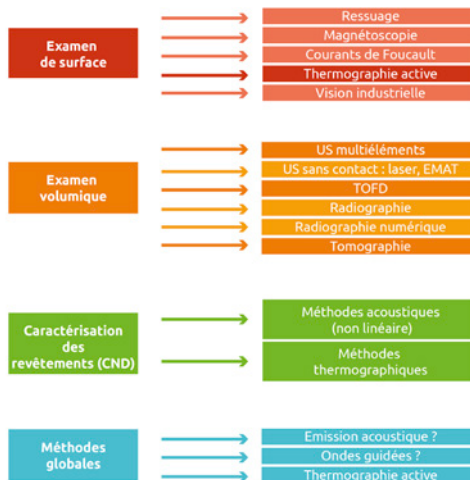
Les produits, élaborés à partir de matériaux de plus en plus complexes, associent de plus en plus de technologies différentes.

La vérification de la conformité du produit réel en regard du produit théorique (celui issu de la spécification, modélisation et simulation) nécessite un contrôle et un suivi plus importants des performances tout au long du cycle de vie, avec deux enjeux majeurs :

- la surveillance des produits et des procédés : pour anticiper les pannes, augmenter la disponibilité et échelonner les actions de maintenance, minimiser les temps et les coûts de réparation, connaître en permanence les sollicitations en fonctionnement, rendre le produit intelligent, monitorer en temps réel (détection des non conformités ou des défauts dès leur formation, intégration des modèles d'analyse de la nocivité des défauts..), estimer la durée de vie résiduelle en temps réel ;
- le contrôle et la traçabilité : pour des contrôles plus rapides, plus discriminants, traçables, propres, sans rayonnement ionisant, automatisés, à moindre coûts/temps d'opération et sans nécessité de compétences, sur des matériaux nouveaux, avec, à terme, la possibilité de passer à une chaîne de contrôle complète « tout numérique ».

Pour ce faire, on mettra en œuvre :

- ▶ les technologies CND modernes, avec ou sans contact, en s'appuyant sur les nouvelles techniques de traitement du signal et d'imagerie numérique, à l'évolution des capteurs : multi-éléments, ondes guidées, thermographie active, tomographie, etc. ;
- ▶ des capteurs intégrés et des modèles de fonctionnement.



La difficulté pour les entreprises résidera notamment dans l'industrialisation et l'intégration optimale des méthodes et des systèmes de CND (le plus souvent, chaque produit nécessite une adaptation spécifique) dans le processus de fabrication.

Les outils de simulation des CND permettront de préparer, avant d'aller sur le site, les conditions opératoires, le choix du contrôle et l'optimisation des réglages.



Voir fiches : « CND innovants » ; « Mesure et analyse de données » ; « Optimisation de la maintenance, maintenance prédictive » ; « Surveillance à distance » ; « Systèmes numériques de contrôle-commande ».

► ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ORGANISATIONNEL

Dans le cadre de la mondialisation et de la spécialisation industrielle des économies, le développement de l'entreprise dans nos pays occidentaux repose désormais sur une stratégie majeure en trois phases :

- ▶ développer des activités à forte valeur ajoutée ;
- ▶ miser sur la créativité, la qualité et la réactivité ;
- ▶ monter en gamme.

Pour ce faire, il est nécessaire de travailler sur les aspects organisationnels de l'entreprise et de la chaîne des fournisseurs, ainsi que sur le management des ressources humaines dans le cadre d'un dialogue social réinventé.

La qualité totale et l'excellence opérationnelle au cœur de la démarche

Les normes internationales de la qualité se sont orientées vers la qualité totale (TQM : *Total Quality Management* ; NF EN ISO 9004 : gestion des performances durables d'un organisme, approche de management par la qualité), qui articule stratégie, système, performance et dimensions humaine et sociale.

Dans le cadre de la qualité totale, les parties prenantes sont :

- ▶ les clients ;
- ▶ les fournisseurs ;
- ▶ les actionnaires ;
- ▶ les salariés ;
- ▶ et la société en général.

La qualité optimale se situe au point de rencontre des besoins explicites ou implicites de l'ensemble des parties prenantes.

Une nouvelle organisation de la production – flexible, facilement reconfigurable et adaptative, permettant de répondre dans des délais inférieurs aux transports maritimes en provenance de pays lointains – doit émerger. Le délai et la qualité de réalisation d'une production personnalisée doivent être des arguments face à la production de masse.

La flexibilité des moyens de production doit s'accompagner d'une agilité des organisations, cadre de travail d'opérateurs plus polyvalents et poly-compétents favorisant l'émergence et le développement de processus de coopération et d'innovation.

L'excellence opérationnelle, démarche systématique et méthodique menée dans l'entreprise, a pour but l'amélioration continue des procédés de production, tant en termes de productivité et de qualité des produits que de réduction des coûts de toute nature. Cette démarche utilise une grande variété de concepts, méthodes, techniques ou outils, dont : 6 sigma, AMDEC, Kaizen, Kanban, lean management, etc. L'excellence opérationnelle, en se focalisant sur la satisfaction du client final, favorise la pérennisation des activités.

Au-delà de l'entreprise en tant que telle, le déploiement des nouvelles technologies numériques doit accélérer, faciliter, et changer la mise en relation des différents acteurs de la chaîne de valeur. Les anciennes relations clients/fournisseurs dictatoriales doivent laisser la place à l'entreprise étendue dans un modèle gagnant/gagnant. Ces nouvelles relations inter-entreprises, avec leaders et partenaires unis autour de projets avec les mêmes valeurs, doivent permettre la mise en commun et le partage de savoirs et connaissances, compétences, expériences, voire d'équipements industriels dans le cadre du *manufacturing as a service*.

Et ce, toujours dans un but d'efficacité, de compétitivité, d'accélération de la croissance de chacun des partenaires : plus fort ensemble que séparément.

Ces partenariats peuvent être locaux ou internationaux, avec des centres techniques ou universitaires, avec tout partenaire, quel qu'il soit, permettant d'accélérer et d'être meilleur.

 **Voir fiche :**
« Gestion de la qualité produit ».

Les outils de l'excellence opérationnelle

- ▶ Le 5S – premières lettres de 5 termes japonais : *Seiri* (trier), *Seiton* (ranger), *Seiso* (nettoyer), *Seiketsu* (standardiser), *Shitsuke* (respecter) – a pour objectif d'éliminer les causes de nombreux petits problèmes, sources de perte d'efficacité. C'est l'une des premières méthodes à mettre en œuvre dans une démarche de lean management. Elle vise aussi à changer la mentalité des opérateurs et de l'encadrement.
- ▶ La VSM (*Value Stream Mapping*) – analyse de la chaîne de la valeur, des flux physiques et des temps d'écoulement de la production (depuis l'entrée des matières premières jusqu'à l'expédition des produits finis emballés) – permet de définir les enjeux et les actions prioritaires d'un plan de mise en œuvre du lean management (aussi appelé *roadmap*).
- ▶ Le lean management est un système d'organisation du travail qui cherche à mettre à contribution l'ensemble des acteurs afin d'éliminer les gaspillages qui réduisent l'efficacité et la performance d'une entreprise, d'une unité de production ou d'un département. Pour cela, le lean se fixe comme objectif d'éradiquer trois « démons » de l'organisation du travail : tout ce qui est sans valeur, la surcharge de travail engendrée par des processus non adaptés, la variabilité ou l'irrégularité.
- ▶ Le lean management s'attaque tout particulièrement à la surproduction, aux attentes, aux rebuts-retouches/corrections, aux processus mal adaptés, aux transports/ruptures de flux, aux mouvements inutiles et aux stocks. Pour obtenir des résultats pérennes, il s'appuie sur

l'amélioration continue, avec une forte implication de tout le personnel concerné par les processus à optimiser.

- ▶ Le management visuel repose sur la transparence des résultats en temps réel, pour tenter d'améliorer la réactivité aux problèmes constatés. Chaque zone ou service doit disposer de ses propres indicateurs, affichés sur place. Les écarts significatifs par rapport aux objectifs fixés doivent donner lieu à une analyse et à un plan d'action correctif.
- ▶ La méthode SMED (*Single Minute Exchange of Die*) est une méthode d'analyse et de diminution des temps de changement de production (ou de série), dont l'objectif est surtout de diminuer la taille des lots pour diminuer la valeur des stocks (produits finis et produits intermédiaires).
- ▶ La maintenance productive totale (TPM : *Total Productive Maintenance*) est une méthode fondée, avec la participation des opérateurs, sur l'observation terrain et la résolution des pannes qui affectent une installation. Deux indicateurs sont utilisés dans cette méthode : le MTBF (*Mean Time Between Failures*, ou temps moyen entre deux pannes) et le MTTR (*Mean Time to Repair*, ou temps moyen pour réparer). En cas de succès de la méthode, cela doit se traduire par une augmentation du TRS/OEE (Taux de rendement synthétique/*Overall Equipment Effectiveness*), qui est le principal indicateur du *lean manufacturing*.

 **Voir fiches : « Développement du capital immatériel » ; « Les démarches ou outils LEAN » ; « Démarches et outils de conduite du changement ».**

Inventer de nouveaux dispositifs de collaboration

La collaboration est au cœur de l'innovation, pour les produits et les processus de demain. Il s'agit de réseaux sociaux adaptés aux problématiques techniques, permettant le partage d'information, la priorisation des idées, la gestion des controverses techniques, des projets et programmes, ou des portefeuilles de produits, etc.

Ce type de collaboration peut être déployé au sein de l'entreprise, et à l'extérieur, pour une innovation *outside-in*. Particulièrement importante est la co-innovation avec le client, qui permet de le fidéliser dès les premiers stades du cycle de vie des produits. Cette collaboration concerne aussi bien la conception (des produits, des procédés) que l'exécution. La collaboration en conception permet de définir des produits ou des processus de fabrication fonctionnellement innovants, et donc gagnants sur le marché. L'exécution permet d'optimiser en permanence les conditions de production, ainsi que la qualité, avec un impact direct sur les indicateurs de productivité et de coût.

L'Industrie du Futur devra prendre en compte les modifications des relations au travail introduites par ces pratiques collaboratives, y compris les nouvelles possibilités d'organisation pour une collaboration à distance.

Une autre façon de concevoir la mobilité, notamment celle des modes de production, doit être conduite – une mobilité au sens large (produit, homme-compétences, production, organisation), dans un ancrage plus fort avec le territoire d'origine qui organisera par ailleurs l'inscription dans la mondialisation. Cette nouvelle mobilité devra favoriser la communication dans les équipes sur des sites différents et dans les chaînes de partenaires.

 **Voir fiche : « Alliances technologiques ou géographiques ».**

La flexibilité de l'organisation

L'Industrie du Futur devra être intelligente, disposer de modes de production flexibles, d'outils de production reconfigurables et de ressources humaines aux compétences adaptées. Elle se nourrit de procédés flexibles, agiles, permettant de produire des objets de façon économe et compétitive. La flexibilité et la reconfigurabilité constituent donc des enjeux clés. Avec cette nécessaire flexibilité (mais aussi avec la montée en complexité des produits), les machines du futur devront interagir et coopérer avec l'opérateur. Il sera nécessaire de développer de nouvelles compétences professionnelles.

Dans un système de production fondé sur des technologies avancées, les ressources humaines doivent se renouveler en permanence pour que les compétences puissent s'adapter rapidement aux évolutions techniques. Dans les années à venir, il apparaîtra nécessaire de mieux identifier les ressources à mobiliser dans l'organisation du travail et la formation pour développer les compétences.



Voir fiches : « Préparation du travail en temps réel à la demande » ; « Gestion et pilotage de la production » ; « Intégration du facteur humain ».

Un système de management de la qualité recentré sur la valeur ajoutée des collaborateurs

Le système de management de la qualité de l'Industrie du Futur devra être construit autour de la dynamique des processus et le développement de la responsabilisation des équipes. L'autonomie et la facilité de prises de décisions ne s'exerceront que dans le cadre de règles claires, avec des processus managériaux axés sur la valeur ajoutée des ingénieurs, techniciens et opérateurs motivants qui cultivent l'esprit d'engagement au service de l'efficacité. La fluidité du pilotage de la performance sera favorisée par l'utilisation d'outils numériques de l'usine du futur tels que les réseaux sociaux, les outils de partage de l'information, le web mobile, la réalité augmentée, les IHM intuitives...

La dernière version de l'ISO 9001 (2015) préconise de s'attacher, dans le système de qualité, à la compréhension des besoins et attentes des parties intéressées. En ce sens, elle favorise la prise en compte de l'écosystème de l'usine dans la mise en place des processus. Elle demande également de mettre en œuvre, à chaque niveau de l'entreprise, une analyse des risques et des opportunités d'amélioration qui donneront un rôle plus fort à l'homme et à la femme dans l'usine.



Voir fiche : « Intégration du facteur humain ».

Logistique du futur

La logistique de l'Industrie du Futur sera servie par des outils informatiques de plus en plus précis et de plus en plus communicants. Elle mettra également sur l'interpénétration entre outils de logistique et de gestion de l'entreprise afin de synchroniser les flux logistiques et les flux de production, et de mettre en place une planification dynamique de la production.

Le concept de gestion des chaînes d'approvisionnement évolue, au-delà de l'intendance et de la gestion des stocks, de l'approvisionnement des matières et des transports.

Il s'agit dorénavant :

- ▶ de piloter/manager les flux (matière, outils, personnel, monétaire et informations) pour améliorer la performance de l'entreprise, en s'adaptant à la multiplicité et à la complexité des produits, aux fluctuations des marchés et à l'organisation du client, et tout cela en temps réel ;
- ▶ d'améliorer la coopération entre les acteurs de la chaîne de valeur en s'appuyant notamment sur les TIC (catalogue électronique de composants, dématérialisation des certificats matière..).

Les défis à relever sont nombreux :

- ▶ gestion des flux d'information énormes et traçabilité totale ;
- ▶ maîtrise des technologies de communication mobile ;
- ▶ interfaçage complet avec l'organisation du fournisseur et celle du client pour minimiser les volumes stockés et s'affranchir de magasins voraces en coûts.

Les produits devront être pris en charge dès la sortie du système de production du fournisseur ou sous-traitant, jusqu'à leur présentation sur les lignes de montage de leurs clients, en juste à temps. L'Industrie du Futur devra donc maîtriser totalement l'intégration de la logistique dans son propre système de production. C'est une composante incontournable de la chaîne de valeur.

Les chaînes logistiques amont et aval devront être organisées pour permettre de rapatrier en même temps les produits en fin de vie, soit chez le fabriquant, soit sur des plateformes de traitement constitutives de filières spécialisées. Basées sur des fournisseurs de services logistiques indépendants, variés en taille et zones de recouvrement (régionale, nationale, internationale), elles devront développer entre elles de nouveaux modes de collaboration. Ces chaînes devront sans cesse se reconfigurer pour minimiser les ressources employées et donc limiter leur empreinte environnementale.



Voir fiches : « Digitalisation de la supply chain » ; « Automatisation, transitique, robotique de process ».

Intégration verticale et horizontale

Dans la mesure où la recherche d'efficacité économique pousse l'entreprise à améliorer la mise en réseau, de nouvelles formes de collaboration apparaissent, structurées autour du déploiement des technologies de l'information :

- ▶ intégration de l'Industrie du Futur tout au long de la chaîne de valeur, des fournisseurs aux clients (intégration verticale) ;
- ▶ collaboration renforcée entre les différents services de l'usine du futur, des méthodes au marketing en passant par le contrôle qualité (intégration horizontale).

Cette évolution va avoir des impacts majeurs sur les relations entre l'ensemble des acteurs, dans et à l'extérieur de l'usine : optimisation des relations avec les fournisseurs (partage de planification de la chaîne d'approvisionnement), implication du client *via* des systèmes de design collaboratif, recours à la collaboration avec des centres de compétences (centres techniques, laboratoires de recherche, mise en commun de moyens..), meilleure collaboration en interne entre les différents services (conception, méthodes, fabrication, logistique, achats, qualité, marketing produit..).

Il est capital de faire en sorte que les différents modèles de pilotage de l'entreprise aux différents niveaux soient bien intégrés verticalement. Il est essentiel également que les différents niveaux de modélisation puissent évoluer en permanence sans perturber la production. Par exemple, on peut être amené dans la même période de temps, à introduire un nouveau fournisseur et à collaborer avec lui, à mettre en place une nouvelle procédure de suivi des flux écologiques, à optimiser une ligne de production, à déployer une ligne logistique autonome, à développer une station de fabrication additive, à équiper les hommes et les femmes de lunettes de réalité augmentée avec les instructions de production, à implémenter une station robotisée, à installer un système de tracking des produits à partir d'étiquettes RFID et de connexion au cloud, etc. Évidemment ces initiatives doivent pouvoir être étudiées et mises en œuvre en parallèle sans perturber la production. C'est là où le numérique est indispensable, pour gérer en permanence le jumeau numérique de l'usine réelle et planifier le déploiement de toutes ces initiatives de compétitivité.



Voir fiches : « Intégration et chaînage numérique des processus » ; « Digitalisation de la relation client » ; « Alliances technologiques ou géographiques ».

► ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL

Dans un contexte mondial de tensions sur les approvisionnements en matières premières, de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique, l'usine limite au maximum son empreinte environnementale et celle de ses produits.

La réduction des rejets et nuisances, l'efficacité énergétique, l'utilisation efficiente des ressources et l'implantation durable dans le territoire sont les enjeux environnementaux majeurs.

Sobre en carbone et en ressources non renouvelables, le site industriel met en œuvre des procédés de production à hautes performances énergétiques et environnementales. Elle s'inscrit dans une démarche d'écologie industrielle et territoriale (mutualisation des flux et des moyens entre entreprises proches).

Utilisant des bâtiments à haute qualité énergétique et environnementale, elle utilise une part croissante d'énergies renouvelables.

Dans le développement de ses produits, elle intègre la gestion environnementale à toutes les étapes de leur cycle de vie. En particulier, elle met en œuvre les principes de l'économie circulaire qui visent à « réduire, réutiliser, recycler » : ses produits sont éco-conçus, facilement recyclables et leur durée de vie est augmentée (remanufacturing, retrofit). Elle associe à ses produits l'offre de services relevant de l'économie de fonctionnalité afin de garder la maîtrise de l'ensemble du cycle de vie du produit.

Elle réduit son empreinte carbone, notamment liée à ses activités logistiques et aux déplacements professionnels de ses salariés.

L'ensemble de ces actions doit avoir un impact positif sur la performance économique globale.

Intégrer l'usine dans son écosystème local

L'enjeu principal sera de démontrer que le site industriel, économiquement compétitif, peut s'intégrer dans des écosystèmes urbains (à proximité des lieux de vie) ou ruraux. L'objectif sera de développer des solutions techniques de réduction du bruit, des rejets atmosphériques et aqueux et de recourir à des technologies propres de production. Par ailleurs, les bâtiments de haute qualité énergétique et environnementale auront une architecture intégrée dans le paysage local.

Au-delà de l'enjeu purement technique, un second concerne l'intégration organisationnelle et relationnelle de l'usine dans son écosystème, autour :

- ▶ de la logistique et des accès aux systèmes et infrastructures de transport permettant d'optimiser les flux entrants et sortants de l'usine (« logistique du dernier kilomètre » avec des véhicules propres) ;
- ▶ de l'intégration dans le système urbain et au réseau de transport pour le personnel et les visiteurs (intégration dans les quartiers durables, logistique d'évacuation et de traitement des déchets).

Des bâtiments à haute qualité énergétique et environnementale

Faire fonctionnel, pas cher et beau ! Finalement cet enjeu n'est pas nouveau. Au cours de l'histoire industrielle, ces trois thèmes de l'architecture ont été mis en œuvre à des degrés variés et des réussites diverses.

Dans les années 60/90, le fonctionnalisme l'a emporté avec des usines dont la seule fonction était d'abriter des ateliers souvent de taille importante et peu coûteux. L'espace est devenu, pour un temps, un enjeu mineur avec le développement de l'automobile qui a poussé les usines soit en banlieue, soit même à la campagne. Concilier les impératifs de la cohabitation des lieux de production et des lieux de vie redevient un challenge.

Les bâtiments industriels (de production, d'entreposage) doivent répondre avant tout à leur nécessité fonctionnelle. L'organisation des flux, leurs flexibilités potentielles dans l'espace, les nécessaires alimentations en tout genre (énergie, air comprimé, gaz, chauffage, électricité) sont à penser de telle sorte que leurs gestions et leurs destinations restent adaptables.

D'autres considérations deviennent aujourd'hui prégnantes. Les bâtiments doivent permettre de minimiser l'empreinte carbone. Dès la conception, les ressources en énergie et les consommations non productives doivent être pensées. Il n'est pas rare en effet que plus de 50 % de l'énergie d'un site industriel soit consommée par le chauffage et le reste par le process. Pour les entrepôts, l'enjeu énergétique est différent, la présence humaine étant plus restreinte, les besoins de chauffage le sont aussi.

L'utilisation des matériaux est essentielle pour donner un crédit carbone à l'usine, affranchie de l'énergie fossile (grâce, par exemple, au photovoltaïque) et végétalisée. L'industrie de demain sera aimable avec son environnement et plus acceptable grâce au cadre agréable fourni au travailleur. Dans la conception actuelle, les surfaces vitrées sont bannies en raison de leur coût. Or, la lumière est un facteur important de qualité de vie au travail mais aussi de confort. Il en est de même du bruit. Appliquer les techniques de diminution sonore est également possible pour le confort de tous.

Les bâtiments doivent être conçus pour permettre des modularités simples à mettre en œuvre. Les techniques actuelles et les matériaux doivent permettre de rendre les espaces plus lisibles (absence de poteaux). Ils doivent être économes en termes d'emprise foncière compte tenu de leur rapprochement des centres de vie. Les espaces de circulation et les pratiques de déplacement seront à traiter.

À l'extérieur, les bâtiments doivent s'intégrer aux paysages urbains. Le traitement des façades (matériaux divers, ruptures d'alignement, coloris...) permettent de rendre les lieux de production moins uniformes et surtout plus accueillants. De consommable sur 15 ans (c'est vrai pour les entrepôts), le bâtiment industriel doit devenir un lieu de vie sur une durée plus longue justifiant par là même, le surcoût potentiel que représente un aménagement et une construction plus en phase avec son intégration urbaine.

Mais 80 % des bâtiments actuels existeront toujours dans 30 ans...



Voir fiches : « Adaptation de la consommation d'énergie » ; « Technologies de réduction de la consommation énergétique ».

Concevoir et produire en maîtrisant les intrants de matière

Les enjeux principaux, relatifs aux flux de matières entrant dans le système productif concernent :

- ▶ la réalisation de la fonction demandée sur le produit par un dimensionnement au plus juste tout en garantissant la sécurité, la sûreté et les performances. La matière est alors économisée par une meilleure maîtrise du coefficient d'ignorance (ou de sécurité) ;
- ▶ la mise en œuvre des procédés de transformation permettant d'économiser directement, la matière et l'énergie pour réaliser des produits aux performances comparables à celles obtenues par des procédés traditionnels, à coûts de fabrication analogues.

Les deux démarches conception des produits et conception procédés de fabrication sont menées conjointement.

Les objectifs concernent donc :

- ▶ les méthodes de dimensionnement, et tout particulièrement le remplacement des méthodes de conception déterministes (tout est fait pour qu'il n'y ait jamais de rupture) par des méthodes fiabilistes qui prennent en compte la variabilité des matériaux, des procédés de fabrication et des usages, avec une démarche de maîtrise des risques ;
- ▶ les procédés de fabrication diminuant la consommation de matière, comme la fabrication additive ;
- ▶ le couplage entre la planification de production et les modalités d'anticipation de l'acquisition des matières premières afin d'optimiser la gestion des achats, des délais et des stocks.

La diminution de la consommation de matières, d'énergie, d'eau, etc. passe également par une diminution des rebuts et donc une meilleure maîtrise du procédé de fabrication. Cela implique de disposer de capteurs et systèmes de surveillance des procédés de fabrication permettant :

- ▶ de maîtriser les phases transitoires de montée en cadence et d'arrêt de production ;
- ▶ de détecter toute dérive des paramètres de process ;
- ▶ de détecter au plus tôt les pièces comportant des défauts ;
- ▶ de mettre en œuvre une maintenance prédictive basée sur la mesure.

Il s'agit de disposer de modèles fiables et adaptés aux besoins de l'entreprise permettant d'évaluer rapidement la pertinence technico-économico-environnementale des solutions envisagées en termes de conception, de dimensionnement et de fabrication pour assurer la compétitivité de l'entreprise.



Voir fiches :

« Économie circulaire » ; « Écoconception ».

Écoconception, recyclage

L'écoconception consiste à intégrer les problématiques environnementales dès la phase de conception de systèmes (qu'il s'agisse de produits, services ou processus industriels), afin d'en diminuer l'impact environnemental. Si l'on prend l'exemple d'un produit, la première étape consiste à évaluer les impacts environnementaux du produit actuel avant de mettre en œuvre des alternatives d'amélioration. Cette évaluation prend en compte toutes les étapes du cycle de vie du produit, de l'extraction des matériaux en passant par sa phase d'utilisation et jusqu'à sa fin de vie. On parle de vision du « berceau à la tombe » ou du « berceau au berceau ».

Pour réaliser cette évaluation, plusieurs méthodologies sont à disposition : l'analyse du cycle de vie (normalisée ISO 14040-44, qui nécessite des bases de données importantes et un temps d'étude conséquent) ou encore, pour les produits mécaniques, une méthode simplifiée en vue de son utilisation par des PME (normalisée NF E 01-005 et CEN/TS 16 524 au niveau européen).

Les pistes d'amélioration indiqueront s'il est plus pertinent d'agir prioritairement sur la phase d'utilisation du produit (efficacité énergétique, consommation d'eau...), la phase amont (diminution des consommations de ressources et de matières) ou la phase de fin de vie du produit (conception en vue du désassemblage pour faciliter le recyclage ou la réutilisation).

Ces démarches sont les plus efficaces quand le problème est traité « à la source ».



Voir fiche :

« Écoconception ».

L'objectif sera de favoriser ces démarches au sein des entreprises et de poursuivre les travaux engagés en normalisation pour rendre encore plus accessibles les méthodes, outils et données permettant de développer :

- ▶ les approches dynamiques de l'ACV ainsi que sa liaison avec les modèles économiques d'industrialisation et de diffusion des produits ;
- ▶ les données et l'accès aux bases de données relatives aux matériaux et aux procédés (y compris l'assemblage) ;
- ▶ le couplage de l'ACV initiale avec la réalité du produit tout au long de sa vie, par l'intégration de la maintenance et de la remise à niveau en cours de vie.

Un autre objectif de l'écoconception consiste à concevoir des produits qui permettront de favoriser leur réutilisation, leur recyclage, tout en développant l'intégration de matériaux issus du recyclage.

Notamment, il s'agit de concevoir et fabriquer des produits qui pourront être aisément désassemblés pour :

- ▶ faciliter l'évaluation des ensembles et des pièces après mise au rebut qui pourraient retrouver le statut de produit après avoir été analysés, expertisés, éventuellement réparés et requalifiés pour une réutilisation sur un périmètre défini ;
- ▶ faciliter le désassemblage et la déconstruction des produits pour faciliter leur traitement par les filières de recyclages.

Ce qui implique :

- ▶ l'évaluation des caractéristiques de matière, l'identification des défauts et l'évaluation de leur nocivité ;
- ▶ le dimensionnement de produits intégrant des pièces ou sous-ensembles recyclés et requalifiés après d'éventuelles réparations ;
- ▶ le désassemblage des produits, leur nettoyage, éventuellement leur désinfection et leur décontamination.



Voir fiche :

« **Fin de vie du produit** ».

Le dernier but est un impératif industriel qui consistera à élaborer des matériaux contenant des intrants issus du recyclage.

Pour cela, il conviendra de :

- ▶ les caractériser et accéder à leurs lois de comportement ;
- ▶ développer les procédés permettant de les mettre en œuvre, dans des conditions économiquement favorables et juridiquement stabilisées.

L'identification des filières de recyclage pertinentes, éventuellement les actions concourant à la mise en place de nouvelles filières, devront assurer le lien avec l'économie circulaire dans une vision des écosystèmes locaux. La mécanique, en tant que fournisseur de biens d'équipements pour les autres secteurs industriels, aura également à concevoir et industrialiser les machines permettant de réaliser et d'automatiser le désassemblage des produits, le tri des déchets, leur préparation pour réutilisation, la mise en œuvre de matériaux contenant des intrants issus du recyclage.



Voir fiches :

« **Économie circulaire** » ; « **Valorisation des déchets** ».

Effacité énergétique et réduction de l'empreinte carbone

L'enjeu principal est de réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂, ainsi que les coûts associés. Pour ce faire, on pourra développer, valider et mettre en œuvre des approches système pour la maîtrise de l'énergie en intégrant l'usine en tant que système énergétique interconnecté à son écosystème. L'usine devient économe en énergie, consommatrice et fournisseur d'énergie mise en réseau dans son écosystème (zone industrielle, agglomération, etc.), dans une optique d'écologie territoriale. Il s'agira également d'optimiser le système de production interne. Les procédés consommateurs et fournisseurs d'énergie, parties de l'usine, sont alors organisés pour optimiser la gestion de l'énergie en agissant au niveau des machines et des procédés, parties du système de production.

Il s'agit de disposer des outils et méthodes permettant :

- ▶ l'interconnexion intelligente de l'usine dans son écosystème énergétique : intégration dans les smart grids et outils de pilotage de l'énergie du site ;
- ▶ le stockage de l'énergie produite par l'usine, permettant de diminuer la consommation d'énergie achetée ;
- ▶ la gestion de sources d'énergie multiples internes et externes de caractéristiques différentes (solaire, éolien, récupérée dans le système de production) et la garantie de la qualité de l'énergie entrante dans le système de production ;
- ▶ l'optimisation des procédés pour limiter leur consommation énergétique par l'utilisation de machines fonctionnant avec des sources d'énergie multiples et la rationalisation des procédés pour les optimiser du point de vue énergétique ;
- ▶ l'optimisation des procédés et des utilités industrielles (air comprimé-vapeur) afin de limiter leur consommation énergétique par des développements technologiques sur les opérations ou fonctions élémentaires (mieux chauffer ou mieux refroidir, diminuer les frottements, lubrifier plus efficacement, etc.) ;
- ▶ l'optimisation de la consommation énergétique de l'usine en tenant compte des besoins des opérateurs (éclairage, ventilation, climatisation, etc.).

Plus spécifiquement, pour la réduction des émissions carbone, il convient de noter que toutes les actions précitées visant à réduire l'empreinte environnementale participent à la réduction de l'empreinte carbone des activités industrielles au sens large (fabrication, conception de produits...).

En particulier, les entreprises, à travers leurs connaissances de leur situation propre (mise en exergue par les bilans GES ou autre), agissent pour :

- ▶ favoriser l'achat de matériaux issus de la filière de recyclage avec une collaboration étroite avec leurs fournisseurs ;
- ▶ optimiser et gérer plus finement leur consommation d'énergie, avec par exemple un travail d'amélioration continue de l'efficacité énergétique de leurs procédés par la mise en place de plans de comptage et la sensibilisation des salariés ;
- ▶ s'approvisionner localement en matériaux et produits semi-finis ;
- ▶ réduire l'empreinte des transports, en mettant notamment en place un plan de déplacement entreprise ou inter-entreprises (moyens de locomotion communs en partage, incitation à l'utilisation de transports en commun ou du co-voiturage).



Voir fiches : « Adaptation de la consommation d'énergie » ; « Technologies de réduction de la consommation énergétique » ; « Procédés propres ».

► ENJEUX MAJEURS SUR LE PLAN SOCIÉTAL

Les impacts de l'activité des entreprises, notamment industrielles, sur la société sont devenus plus prégnants. Ils touchent non seulement le domaine d'activité propre à ces entreprises, la production de biens et de services, mais ils génèrent également de nombreux effets induits (externalités) qui se manifestent dans de multiples domaines comme le fonctionnement de l'économie, la santé, l'environnement, la solidarité, etc. Le développement de la responsabilité sociétale des entreprises ne relève ni d'un vœu pieu ni d'une obligation mais davantage de la mutation d'un système technico-économique sous tendu par des valeurs et des droits.

L'industrie doit se réconcilier avec la société et s'insérer harmonieusement dans son écosystème de proximité. Elle doit réduire ses nuisances pour permettre son implantation au plus près du cœur des villes et ainsi limiter les nécessités de transports des collaborateurs.

De nouvelles compétences professionnelles seront nécessaires. De nouveaux métiers émergent et continueront d'émerger. Citons l'APEC (les métiers en émergence 2015) : responsable des données numériques, ingénieur cybersécurité, technicien robotique, mécatronique, responsable e-CRM, ingénieur virtualisation, responsable supply chain, responsable GPEC et talents (gestion prévisionnelle des emplois et compétences)...

Dans un système de production fondé sur des technologies avancées, les ressources humaines doivent se former en permanence pour que les compétences puissent s'adapter rapidement aux évolutions techniques. L'homme aura besoin de s'adapter, de travailler sur lui-même, pour être efficace dans ce nouveau contexte. Il est donc essentiel de bien identifier les ressources à mobiliser dans l'organisation du travail et la formation pour développer les compétences. De même, la capitalisation des compétences, l'assistance aux travailleurs âgés, la mise en place de processus collaboratifs, intuitifs et performants, l'e-apprentissage intuitif, l'auto-formation, etc. sont indispensables pour disposer des ressources humaines nécessaires.

Enfin, il est indispensable d'améliorer l'image de l'entreprise en donnant une vision attractive pour les jeunes générations de l'Industrie du Futur. Le devenir des systèmes industriels et des systèmes de production, qui n'a été abordé, dans les années précédentes, que par le décompte des emplois supprimés et des fermetures d'usines, redevient un enjeu de développement des sociétés française et européenne. Une des ambitions politiques majeures du plan « Industrie du Futur » est de conserver et développer une activité industrielle forte, innovante, exportatrice, créatrice de richesses et génératrice d'emplois.

L'Industrie du Futur est construite autour de l'homme et de ses savoir-faire

Elle privilégie le bien-être des salariés, l'évolution de leurs compétences et leur collaboration au projet de l'entreprise. Elle doit attirer les talents et capitaliser sur les expertises dont elle a besoin pour son développement, et faire fructifier son « capital humain ». Son organisation permet de cultiver l'efficacité et la créativité de ses salariés, qui sont d'ailleurs incités à développer en continu leurs talents et capacités. Leurs implications et contributions à la prise de décisions sont encouragées. L'allègement de certaines tâches (davantage d'informations relatives aux processus traités directement par les machines) offre l'opportunité pour les salariés de mieux utiliser leurs intelligences individuelles et collectives pour traiter des


informations de nature stratégique. Cela implique en corollaire une évolution des modes de relation avec les autres : acceptation de l'incertitude, tolérance et bienveillance à des idées nouvelles.

Ressources humaines adaptées aux nouveaux enjeux et à l'allongement de l'activité professionnelle, formation tout au long de la vie (*e-learning*), capitalisation des connaissances et transmission des compétences, autonomie des opérateurs, connaissance des langues étrangères, implication dans le développement de l'entreprise sont autant de sujets au cœur de la démarche.

Avec une nécessaire flexibilité, mais aussi avec la montée en complexité des produits et des services associés, les machines du futur devront de plus en plus interagir et coopérer avec l'opérateur. Les robots seront collaboratifs (travail conjoint et sans barrières physiques entre l'homme et le robot *via* des interfaces intuitives), voire pourront jouer un rôle démultiplicateur de la force humaine, comme c'est le cas avec la cobotique et les exosquelettes.

L'enjeu de l'Industrie du Futur est d'offrir un modèle où l'opérateur agit et prend des initiatives sur une chaîne de production robotisée, un peu à la manière d'un jeu vidéo. L'objet mécanique devient, au niveau de la chaîne qui s'étend de la conception à la distribution, en passant par la fabrication, un objet réglable que l'opérateur manipule au gré d'une demande client évolutive et changeante, en pouvant simuler ses choix sur un modèle virtuel. Ceci induit des remises en cause, des destructions d'emplois pour en créer d'autres, plus qualifiés, pour inventer de nouveaux métiers, et faire rimer ingéniosité avec flexibilité. Ceci implique aussi un profond remaniement des réglementations relatives à la sécurité au travail.

L'homme, au cœur de l'Industrie du Futur, accompagne l'évolution de la demande client, impliquant une attention particulière à la formation initiale mais aussi à la formation tout au long de la vie professionnelle. Les produits et les processus changeront régulièrement et de plus en plus rapidement, d'où un besoin de réactivité grandissant et de formation continue.

 **Voir fiches : « Intégration du facteur humain » ; « Nouveaux outils de gestion des connaissances et des compétences » ; « Nouveaux outils de management et d'empowerment ».**

Développer la responsabilité sociétale des entreprises (RSE)

La RSE est une dimension incontournable du management de l'entreprise et représente un axe fort de compétitivité pour les entreprises. L'Industrie du Futur doit intégrer les principes généraux de l'ISO 26000 (redevabilité, transparence, comportement éthique, reconnaissance des intérêts des parties prenantes, respect du principe de légalité, prise en compte des normes internationales de comportement, respect des droits de l'homme).

Pour les entreprises de la mécanique, un guide « RSE : démarche au service de la stratégie et de l'efficacité des PME mécaniciennes » (guide normatif NF FD E 01-001) propose une approche basée sur l'amélioration continue, à travers un projet d'entreprise dont l'objectif est de renforcer la compétitivité et d'anticiper l'évolution des marchés. L'Industrie du Futur s'inscrit donc dans cette démarche globale de progrès des organisations.

 **Voir fiche : « Veille, prospective et intelligence économique ».**

Le rôle des parties prenantes

Avec l'Industrie du Futur, des acteurs récents (le citoyen, le membre des réseaux sociaux et les ONG) tout aussi légitimes que les acteurs historiques (les pouvoirs publics et les partenaires sociaux...) rentrent dans le cercle des acteurs clés des systèmes de production. Il faut inventer et construire la manière d'interagir entre tous ces acteurs de logiques et de cultures différentes.

L'usine dans la ville

Plus intégrée, plus connectée, économiquement compétitive, au cœur des territoires mais ouverte sur le monde, proche des acteurs de son écosystème, l'Industrie du Futur contribuera à la dynamisation de son réseau et de l'économie locale.

La prise en compte des critères d'acceptabilité par les citoyens, d'implantation ou de maintien d'une usine à proximité de leur habitation est essentielle pour limiter les déplacements des personnes et réduire ainsi l'impact environnemental, pour limiter les besoins de réseaux de transports et les investissements publics afférents.

De nouvelles solutions techniques permettant de réduire le bruit des activités industrielles tant au niveau de la production, de la manutention que des flux logistiques (véhicules propres...), de maîtrise des rejets et le recours à des technologies propres et sûres de production, permettront d'envisager de rapprocher les usines des zones d'habitation, au moins pour une partie d'entre elles. Des architectures de bâtiment favorisant l'intégration dans le paysage urbain (design architectural, usine compacte, à faible impact visuel) aideront à insérer harmonieusement le site industriel dans son écosystème de proximité.



**LES LEVIERS
DE COMPÉTITIVITÉ
ET LE RÉFÉRENTIEL
DE L'INDUSTRIE DU FUTUR**

Dans les chapitres précédents, le concept de l'Industrie du Futur, ses enjeux et les moyens d'y parvenir ont été explicités. Ces moyens se déclinent en composants décrits par les fiches de la deuxième partie de ce guide, formant une boîte à outils dans laquelle chacun pourra y puiser les éléments nécessaires au démarrage et au maintien efficace de sa transition.

Les composants de la boîte à outils, faisant l'objet chacun d'une fiche explicative (voir partie 2), sont déclinables en concepts de plus faible granulométrie. Si l'on prend l'exemple de la fiche « Systèmes numériques de contrôle-commande », ce composant regroupe les aspects « commande numérique », « PLC (*Programmable Logic Contrôleur*) », « DCS (*Distributed Control System*) » et « SNCC (système numérique de contrôle-commande) ».

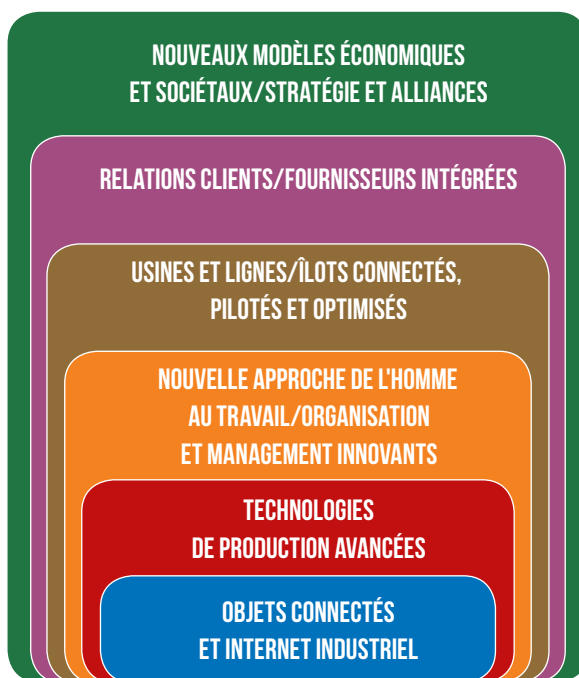
Ces aspects forment des briques technologiques et organisationnelles de base et les composants (expliqués dans les fiches) forment les macro-briques de l'Industrie du Futur.

L'ensemble des macro-briques constitue un modèle de l'Industrie du Futur et devient un référentiel pour aider les entreprises dans leur démarche.

Les leviers de compétitivité

L'agencement des macro-briques par logiques d'action permet de structurer la démarche de transition vers l'Industrie du Futur. Elles sont de véritables leviers de compétitivité qui s'embroient en partant du plus bas niveau (les composants de l'outil de production) vers le plus haut niveau (le positionnement de l'entreprise sur les marchés), en passant par la mise en valeur du plus grand capital de l'entreprise : les hommes et les femmes qui la composent.

Le modèle de l'Industrie du Futur peut donc se représenter par le schéma suivant :



Cette répartition des composants, ou macro-briques technologiques et organisationnelles, permet de bien les visualiser et de faciliter la construction d'un plan de transition global de l'entreprise logique et réparti sur plusieurs années.

Objets connectés et Internet industriel

On est ici au niveau des réseaux de terrain dans l'atelier. On y retrouve des objets connectés (par exemple des capteurs sur des équipements pour qu'ils puissent dialoguer entre eux, dialoguer avec le produit). Il est nécessaire de disposer de supports de transmission des informations entre ces dispositifs et, ici, la cybersécurité est au cœur des problèmes de protection contre les malveillances. Il faut absolument se protéger d'une mauvaise action qui, via un simple smartphone, viendrait attaquer directement les paramètres de pilotage de sa production et impacter sur la qualité ou la sécurité des produits.

Ce sont des technologies qui permettent de connecter les produits entre eux, avec les machines, voire ces dernières entre elles, le tout grâce à des infrastructures sécurisées.

On y trouve, par exemple, des capteurs autonomes et communicants (RFID), des cartes d'acquisition pour collecter les données physiques telles que le bruit, la température, la puissance de broche, couple... Les réseaux industriels permettent de transporter l'information captée au niveau du « terrain » pour la mettre à disposition des niveaux supérieurs. Cela alimente le big data.

Technologies de production avancées

Ce sont des procédés et des matériaux qui sont à la pointe de la technologie et écoresponsables. Nous retrouvons, par exemple, les aciers à très haute performance, les matériaux biosourcés, la fabrication additive, les procédés propres et économes en énergie, la robotique, les machines multifonctions...

Ces nouvelles générations d'équipements vont considérablement renforcer la capacité d'adaptation de l'outil productif.

Nouvelle approche de l'homme au travail/organisation et management innovants

Il y a d'abord les technologies numériques qui permettent de se passer de papier et de doter l'opérateur de multiples informations lui permettant de surveiller et d'optimiser le process. De plus, des équipements l'assisteront, voire le libéreront de ses gestes répétitifs et dangereux. L'opérateur pourra ainsi mobiliser toute sa disponibilité sur des tâches cognitives et à haute valeur ajoutée. L'opérateur pourra se former en continu et renforcer sa polyvalence par des outils de réalité augmentée par exemple. Notons que tout cela aura une incidence majeure sur les organisations et les modes de management. L'entreprise aura bien plus besoin d'animateurs que de chefs dans le futur.

L'Industrie du Futur utilise les capacités cognitives de l'homme et de la femme : leur intelligence, leur capacité à interpréter des situations complexes et à définir des stratégies de réaction adaptée. Désormais l'homme est plus superviseur qu'opérateur, il utilise la machine pour les tâches nécessitant de la force, de la répétabilité et pour les actions longues et pénibles.

Il est aidé par des applications mobiles qui le renseignent sur l'état de fonctionnement et la performance des équipements pour le guider dans ses actions. Il développe ainsi son autonomie et sa polyvalence.

Usines et lignes/îlots connectés, pilotés et optimisés

Les îlots, les lignes et les usines vont être connectés, optimisés et pilotés en s'affranchissant des organisations linéaires et des fonctionnements en silos.

Dans l'Industrie du Futur, les processus linéaires avec conception/simulation puis industrialisation/production puis maintenance/amélioration vont disparaître. Demain on va, avant même d'avoir créé le moindre élément matériel d'une ligne de production, la concevoir complètement, la qualifier, la tester, l'optimiser et former les opérateurs.

L'acheminement des pièces dans l'atelier sera de plus en plus automatisé pour devenir fluide et flexible. Les allers-retours entre le physique et le numérique vont se multiplier, s'entremêler.

L'évolution des produits est optimisée par la visualisation de prototypes 3D directement sur la ligne de fabrication.

Dès aujourd'hui, les informations sont collectées sur le terrain puis analysées en temps réel pour agir directement sur le process ou pour alimenter l'aide à la décision de l'opérateur.

Lorsqu'une dérive est détectée, une information de correction est directement transmise à l'équipement à l'origine du problème, qu'il soit dans l'usine ou chez un fournisseur.

Tout cela va complètement changer la relation de l'homme au travail et les modes de pilotage des ateliers.

Relations clients/fournisseurs intégrées

L'Industrie du Futur sera conçue de manière à fonctionner en réseau, des fournisseurs aux clients, à recomposer facilement sa chaîne de valeur afin de s'adapter aux évolutions du marché et des technologies et à mettre à disposition un outil de production flexible et reconfigurable. Il est nécessaire de mettre en œuvre des technologies spécifiques relevant essentiellement du domaine du numérique. Le client vient s'inviter dans la conception des produits et dans le lancement des ordres de fabrication et le fournisseur reçoit automatiquement des commandes et des dates de livraison prévues en fonction des commandes reçues du client final. Les flux sur l'ensemble de la supply chain sont planifiés à partir des commandes dont une partie grandissante se fera par Internet. Il va falloir apprendre à travailler en co-innovation, en mode collaboratif, et il faudra dans ce cadre maîtriser la propriété intellectuelle.

Le client est ainsi à la fois acheteur, concepteur et producteur. On parle parfois de *producers*. De son e-phone il conçoit un produit qui lui est personnalisé, en passe la commande et de ce fait génère sa fabrication en flux tiré qu'il peut suivre jusqu'à la livraison.

Nouveaux modèles économiques et sociétaux/stratégie et alliances

La responsabilité sociétale est une composante de la mise en œuvre du développement durable. Elle caractérise la volonté d'une organisation d'intégrer des considérations environnementales et sociétales dans sa stratégie pour être en mesure de répondre des impacts de ses activités et décisions sur l'environnement et la société.

Un outil industriel et une supply chain, fussent-ils d'avant-garde et très bien organisés, ne créeront de la valeur que s'ils sont mis au service d'un usage, d'une demande et d'un besoin identifié. Aussi, toute réflexion stratégique doit être basée sur une vision plus large qui croise les demandes des clients, de la société, de ses partenaires et les capacités financières mobilisables. On abordera des aspects aussi larges que :

- ▶ prospective ;
- ▶ chaînes de valeur et offres du futur ;
- ▶ nouveaux modèles économiques ;
- ▶ ruptures marketing et ruptures stratégiques ;
- ▶ capacité d'investissement ;
- ▶ alliances technologiques ou géographiques ;
- ▶ internationalisation et développement de l'export ;
- ▶ portefeuille de solutions, de marchés, de territoires et de partenaires ;
- ▶ entreprise agile et étendue.

Le référentiel de l'Industrie du Futur

Nous avons vu que, pour répondre aux différents enjeux, un ensemble de macro-briques technologiques et organisationnelles, formant 6 leviers de compétitivité, est en fait une boîte à outils pour aider les entreprises à accéder à l'Industrie du Futur.

Le package "Leviers de compétitivité/thématiques/macro-briques" (les thématiques sont introduites pour faciliter la mise en famille des macro-briques de nature similaire) constitue le référentiel de l'Industrie du Futur.



FICHES THÉMATIQUES

▶ OBJETS CONNECTÉS ET INTERNET INDUSTRIEL	51
▶ TECHNOLOGIES DE PRODUCTION AVANCÉES	71
▶ NOUVELLE APPROCHE DE L'HOMME AU TRAVAIL/ORGANISATION ET MANAGEMENT INNOVANTS	115
▶ USINES ET LIGNES/ÎLOTS CONNECTÉS, PILOTÉS ET OPTIMISÉS	130
▶ RELATIONS CLIENTS/FOURNISSEURS INTÉGRÉES	157
▶ NOUVEAUX MODÈLES ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX/STRATÉGIE ET ALLIANCES	164

FICHE 7

CAPTEURS AUTONOMES ET COMMUNICANTS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les capteurs autonomes s'autoalimentent en récoltant l'énergie disponible dans l'environnement (énergie solaire, vibratoire, thermique...). Ils transmettent, sans fil, les informations vers d'autres capteurs ou vers une unité de traitement.

Leur faible consommation est impérative pour garantir un équilibre énergétique avec les faibles niveaux d'énergie collectée. Il faut donc privilégier :

- une architecture simple ;
- une électronique intégrée basse consommation ;
- des boucles de calcul et de communication optimisées et réduites au strict nécessaire ;
- le traitement local des données collectées pour en extraire une information pertinente et minimiser la communication.

Les capteurs autonomes doivent disposer de protocoles cryptés et sécurisés. Ils utilisent souvent des matériaux de dernière génération : matériaux à mémoire de forme, polymères électro-actifs, etc. Leur fiabilité et leurs prix sont bien évidemment des points attendus par les utilisateurs.

Principales applications de ces capteurs :

- suivi de variables environnementales ;
- cartographie dynamique de l'évolution des variables ;
- optimisation des réseaux et des systèmes de production intelligents, ensemble intégré de produits ;
- détection des défaillances au cœur des systèmes.

Principaux types de capteurs et mesures concernées :

- capteurs d'effort, de couple, de pression, de température, de déplacement, de niveau, de concentration, de vibration...

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Ils permettent de faciliter la transition vers des systèmes de production plus intelligents, sans nécessiter forcément de gros investissements.
- Le fonctionnement des systèmes et des réseaux de communication s'en trouve optimisé et donc les gains en termes d'économie et d'environnement durable sont importants.
- La facture énergétique est nulle.

Sur le plan technologique

- L'information collectée peut être traitée en tout ou partie de façon locale.
- Les machines numériques et les automatismes peuvent s'adapter aux conditions réelles de leur environnement et de leur fonctionnement.
- Des capteurs virtuels peuvent être créés et permettent l'optimisation du nombre d'informations extraites d'un réseau de capteurs donné (un capteur virtuel se comporte et remplace, pour l'utilisateur, un réseau complet de capteurs réels).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- En respectant les exigences réglementaires et les politiques engagées, les capteurs autonomes et communicants permettent de rendre les réseaux et les systèmes intelligents par le déploiement progressif des technologies de l'information et de la communication.
- Ils peuvent aider à intégrer une véritable culture de l'information et appréhender la complexité de traitement et de valorisation de ces importants gisements de données.

FICHE 7

CAPTEURS AUTONOMES ET COMMUNICANTS

Sur le plan environnemental, sociétal

- Les capteurs autonomes et communicants sont des outils qui permettent aux exploitants de contrôler et de diagnostiquer les problèmes, de prioriser et de gérer les opérations de maintenance, en continu et à distance, et d'exploiter les données collectées pour optimiser tous les aspects de la performance du système de production ou du produit (et de ses usages).
- Ils peuvent fournir aux consommateurs les informations et les outils dont ils ont besoin pour adapter leurs comportements, leurs consommations et leurs usages.

▶ **LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique

- Miniaturisation et performance des convertisseurs d'énergie.
- Batteries spécifiques miniaturisées, adaptées à des conditions extrêmes.
- Intégration dans les matériaux, films et revêtements.
- Intégration mécanique, électrique, électronique et logicielle.

Au niveau numérique

- Traitements informatiques proche du temps réel.
- Défis concernant les volumes de données nécessitant des traitements additionnels, du stockage et des fonctions d'administration.

▶ **MATURITÉ DE L'OFFRE**Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Les compétences à maîtriser sont celles de l'automatique, de l'informatique, de l'électronique et des protocoles radio, notamment pour l'utilisation efficace des capteurs autonomes et communicants et pour leur maintenance ou remplacement en cas de dysfonctionnement.
- Des connaissances complémentaires en matériaux et conversion d'énergie permettront de mieux analyser les situations de fonctionnement dégradé potentielles.

Les questions à se poser

- Quelle fréquence de communication des données est réellement nécessaire ?
- Quelle fréquence d'enregistrement des données est nécessaire ?
- Quel est le besoin d'autonomie du système (de quelques heures à plusieurs dizaines d'années) avec une consommation énergétique optimisée ?
- Définir les conditions d'utilisation du produit communicant (durée de vie, débit, portée, volume de données).

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

FICHE 11

COMMUNICATION ET AGILITÉ DES MACHINES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le concept d'Industrie du Futur (encore appelé Industrie 4.0 en Allemagne) correspond à l'adaptation des processus industriels via la mise en place d'usines dites « intelligentes » (*smart factories*) capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle évolution industrielle.

L'Industrie du Futur vise à augmenter l'agilité des entreprises et à produire des produits spécifiques et customisés au prix de la série. La transformation des sites industriels en usines connectées passe par la création d'outils de production communicants. Elle réduit les étapes de communications entre la demande client et la mise en place des chaînes de production pour y répondre.

L'Industrie du Futur ne se résume pas à la robotisation, elle concerne aussi la différenciation des produits. Elle ne résulte pas seulement de la digitalisation de l'information avec le développement de technologies comme les objets connectés (IoT), la réalité virtuelle ou augmentée, le cloud computing et le big data. Elle répond avant tout aux enjeux du monde VUCA (*volatile, uncertain, complex and ambiguous*) et aux changements de comportements des consommateurs.

L'industrie doit faire preuve d'intelligence, d'agilité et d'innovation pour faire évoluer ses méthodes de production grâce à des technologies qui complètent et assistent le travail humain (applications robotisées collaboratives – technologies émergentes de la robotique industrielle) et réduisent les accidents industriels causés par la défaillance des processus. Les interfaces homme-machine (IHM) peuvent utiliser des capteurs, des robots, des systèmes sans fil, des logiciels, la communication M2M pour collecter et analyser des données. Ces données peuvent servir à gérer les opérations ou à mettre les sites de production en relation avec les systèmes robotisés de l'usine, le back-office de l'entreprise, ses partenaires et fournisseurs, tout au long de la chaîne logistique.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

L'automatisation et l'intelligence intégrée visent principalement à réduire le nombre d'interactions humaines tout en augmentant leur qualité, pour garantir une meilleure réactivité. Le développement de l'intelligence artificielle dans l'industrie peut entraîner une réduction du nombre d'interfaces homme-machine, tout en leur donnant plus d'importance lorsque les machines nécessitent une intervention humaine. Dans un système intelligent, un flux de production régulier ne requiert aucune surveillance humaine. C'est lorsqu'une machine anticipe ou détecte une anomalie, qu'elle est incapable de corriger qu'une intervention humaine et une prise de décision sont nécessaires.

- Améliorer le contrôle de la qualité, réduire les temps d'arrêt, augmenter la vitesse et le rendement des processus industriels.
- Permettre des prises de décision en temps réel au sein des processus d'usines.
 - > Alertes sur les défauts critiques dans la qualité de l'assemblage non visibles à l'œil humain.

Sur le plan technologique

Une IHM industrielle se doit d'être robuste, fiable et résistante, surtout lorsque les opérateurs travaillent dans un environnement bruyant, poussiéreux, humide et sombre. Dans l'usine connectée où l'intervention humaine se cantonne essentiellement aux prises de décisions stratégiques, la présentation des données constitue un volet très important du design. Elle ne doit pas se limiter aux affichages et aux écrans tactiles. Elle doit aussi intégrer la réalité augmentée, la reconnaissance de la parole et la synthèse vocale, et la visualisation de données intuitives. Dans les domaines de la maintenance et de la réparation, les lunettes de réalité augmentée auront un rôle important à jouer au sens où elles montreront l'impact des données issues des capteurs et les transmettront au technicien afin qu'il puisse rapidement résoudre le problème. Les données

FICHE 11

COMMUNICATION ET AGILITÉ DES MACHINES

pourraient être diffusées en live streaming *via* des affichages visuels facilitant la compréhension.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Adaptabilité de la production par rapport à la demande : les moyens de production doivent s'adapter à une demande variable tant en quantité qu'en évolution de produit. Les moyens de production et l'ensemble de la supply chain doivent acquérir de l'agilité pour être en mesure de réagir rapidement aux évolutions du marché.
- Personnalisation des productions : les grandes séries se raréfient et les industriels doivent gérer un portefeuille de produits de plus en plus complexe avec des délais/budgets d'industrialisation de plus en plus courts. Ceci nécessite un outil de production plus efficace (efficacité, moins de défauts, moins de pannes) avec un apprentissage accéléré. Le partage de l'information avec les machines *via* la digitalisation des données est un levier d'action.
- Flexibilité (agilité) des processus : les processus internes de l'entreprise doivent pouvoir rapidement faire face aux changements (cycle de vie de l'article, supply chain, sous-traitance et partenariat, processus collaboratif). Le système d'information doit pouvoir s'adapter pour faciliter et porter ces changements.
- Traçabilité : elle représente un enjeu majeur, que ce soit pour des raisons de qualité, de réglementation, de service client ou de protection du marché. Nous pouvons la segmenter en deux types de traçabilité : track and trace.
 - > *Tracking* (traçabilité logistique) : correspond à un suivi quantitatif. Il permet de localiser les produits, déterminer les destinations et les origines.
 - > *Tracing* (traçabilité produit) : permet de reconstituer qualitativement le parcours des produits. On l'utilise pour rechercher les causes d'un problème qualité.
- Culture d'entreprise et management : une démarche Industrie 4.0 bouleverse la culture d'entreprise qui doit en être considérée comme la pierre angulaire. Elle consiste

à réorienter l'ensemble de l'entreprise autour du client, passant ainsi d'une logique d'offre à une orientation sur la demande. Elle se manifeste par plus de transversalité, de collaboration et d'agilité en brisant les silos de l'entreprise. Les impacts sur l'organisation du travail, les hommes et leurs compétences sont nombreux (décentralisation des décisions, environnement de travail modifié, développement de nouvelles compétences numériques, capitalisation et partage des connaissances...).

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Connecter les machines industrielles à Internet en toute sécurité et faciliter l'accès distant et la collecte d'un large éventail d'informations émanant des machines industrielles.
 - > Éliminer les barrières qui séparent les applications industrielles et les normes informatiques.
- Doter leurs machines connectées d'une intelligence artificielle et leur conférer un langage aux applications multiples.
- Mettre au point des machines industrielles cognitives : des machines en mesure d'exploiter les données récoltées par leurs capteurs pour détecter, analyser, optimiser et prendre des mesures dans la chaîne de production.
 - > Solutions capables de fournir en temps réel des données cognitives et prédictives pour optimiser les opérations et la maintenance des réseaux intelligents (smart grids).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Des compétences sur l'ensemble de la chaîne de valeur des données, de leur production à leur valorisation, en passant par leur caractérisation et leur exploitation.

Les questions à se poser

- Définir les objectifs d'une montée en intelligence des machines et en caractériser les différents jalons techniques.

FICHE 11

COMMUNICATION ET AGILITÉ DES MACHINES

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 12

COMPOSANTS ET SOUS-SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La filière électronique joue un rôle primordial dans nos économies modernes tant elle a permis l'essor de nombreux secteurs d'activité : transports, sécurité, santé, aéronautique... Et plus récemment, les objets connectés. Toutefois, avec la possibilité de produire à moindre coût à l'étranger, une part importante de la production électronique est désormais délocalisée ou externalisée, c'est le cas notamment de la quasi-totalité de l'assemblage des grands volumes de l'électronique grand public. C'est l'Asie, et en particulier la Chine (avec 50 % de la production mondiale), qui concentre la majorité des activités de production des équipements électroniques (contre 22 % pour l'Europe). Cependant grâce à un écosystème et une chaîne de valeur complète (de la R&D en amont à l'assemblage en aval), la France est devenue très compétitive dans le domaine de l'électronique à forte valeur ajoutée, occupant ainsi la première position dans l'industrie européenne des composants électroniques et de l'électronique industrielle.

Principales applications de ces technologies : la filière se caractérise par un phénomène de pervasion, à savoir la pénétration croissante et progressive de l'électronique dans différents secteurs d'activités.

- Spatial et défense : satellites, observation, lanceurs...
- Aéronautique : avionique, systèmes de guidage.
- Automobile : véhicules connectés, véhicules électriques.
- Télécommunications : R&D sur la 5G et le déploiement des réseaux fibre optique (FTTH).
- Médical : chirurgie oculaire, échographie, *lab-on-chip*, implants, micro-pompes, dispositifs médicaux.
- Biens de consommations : téléphonie, ordinateurs, tablettes, systèmes de géolocalisation.
- Industriel : machines spéciales, automatismes, robotique...

Principaux segments technologiques concernés :

- composants actifs (circuits intégrés, mémoires, micro-processeurs, etc.) ;
- composants passifs (condensateurs, résistances, self, piézo, magnétiques, etc.) ;
- composants RF et hyperfréquence ;
- connectique ;
- cordons câblés ;
- circuits imprimés ;
- plastronique - électronique imprimée ;
- composants électromécaniques (relais, commutateurs, claviers, etc.) ;
- capteurs (contacts à distance) ;
- oscillateurs (quartz, etc.) ;
- MEMS ;
- boîtiers hybrides ;
- LTCC, HTCC, SSI.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Secteur fortement mondialisé : les entreprises européennes et françaises de la filière font face à une pression concurrentielle importante de la part de pays émergents en termes de coût de production et de main d'œuvre. Il y a un besoin fort d'innovation pour rester compétitif.
- De 1 140 milliards d'euros en 2008, le marché de la production électronique a presque doublé pour atteindre près de 2 000 milliards en 2016. L'ensemble des acteurs de la filière a affiché une activité en croissance, de 3 à 5 % en moyenne, voire supérieure (+ 20 % en S/C).
- La compétitivité gagnée permet déjà la réintégration de productions délocalisées, y compris sur des séries importantes et sur des marchés à fort potentiel tel que l'automobile.

FICHE 12

COMPOSANTS ET SOUS-SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

Sur le plan technologique

- Course à l'innovation autour de la miniaturisation des composants et des sous-systèmes électroniques depuis des décennies pour intégrer plus de transistors et de fonctionnalités sur un même circuit.
- Stratégie *more than Moore* ou *beyond Moore*.
- Nouvelles méthodes de refroidissement des composants électroniques pour réduire leur consommation d'énergie tout en augmentant leur durée de vie.
- Tenue accrue aux interférences magnétiques (CEM). Respect strict des réglementations environnementales (REACH, RoHS).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Une forte adaptabilité, une production en plus petites séries et la nécessité de polyvalence entre les champs d'activités sont recherchées par les établissements positionnés sur les marchés professionnels.
- Échelle nanométrique, robotisation accrue, nécessité de fabrication « en salle blanche » et un cycle de vie très court entraînant une obsolescence rapide obligeant les acteurs à s'adapter.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Accroissement de la spécialisation géographique de la production électronique à l'échelle planétaire (50 % de la production mondiale en Chine).
- Équipement croissant des pays émergents qui constituent actuellement les foyers de croissance les plus importants.
- Nouvelles technologies pour réduire l'empreinte énergétique et environnementale de la production de composants et de sous-systèmes électroniques.
- Nouveaux procédés de traitement et de recyclage des terres rares et métaux critiques.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Accélération du rythme des innovations due aux exigences accrues de gains de productivité.
- Intégration progressive des composants électroniques dans les systèmes embarqués avec des contraintes d'environnement sévères.
- Défis technologiques sur la consommation d'énergie, la sécurité des données, l'accessibilité en tout lieu, la fiabilité.
- Innovations au niveau des matériaux et des architectures qui permettront d'augmenter les performances des circuits intégrés et des autres composants (condensateurs, PCB, connecteurs...).

Au niveau numérique

- Gestion des milliers de références en temps réel, de l'automatisation et de l'exploitation de la data au sein d'usines de production digitalisées et orientées usine du futur.
- Projets de cobots et de véhicules autonomes, qui pourront à terme venir alimenter les machines de placement CMS, et d'exosquelettes pour soulager les opérateurs en production.
- Confidentialité des données, connectivités (débits).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Manque de main d'œuvre dans certains secteurs de l'électronique : l'électronique analogique et HF (en particulier l'électronique de puissance) et l'électromagnétisme notamment.
- Difficulté de trouver des profils intermédiaires de techniciens spécialisés : technicien d'études, technicien de développement, technicien d'essais, technicien méthode industrialisation procédés en fabrication électronique, technicien de tests et validation.

FICHE 12

COMPOSANTS ET SOUS-SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES

- Manque de candidats sur le marché du travail pour le métier de conducteur de machine automatisée en production électronique.
- Compétences attendues pas entièrement satisfaites sur les métiers de câbleur filaire en électronique, cartes imprimées et prototypes.
- Convergence des compétences en mécanique, en électronique et en logiciel avec un niveau d'engagement souvent élevé qui suppose des chefs de projets polyvalents.

Les questions à se poser

- Taux de pénétration de la fabrication additive pour du prototypage ultra rapide de circuits imprimés professionnels.
- Une expansion des composants électroniques dans de nouveaux secteurs, en réponse à de nouveaux besoins économiques et sociétaux, qui requièrent notamment la gestion d'informations en temps réel et l'utilisation de puces RFID ou microcontrôleurs : sécurité (systèmes de surveillance, cybersécurité), efficacité énergétique, qui touche plusieurs secteurs tels l'automobile (véhicules électriques) ou la domotique (gestion et régulation de l'énergie) et la télésanté (systèmes domestiques d'aide à la médicalisation).

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 17

CYBERSÉCURITÉ

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La cybersécurité consiste à assurer que les ressources numériques d'une entreprise, qu'elles soient matérielles (ex : puce, calculateur, PC, robots, machines à commandes numériques), logicielles (ex : programmes et données) ou de communication (ex : wifi, Internet), soient préservées de toute attaque, qui les détournerait de leur fonctionnement initialement prévu.

Elle vise à obtenir pour les outils, les services et les données :

- la disponibilité (ex : l'opérateur a accès à sa machine au moment où il en a besoin, y compris quand son fonctionnement et/ou les conditions d'utilisation sont dégradés) ;
- l'intégrité, c'est-à-dire la conformité des caractéristiques conformes à ce qui est attendu. (ex : la machine réalise l'action demandée et uniquement celle-là, y compris avec un fonctionnement dégradé en cas d'attaque) ;
- la confidentialité des accès (ex : en toutes circonstances, les données clients restent confidentielles).

Le respect de ces trois items augmente le niveau de sécurité des collaborateurs-partenaires-clients des biens-outils-moyens de production et optimise la bonne marche de l'entreprise.

La cybersécurité s'intègre dans une réflexion plus globale de l'entreprise sur la sécurité, et porte plus particulièrement sur :

- les systèmes industriels (ateliers, machines, plateformes, SCADA, locaux...) ;
- les systèmes d'information (logiciels, serveurs, moyens de communication) ;
- les produits et services proposés aux clients.

Les interfaces numériques nécessaires à la communication entre ces différents systèmes constitutifs de l'entreprise sont autant de risques supplémentaires.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Protéger ses données d'entreprise, son patrimoine immatériel.
- Sécuriser la relation avec fournisseurs et sous-traitants.
- Fournir des produits connectés et/ou services connectés sécurisés.

Sur le plan technologique

- Garantir le fonctionnement de l'atelier et l'outil de production.

Les outils de la transformation numérique de l'atelier et de son outil de production (IOT, cloud, machines intelligentes, communications M2M, robots...) sont autant de sources de risques cyber, car ils créent de nouvelles vulnérabilités et de nouvelles menaces. Pour autant, même les ateliers non connectés à Internet sont exposés aux menaces numériques (ex : clé USB contaminée branchée sur un équipement de production pour sa maintenance ou le transfert de données). Quant aux usines qui démarrent la modernisation de leurs équipements par l'intégration d'outils numérisés (ex : rétrofit de machine avec intégration du digital), elles sont sans doute les plus vulnérables car utilisatrices de systèmes et moyens développés sans intégrer de concept de sécurité.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Sensibiliser, former et guider les collaborateurs.
- Le facteur humain est la source essentielle du risque de cybersécurité. Les menaces exploitent souvent les comportements individuels (utilisation de clé USB, liens Internet, ouverture d'emails de provenance inconnue...), plutôt que les failles logicielles pour installer des programmes malveillants, dérober des informations confidentielles, transférer des fonds... Les risques de se faire duper par des messages malveillants sont d'autant

CYBERSÉCURITÉ

plus forts que ceux-ci imitent de façon très fidèle des messages authentiques. Ce risque est amplifié avec la généralisation des outils nomades. Les frontières entre les espaces personnels et professionnels deviennent de moins en moins marquées, augmentant considérablement les vulnérabilités. Même utilisés dans un cadre strictement professionnel, ces outils engendrent de nouvelles problématiques de sécurité et nécessitent donc la mise en place de mesures adaptées. Le risque porté par le facteur humain concerne tous les collaborateurs dans l'entreprise (informaticiens, automaticiens, personnels administratifs, personnel d'ateliers).

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Afin d'être en mesure de protéger son entreprise (collaborateurs, système de production, systèmes d'informations) de tous types d'attaques, il est primordial, quelle que soit sa taille et son degré d'intégration des outils digitaux et d'exposition à Internet, d'établir une politique de sécurité adaptée à son environnement et à son contexte industriel. Sont ainsi décrits ci-dessous les cinq items incontournables pour intégrer la cybersécurité dans son entreprise :

- mettre en place une démarche sécurité numérique impliquant tous les acteurs de l'entreprise ;
- décrire la cybersécurité de son entreprise au regard de la cybersécurité générale et formaliser un plan d'actions ;
- mettre en œuvre et contrôler l'efficacité du plan d'actions ;
- s'appuyer lorsque nécessaire sur des fournisseurs de service ou des solutions de confiance ;
- suivre la législation et répondre au renforcement de la réglementation.

Au niveau technologique

- Garantir le fonctionnement des machines.
Un atelier de production est composé d'une multitude de moyens de transformation, de manutention et de périphériques. Ces machines sont de plus en plus à commande numérique (ex : programmation *via* des interfaces homme-machine), instrumentées (ex : capteurs permettant de mesurer et exploiter des données recueillies à des fins de maintenance prédictives), connectées et communicantes, au travers soit de réseaux M2M (*machine-to-machine*), soit par IOT. Au final, toutes les machines et robots sont directement ou indirectement connectés à des réseaux et en particulier à l'Internet. Ces équipements peuvent souvent accueillir des clés USB ou des consoles de maintenance. Il est donc nécessaire de protéger ses machines. Et la sécurité de celle-ci ne peut se résumer à des parades logicielles et matérielles visant à repérer et à éradiquer des codes malveillants. Elle doit garantir aussi la fiabilité du transfert d'informations intégrées entre les différents équipements.
- Contrôler les accès.
La connexion à Internet n'est malheureusement pas le seul vecteur de malveillance potentielle ou même de négligence. Un simple port USB accessible facilement peut devenir la porte d'entrée d'une cyberattaque. De très nombreux intervenants ont cependant besoin de pouvoir accéder physiquement aux installations. Des mesures adaptées permettant de maîtriser les points d'accès physiques, qui permettraient de s'introduire dans le système, doivent donc être mises en place. Elles concernent en particulier tous les équipements informatiques, les ateliers ou parties d'atelier sensibles, les salles d'archivage, etc.
- Sécuriser les produits et services connectés.
Les objets connectés sont devenus omniprésents et deviennent de plus en plus exposés aux risques liés à la cybersécurité. Vendre des produits connectés ou des services associés nécessite donc la mise en place de mesures de sécurité permettant de protéger l'entreprise,

CYBERSÉCURITÉ

les clients et les tiers. La mise en œuvre de ces mesures est rendue complexe par la diversité des protocoles utilisés. L'harmonisation et la normalisation de ces protocoles constitue donc un réel enjeu. Afin de définir un cadre pour la sécurité des objets connectés, certains critères et certifications ont récemment été mis en place au niveau français.

Au niveau numérique

- Maîtriser la gestion et l'échange des données numériques internes.

Classiquement, la gestion et l'échange des données numériques internes concernent l'informatique de gestion à tous les niveaux de l'entreprise. Avec l'avènement de l'Internet de l'industrie et des objets (numérisation et connexion des machines et organes de production), les données internes s'élargissent naturellement à des sources situées sur la chaîne de production dont, par exemple, les infrastructures.

- Sécuriser la traçabilité de production.

Les systèmes industriels utilisent de plus en plus de moyens numériques embarqués pour assurer la traçabilité de la production, soit pour en garder l'historique, soit pour connaître à n'importe quel moment l'état de transformation du produit. Ces moyens de traçage peuvent être positionnés sur des supports (ou palettes) ou directement sur le produit. Les plus utilisés sont la reconnaissance optique de caractères ou de code à barres.

- Sauvegarder et protéger les données et logiciels.

De nombreuses informations existent de plus en plus sous format électronique et contribuent grandement à la valeur d'une entreprise. Elles doivent donc impérativement être sauvegardées et protégées contre toutes formes de pertes de données ou d'attaques possibles pour préserver les données de l'entreprise, leur intégrité et confidentialité. La sauvegarde nécessite des précautions particulières, d'une part pour ne pas induire des fuites d'informations confidentielles, d'autre part pour garantir la disponibilité

des données même en cas de défaillance, ce qui implique un processus d'archivage fréquent et sécurisé.

- Bien utiliser services en ligne et le cloud.

L'utilisation de services en ligne consistant à exploiter de façon distante, généralement par Internet, des fonctionnalités de stockage, de calcul ou de service en général (mail, partage de document, gestion de projet...) est devenue chose courante dans la sphère personnelle et professionnelle. Ces services permettent de tirer pleinement partie des avantages de la révolution numérique (accès à des services pour tout un chacun qui nécessitaient auparavant un investissement conséquent) et constituent un levier puissant de compétitivité en coûts et fonctionnalités souvent négligés. Il convient cependant d'observer certaines précautions afin d'exploiter pleinement ce potentiel sans fragiliser la sécurité de son installation. La part de services en ligne qui sont internalisés (sur des serveurs hébergés et exploités par l'entreprise) ou non (sur des serveurs appartenants et exploités par une autre entreprise), dépend de ses contraintes et sa stratégie propre.

- Sécuriser les données numériques avec l'extérieur

La dématérialisation des contractualisations requiert des moyens adéquats de sécurisation tels que les signatures électroniques à valeur légale. L'archivage des documents comptables et financiers dématérialisés doit par ailleurs répondre aux normes en vigueur (AFNOR NF Z 42-013 ou ISO 14641-1).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Sensibiliser les collaborateurs.

Les aspects numériques sont prépondérants dans l'Industrie du Futur, mais la numérisation et la connectivité des machines font naître de nouveaux dangers dont il faut se prémunir. Une grande partie des incidents liés à la cybersécurité provient de la méconnaissance des

FICHE 17

CYBERSÉCURITÉ

collaborateurs concernant les risques sur les installations. Leur sensibilisation aux bonnes pratiques contribue donc à la réduction des vulnérabilités et des opportunités d'attaques. Les risques évoluant en permanence, cette sensibilisation doit être effectuée de manière régulière.

- Briser les frontières entre les différents services (notamment entre les systèmes informatiques et les systèmes industriels). Il n'est pas rare, en PME, de voir cohabiter des mondes différents liés d'une part à l'informatique de gestion, d'autre part à l'informatique industrielle, voire à l'automatique. Pour réussir une campagne de communication sur la cybersécurité, il est nécessaire de construire un langage commun. Pour ce faire, les différents mondes du digital doivent se décloisonner.
- Utiliser des outils nomades pour l'accès à distance. L'Industrie du Futur repose sur une mise à disposition et une utilisation en temps réel de l'information, pour décider, voire pour agir sur le système d'information ou sur un composant de l'outil de production. L'accès à distance, que ce soit pour gérer des opérations de production ou pour la télémaintenance repose sur des outils dits nomades tels que les smartphones, les ordinateurs portables ou les tablettes. Ces moyens sont généralement mis à disposition par les entreprises, mais l'on commence à voir apparaître des usages professionnels d'outils nomades personnels. Les risques importants d'intrusion et de malveillance reposent principalement sur deux vulnérabilités potentielles que sont la connexion et la perte ou le vol.
- Communiquer *via* les réseaux sociaux, messagerie, Internet. La visibilité, le développement économique des entreprises et leur attractivité en matière de méthodes de travail, notamment pour les *digital natives* reposent sur une utilisation massive d'Internet, des messageries et des réseaux sociaux, tant mondiaux (Facebook, Twitter) que privés, circonscrits au périmètre de l'entreprise. Cette multiplication des outils numériques de communication au bureau et dans l'usine, conjuguée à l'utilisation croissante des messageries professionnelles à des fins personnelles font exploser les risques cyber sur le lieu de travail.

Les questions à se poser

- Quels seront les impacts du règlement européen sur la protection des données (GDPR), qui devra être respecté dès 2018 par toutes les entreprises collectant et traitant des données personnelles ?
- Une politique de sécurité devrait être construite autour de trois grandes questions :
- Que dois-je protéger en priorité ? Quel est mon patrimoine informationnel ?
- Quels sont les risques encourus (externes, internes) ?
- Quels sont les facteurs aggravants de risque ?
- Une fois ces facteurs déterminés, la politique de sécurité doit permettre d'établir un niveau minimum de sûreté permettant de protéger durablement l'entité.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

ENVIRONNEMENT OUVERT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Si les entreprises veulent tirer bénéfice de la pléthore de données générées par leurs actifs industriels connectés, l'information doit pouvoir circuler sans entraves et généralement en temps réel, quel que soit l'endroit où les logiciels d'analyse ont été implémentés, en périphérie de réseau ou dans le cloud.

L'interopérabilité est l'un des défis majeurs de l'Industrie du Futur. Afin d'assurer l'optimisation des opérations de l'usine et son insertion dans la chaîne de valeur, ses systèmes sont compatibles avec des standards d'échanges d'informations et peuvent utiliser des services numériques dans le cloud (services de calcul, d'optimisation, de modélisation...). L'usine gère l'interopérabilité de ses systèmes industriels et stocke ses données dans une base de données unique et dans le cloud.

Souvent désignés par leurs initiales, le *machine-to-machine* (M2M) et l'*Internet of Things* (IoT) sont deux concepts très proches, souvent source d'innovation dans les services. Un système IoT/M2M est complexe : l'objet/le capteur, les réseaux de communication radiofréquence, une passerelle/ un routeur qui se connecte à Internet sur les systèmes centraux (serveurs cloud) pour offrir du service.

Demain la flexibilité des architectures et des flux de données offrira des interactions entre les objets, au-delà de leurs constructeurs ou des secteurs d'activités, afin d'apporter de nouveaux services plus performants : l'interopérabilité est en marche. Les plates-formes de l'Internet des objets (IoT), pour optimiser le *time to market* qui ont vocation à connecter ces appareils hétérogènes et à les faire communiquer entre eux, se multiplient.

Ces technologies de plus en plus complexes nécessitent d'avoir une bonne vision globale des différentes constituantes du système telles que l'architecture logicielle, les protocoles, le cloud, le big data, la sécurité, les réseaux, en plus de l'objet.

La flexibilisation de la production, qui est une des principales finalités de l'Industrie du Futur, passe par une

totale interopérabilité des équipements au sein de l'usine, et donc par la mise en place d'un standard unique pour la communication entre machines et vers les systèmes d'information. L'interconnexion est en passe de devenir incontournable pour permettre à l'organisation d'être plus performante. Dès à présent, le protocole d'échange OPC UA s'impose de plus en plus sur la couche « haute » (ERP, MES, Automates, SNCC...) comme un standard d'interopérabilité mondial entre les machines et les systèmes. Concernant la couche « basse » (capteurs, actionneurs) IO LINK devient un standard de fait. La quasi majorité des constructeurs ont implémenté OPC UA et IO LINK directement dans leurs produits et solutions, ce qui facilite grandement l'interopérabilité des machines et des équipements.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

L'objectif est d'exploiter les données pour faire la chasse aux gaspillages, et ce dans tous les domaines. En ayant une meilleure connaissance de l'outil de production, il sera, par exemple, possible de réduire les temps d'attente entre les machines.

- Accroître la qualité des produits et services des entreprises, gagner en flexibilité de production et faire monter en compétences les collaborateurs.
- Bénéficier, entre différents sites, d'une gestion commune des fichiers clients et des informations commerciales, harmoniser les actions à prendre.

Sur le plan technologique

- Une architecture des protocoles de communication permettant l'ouverture des données et l'interopérabilité des matériels et des logiciels.
- Bases de data hébergées à distance dans un cloud pour partager les données en garantissant leur intégrité.
- Donner une cohérence à la transformation numérique du secteur et veiller à l'interopérabilité des systèmes informatiques.

ENVIRONNEMENT OUVERT

- Permettre à plusieurs maillons de l'organisation d'utiliser une même donnée.
- Prendre en compte les nouvelles réglementations, notamment la loi européenne GDPR, qui forceront le marché à éliminer les cyberattaques, pour qu'aucune donnée ne soit compromise.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Mise en place d'organismes de normalisation mixtes État-industriels engagés au niveau européen et mondial afin d'anticiper sur les normes étrangères ou celles des géants du web, qui seront de plus en plus présents dans les industries du futur.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Utiliser les standards de communication de l'usine du futur (OPC UA, IO LINK...) :
 - > utilisation d'un langage commun, protocole de communication entre machines orienté vers les services.
- Collecter et acheminer les données jusqu'aux outils de traitement.
- Construire un process qualité pour identifier et corriger les données aberrantes.

Au niveau numérique

- Une culture numérique globale permettant d'adopter une vraie cohérence intégrant toutes les activités de l'entreprise, depuis l'approvisionnement des matières premières jusqu'au retour utilisateur.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Sites des Protocoles : Fondation OPC, IO Link
Contributeurs : Cetim, Gimélec

INTERNET INDUSTRIEL

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'Internet industriel (IIoT, *Industrial Internet of Things*) représente une connexion bidirectionnelle des objets industriels (automates, systèmes d'acquisition et de contrôle de données, data historian, etc.) avec des systèmes informatiques, plus généralement hébergés dans le cloud afin de surveiller, contrôler et d'optimiser les processus physiques opérationnels des usines, automatiquement.

Les progrès technologiques du secteur industriel ont permis de passer de la fabrication manuelle à la production de masse *via* des lignes de fabrication et de montage, puis avec les ordinateurs, à l'automatisation des usines. Avec l'évolution constante des méthodes de travail, les sites de production se transforment peu à peu en usines « intelligentes » (*smart factories*), un concept également appelé « Industrie du Futur ».

Grâce à l'Internet des objets industriels, des systèmes informatiques surveillent et commandent les processus physiques, puis restituent les données recueillies dans des tableaux de bord supervisés par opérateurs. Il s'agit d'optimiser les coûts, de tracer la généalogie des objets afin de gérer au plus juste la maintenance industrielle dans des conditions de sécurité optimale, ou encore de collecter des données afin de mieux concevoir la prochaine génération de produits. Couplés à l'intelligence artificielle, les objets industriels connectés aident à améliorer les marges.

Selon Research Nester, le marché mondial de l'IIoT (industriel et grand public) devrait passer de près de 600 milliards de dollars en 2015 à 724 milliards en 2023. De même, le cabinet Markets & Markets, prévoit une progression allant de 130 milliards de dollars en 2015 à 883 milliards en 2022, avec une croissance annuelle moyenne de 32,4 % entre 2016 et 2022. L'IIoT est un relais de croissance au niveau mondial qui pourrait augmenter notre PIB de 4 à 5 points d'ici à dix ans.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Améliorer les performances des industries grâce aux fonctions de surveillance, de contrôle, d'optimisation et grâce à l'autonomie des objets connectés industriels.
- Augmenter l'efficacité opérationnelle, mieux gérer les risques et les standards.
- Créer de nouveaux modèles économiques basés sur de nouvelles sources de revenus à travers l'usage à la demande et la facturation à l'usage par exemple. Ces deux procédés permettront alors de réduire les coûts de possession et le retour sur investissement matériel.
- Améliorer l'analyse de la qualité, optimiser l'organisation des ateliers et des lignes de fabrication, réduire les rebus, anticiper les dysfonctionnement et pannes potentielles par des outils de maintenance prédictive grâce au couplage entre les données industrielles et les outils analytiques.

Sur le plan technologique

- L'Internet industriel des objets intègre des outils analytiques dit avancés, par l'exécution d'algorithmes scientifiques avancés comme le *machine learning*, des modèles d'analyse prédictive ou autres. Il utilise également les données grâce aux capteurs et la connexion dite *machine-to-machine* (M2M : communication entre machines sans intervention humaine) qui existent dans le milieu industriel depuis des années. L'IIoT change la donne dans le sens où il facilite la collecte et le traitement de grosses quantités d'informations industrielles, non seulement dans une usine mais aussi entre plusieurs sites de production, *via* le cloud afin de consolider et synthétiser les données inter-sites dans des tableaux de bords (ou cockpits industriels). Les capteurs mesurent des informations comme le signal électrique entrant dans un appareil et des paramètres de pression. Des éléments qui, combinés aux techniques analytiques dites avancées, permettent de déterminer si une pièce d'un équipement fonctionne correctement dans des conditions optimales.

INTERNET INDUSTRIEL

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Un écosystème numérique doit intégrer l'industrialisation des processus dès la conception du produit. Les méthodes agiles, qui répondent aux exigences du time to market, font rarement bon ménage avec la sécurité. L'absence de normes dans ce domaine et la nécessité de sécuriser l'écosystème de bout en bout, depuis l'objet jusqu'à l'utilisateur, sont des aspects à ne pas négliger.

Les industriels possèdent depuis longtemps des données sensibles de leurs usines, or celles-ci sont souvent entreposées dans des logiciels de gestion monolithiques qui ont contribué à la création de multiples silos, rendant difficile voire impossible une prise de décision car s'appuyant sur des données partielles non holistiques.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Diminuer les risques dans les environnements de travail hostiles.
- Anticiper le dysfonctionnement potentiel des machines et processus pour gagner en efficacité.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

L'Industrie du Futur exploite les systèmes cyber-physiques¹ pour créer des réseaux où les périphériques connectés peuvent échanger entre eux. L'innovation apportée par l'IIoT crée de nouveaux domaines comme la télémétrie où les machines semi-autonomes peuvent être contrôlées à distance par les humains à l'aide d'une interface virtuelle. L'IIoT permet aux industriels d'utiliser des télé-robots pour exécuter des tâches dans des environnements dangereux tels que l'inspection des pipelines sous-marins, la maintenance des lignes électriques, le déclassement des usines chimiques, etc.

L'Industrie du Futur s'appuie sur le potentiel des technologies de l'IIoT dans le secteur manufacturier. En fournissant l'automatisation et l'échange de données, l'Industrie du Futur aide les fabricants à décentraliser la prise de décision, à s'assurer de la transparence des informations, à promouvoir l'assistance technique entre les machines et les hommes, et à créer un environnement interopérable.

Les questions à se poser

- Comment sécuriser les objets connectés industriels ?
- Quelle plateforme choisir pour gérer ma flotte d'objets connectés industriels ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

1. Systèmes électroniques embarqués sur lesquels on déploie du logiciel et/ou des moteurs analytiques d'exécution.

RÉSEAUX INDUSTRIELS SANS FIL

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Constituant l'une des facettes de l'Internet des objets, les réseaux industriels sans fil consistent en un ensemble de technologies et protocoles de communication à distance, permettant l'échange de données entre les composants, entre composants et machines, ainsi qu'entre composants et systèmes de gestion et de pilotage. Le pilotage et la surveillance des machines peuvent ainsi être optimisés sur la base de réseaux de capteurs sans fils fixes ou mobiles (embarqués dans des véhicules). Il est possible de distinguer trois types de communication sans fil :

- communication grande distance (GSM/GPRS, UMTS, Wimax...);
- communication moyenne distance (WLAN, WiFi, LiFi, par la lumière...);
- communication petite distance entre capteurs (Zigbee, Bluetooth, ISA100, RFID, NFC...).

Les tendances futures portent notamment sur :

- le déploiement à l'horizon 2019 de la 5G, au débit 100 fois supérieur à celui de la 4G;
- l'émergence des échanges de données par la lumière (LiFi). La société française OledComm propose, par exemple, des solutions de géolocalisation (GEOLiFi) et d'échange de données (LiFiNET) utilisant la lumière;
- le développement des réseaux de capteurs communicants.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réalisation de gains de temps lors de l'installation du câblage et de la connectique.
- Réduction potentielle des coûts de maintenance et des modifications apportées à la topologie du réseau.

Sur le plan technologique

- Simplicité de l'installation, déploiement flexible et rapidement modifiable.
- Possibilité de distribuer l'intelligence dans les équipements jusqu'aux composants (vanne, pompe, moteur).
- Maîtrise de l'état du système par l'autocontrôle et l'autodiagnostic.
- Contrôle en temps réel des lignes de production.
- Possibilité de communiquer entre des sites difficilement accessibles, isolés ou dangereux.
- Suppression des fils dans les équipements tournants ou mobiles (collecteurs tournants, etc.).
- Développement à grande échelle de systèmes de communication multi-composants : smart grids, smart buildings, smart cities.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les communications sans fil favorisent les processus collaboratifs à distance (automatisés et humains) et mobiles (accès aux informations sans être relié physiquement au site de l'entreprise).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Communication *car-to-car* et *car-to-x* : fluidification du trafic et réduction de la consommation, augmentation de la sécurité.

RÉSEAUX INDUSTRIELS SANS FIL

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Stabiliser les technologies, protocoles et performances. Des choix stratégiques sont à réaliser pour assurer le portage et la modularité (structuration des applications, interopérabilité...).
- Fiabiliser les protocoles de communication (sûreté et disponibilité, temps réel, auto-contrôle, interférences électromagnétiques, rupture et reprise de communication...).
- Minimiser la consommation d'énergie des composants à l'aide de techniques de traitement du signal, de protocoles de transmission et de stockage (récupération d'énergie par exemple) adaptées ou dédiées.
- Résister à des perturbations électromagnétiques générées par certains équipements.
- Résister à des températures potentiellement extrêmes.
- Présenter des caractéristiques de robustesse et étanchéité élevées.

Au niveau numérique

- Sécuriser les communications : contrôle des écoutes passives, identification des émetteurs-contrôle d'accès (risque d'intrusion).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Les hiérarchies des informations à transmettre et à stocker doivent s'appréhender par type d'application (importance de la cohérence des architectures fonctionnelles et matérielles).
- Adapter les logiciels de traitement des données à la taille mémoire limitée des puces et aux très grands volumes d'informations à traiter.

Les questions à se poser

- Comment développer des systèmes interopérables et compatibles avec les normes futures ?
- Comment choisir le protocole de communication adapté ? Quels sont les besoins ?
- Les niveaux de fiabilité requis par les applications sont-ils compatibles avec l'utilisation d'un réseau sans fil ?
 - > Échanges d'informations avec un équipement mobile ?
 - > Extension d'un réseau existant ?
 - > Échanges d'informations au travers d'une zone inaccessible, dangereuse ou à environnement en mouvement ?
 - > Assurer la mobilité des opérateurs ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

RÉSEAUX INDUSTRIELS TRADITIONNELS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les réseaux industriels traditionnels reposent sur des technologies et protocoles de communication de proximité filaires point-à-point permettant l'échange de volumes de données généralement plus importants que les technologies sans fil. Ces technologies sont souvent complémentaires.

Comme le souligne le directeur général de la division réseau de T-Systems, M. Molck-Ude, « *Le trafic de données des réseaux d'entreprise ne cesse d'augmenter. À l'avenir, la réussite d'une entreprise ne sera possible qu'avec une nouvelle conception des réseaux* ».

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La conservation d'un réseau filaire existant peut être intéressante d'un point de vue économique. En effet, le coût de développement d'un réseau sans fil compatible avec l'intégralité des équipements en place peut s'avérer élevé.
- Simplicité d'installation, technologie relativement économique, plus facile de sécuriser un réseau lorsqu'une tentative d'intrusion nécessite une connexion physique.

Sur le plan technologique

- Les réseaux filaires peuvent présenter plus de difficultés d'accès pour un cyber-attaquant que les réseaux sans fil, qui impliquent un cryptage des données.
- La fiabilité des réseaux filaires demeure généralement supérieure à celle des réseaux sans fil. Les réseaux filaires demeurent pertinents pour les applications de commande où le temps réel est un aspect important.
- Les réseaux filaires présentent une faible sensibilité aux interférences.
- Les volumes de données transmis sont également plus importants que pour les systèmes sans fil.

- Les réseaux filaires ne nécessitent pas d'autorisation pour l'allocation de fréquence, comme cela peut-être le cas pour les réseaux sans fil.
- Les réseaux filaires demeurent pertinents dans certains types de structures, en particulier celles comportant des quantités importantes de métal, qui peuvent créer des zones difficilement atteignables par un signal sans fil.
- Les technologies filaires bénéficient de plusieurs dizaines d'années de retours d'expérience.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les technologies filaires comme fieldbus sont très répandues parmi les fournisseurs d'instruments.
- La technologie fieldbus est supportée par la majorité des fournisseurs de systèmes d'automatisation et sont connues du personnel de maintenance.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Réaliser l'architecture de façon à ce qu'un court-circuit n'affecte pas l'intégralité du réseau.
- Il n'existe actuellement pas de standard unique concernant le RTE (*real time Ethernet*), mais plusieurs implémentations mutuellement incompatibles. Par exemple, dans les cas d'une utilisation d'Ethernet de classe C, la compatibilité avec l'Ethernet classique est abandonnée afin d'atteindre des performances plus élevées (temps de cycle inférieur à la milliseconde).
- Le groupe de travail TSN de l'IEEE vise à améliorer la fiabilité des capacités temps réel de l'Ethernet standard (IEEE 802.3, IEEE 802.1D) et focalise ses actions sur les aspects suivants :
 - > réduction des temps de latence et amélioration de la précision des protocoles déterministes ;
 - > amélioration de la tolérance aux erreurs sans hardware additionnel ;

FICHE 56

RÉSEAUX INDUSTRIELS TRADITIONNELS

- > amélioration des niveaux de sûreté et sécurité ;
- > assurance de l'interopérabilité des solutions provenant de fabricants différents.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Définir en amont de chaque projet quelles sont les meilleures technologies à implémenter (filaire ou sans fil).
- Le déploiement de la 802.11ac n'est pas aussi facile qu'une simple mise à niveau des points d'accès.

Les questions à se poser

- Les problématiques de temps réel et de disponibilité permettent-elles l'implémentation d'un réseau sans fil ?
- Comment inclure les télécommunications dans la stratégie informatique de l'entreprise, c'est-à-dire créer une stratégie informatique complète qui considère les processus de communication externe et interne comme étant des processus opérationnels essentiels ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 1

ACIERS À TRÈS HAUTES PERFORMANCES, ALLIAGES NON-FERREUX ET SUPERALLIAGES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les aciers à hautes performances (HPS) visent à répondre à des spécifications d'allègement et de sécurité tout en préservant leur facilité de mise en œuvre. Ils offrent une alternative supérieure lorsque les caractéristiques des aciers conventionnels deviennent insuffisantes pour l'application visée. Leurs caractéristiques offrent la possibilité d'accroître significativement les performances de nombreux composants mécaniques fortement sollicités.

Les alliages non-ferreux performants tels que les alliages d'aluminium, de magnésium et de titane sont des matériaux qui visent à répondre essentiellement à des spécifications d'allègement. Les alliages d'aluminium et de titane répondent de plus à des exigences en termes de tenue mécanique. Le titane apporte aussi une tenue à la corrosion.

Les superalliages sont développés en vue d'applications à haute température, d'une résistance élevée à la corrosion et au fluage, ou d'une meilleure tenue mécanique en conditions extrêmes et/ou aux chocs.

Les principales applications des aciers à très hautes performances, des alliages non-ferreux et des superalliages concernent les :

- structures et moteurs aéronautiques (superalliages à base de nickel, alliages aluminium-lithium, alliages de titane) ;
- turbines à gaz industrielles : vannes, disques, chambres de post-combustion ;
- nucléaire : vannes, transmission de puissance, pompes, échangeurs ;
- pétrochimie : boulons, vannes, corps de pompes ;
- pièces de fonderie ;
- packaging (alliage d'aluminium) ;
- automobile ;
- médical : prothèses orthopédiques et dentaires.

Principales technologies concernées :

- aciers à très haute résistance THR, Dual Phase, TRIP et maraging ;
- alliages d'aluminium, aluminium-lithium ;
- alliages de magnésium ;
- alliages de titane, aluminures de titane ;
- pièces massives en superalliages à base nickel ou cobalt ;
- tôles d'acier pour le formage à chaud et à mi-chaud.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La maîtrise de ces matériaux permet de répondre à des cahiers des charges fonctionnels complexes, tout en respectant des conditions de fonctionnement sévères en termes de vibrations, corrosion, températures. Une durée de vie maximale permet à l'entreprise de se placer sur des marchés à haute valeur ajoutée. Néanmoins, le coût de mise en œuvre de ces matériaux nouveaux peut être plus élevé (outillages, procédés de transformation nouveaux).
- L'innovation dans ces nouveaux matériaux est poussée par les fournisseurs en réponse à une demande généralisée d'allègement des produits dans un grand nombre de secteurs.

Sur le plan technologique

- Matériaux permettant de répondre à des cahiers des charges fonctionnels complexes pour des durées de vie maîtrisées, tout en respectant des conditions de fonctionnement sévère (corrosion, fatigue, solidité, limitation des fissurations à froid et à chaud, grande résistance à la corrosion et biocompatibilité...).

FICHE 1

ACIERS À TRÈS HAUTES PERFORMANCES, ALLIAGES NON-FERREUX ET SUPERALLIAGES

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Nécessité de montée en compétences pour maîtriser la mise en œuvre de matériaux nouveaux (outillages, procédés de transformation nouveaux) et la conception des pièces (durée de vie).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Des étapes de fabrication moins gourmandes en énergie et des rejets moindres dans l'atmosphère.
- Des matériaux portés par la tendance de performance énergétique globale (allègement des structures signifiant la réduction de la consommation de carburants et des émissions dans les applications en transport par exemple).
- Le renforcement de la contrainte environnementale augmente l'intérêt des métaux résistants à la corrosion sans traitement supplémentaire.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Éviter le risque de conception erronée par l'emploi de matériaux nouveaux (la diffusion de données sur les règles de conception et de mise en œuvre de ces matériaux est encore limitée).
- Reconcevoir à prix minimum.
- Assurer l'assemblage de pièces en matériaux différents.
- Poursuivre la dynamique d'allègement des structures et des pièces mécaniques.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	---------------	----------	----------

► LIENS UTILES

Rédacteur : Cabinet

Contributeurs : Cetim, Arts et Métiers (Laurent Barrallier MSMP)

- Associer à l'utilisation de ces nouveaux matériaux des nouveaux procédés de mise en œuvre lorsque nécessaire (ex : emboutissage à chaud).
- Adapter ces matériaux d'outillage en fonction des nuances travaillées.

Au niveau numérique

- Développer des bases de données sur ces matériaux, leur mise en œuvre et leurs avantages-inconvénients par rapport aux autres matériaux afin de capitaliser en interne.
- S'appuyer des outils logiciels de reconception-optimisation topologique.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Développer des compétences sur la mise en œuvre et l'emploi de matériaux nouveaux.
- Enclencher une veille pour suivre les innovations et capitaliser sur les données disponibles.

Les questions à se poser

- La demande d'allègement imposée par mon client impose-t-elle une reconception de pièces et un changement de procédé de mise en œuvre ?
- La fluctuation des coûts de matière première qui affecte le prix de ces nouveaux matériaux est-elle en phase avec mon business model ?
- Comment capitaliser sur les premières applications réussies ?

FICHE 4

ASSEMBLAGE INNOVANT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les produits du futur seront constitués de matériaux en association de plus en plus complexes de sorte que chacun d'eux apporte son avantage spécifique dans le produit final (légèreté, conductibilité, résistance, dureté...). À la diversité croissante des matériaux (nouveaux matériaux métalliques, composites, nanomatériaux, biomatériaux...) s'ajoutent des combinaisons de plus en plus variées entre matériaux. Ces nouvelles conceptions multi-matériaux nécessitent de mettre en œuvre des techniques innovantes d'assemblage tout en garantissant une qualité de liaison assurant des propriétés optimales de l'ensemble obtenu.

Parmi les technologies mises en œuvre, on peut citer :

- les techniques d'assemblage de deux matériaux métalliques dissemblables :
 - > brasage, brasage diffusion ;
 - > procédés de soudage à l'état « solide » tels que le soudage diffusion, le soudage par friction, le soudage par friction-malaxage, le soudage par impulsion magnétique (SIM).
- les techniques d'assemblage entre un matériau métallique et un matériau composite, plastique ou métallique dissemblable :
 - > vissage ;
 - > clouage ;
 - > collage ;
 - > rivetage-collage ;
 - > soudo-collage ;
 - > clinchage ;
 - > surmoulage ;
 - > procédés de type Comeld™ et Surf-Sculpt™.
- les techniques d'assemblage très haute précision pour pièces MID (molded interconnect device) ou micro pièces plastiques ou multi-matériaux (métal/céramique/polymère).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- En parallèle des surcoûts potentiels associés aux acquisitions de matériel destinées aux nouveaux procédés, les assemblages multi-matériaux permettent de n'utiliser des matériaux coûteux qu'aux emplacements stratégiques où ceux-ci possèdent une forte valeur ajoutée. Les parties non critiques d'une pièce peuvent donc être réalisées à l'aide de matériaux moins coûteux.

Sur le plan technologique

- Les assemblages multi-matériaux permettent d'exploiter au mieux les caractéristiques de chacun de leurs composants (légèreté, conductibilité, résistance, dureté...). Les pièces multi-matériaux sont donc optimisées à plusieurs niveaux et peuvent présenter des performances supérieures aux pièces mono-matériau.

Sur le plan environnemental, sociétal

- En autorisant la fabrication de pièces plus légères tout en conservant leurs propriétés mécaniques, les assemblages innovants rendent possible une diminution de la consommation en carburant dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et des transports en général. Les émissions de gaz à effet de serre et de polluants sont par conséquent réduites.
- Le recours à de nouvelles colles plus vertes (colles et adhésifs structuraux démontables sans produits chimiques par exemple) diminue les impacts environnementaux des procédés de collage.

FICHE 4

ASSEMBLAGE INNOVANT

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

Les conceptions utilisant les assemblages innovants et multi-matériaux nécessitent :

- des méthodologies de dimensionnement d'assemblages hétérogènes ;
- des moyens de qualifier la qualité de l'assemblage obtenu, préférentiellement par méthodes de contrôle non destructif, et sa durabilité en fonction des sollicitations de service :
 - > mise au point de méthodes d'essai pour qualifier la tenue des assemblages en laboratoire ;
 - > mise au point de méthodes de contrôle non destructif pour le contrôle en production ;
- la maîtrise des problèmes de fragilisation locale des structures (fluage, matage, rupture des fibres) ;
- la caractérisation de la qualité de préparation des surfaces pour le collage ;
- l'acquisition d'équipements spécifiques pour le soudage (four sous atmosphère ou sous vide, machine de soudage par impulsion électromagnétique) ;
- la maîtrise de la qualification des modes opératoires (couple de serrage sur un composite, dilatation thermique différente entre un métal et un plastique...).

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	---------------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Contributeur : Arts et Métiers (Laurent Langlois, LCFC)

Au niveau numérique

- L'utilisation de produits multi-matériaux implique la définition des modèles de comportement associés ainsi que les bases de données correspondantes, obtenues par des essais de caractérisation.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Le recours à de nombreux matériaux peut nécessiter de nouvelles compétences, notamment dans des métiers traditionnellement tournés exclusivement vers l'utilisation de métaux et non de composites.

Les questions à se poser

- Quelles sont les conséquences des assemblages innovants et multi-matériaux sur le cycle de vie d'une pièce et sur son suivi (PLM) ?
- Existe-t-il une continuité dans le suivi numérique des informations relatives à une pièce ?

FICHE 6

AUTOMATISATION, TRANSITIQUE ET ROBOTIQUE DE PROCESS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Dans une industrie mondialisée où les temps d'innovation et les cycles de vie courts des produits imposent une réactivité et une flexibilité maximales à tous les niveaux de la chaîne de valeur, les installations de production doivent accentuer leurs efforts pour s'adapter aux changements de conditions de fabrication.

Au-delà de l'automatisation des postes de travail pour faire face à l'augmentation des cadences, les fabricants et les logisticiens cherchent aussi à augmenter la flexibilité de l'outil de production, optimiser le transport des composants d'un poste à un autre et maintenir des flux continus d'approvisionnement. Cette mutation en termes de robotisation des procédés offre la possibilité à l'humain de se concentrer sur les tâches réclamant un savoir-faire spécifique et une prise de décision afin d'optimiser la gestion et le pilotage du site.

Les principales applications de ces technologies sont :

- la manutention de charges, la préparation de commande, les machines de tri, les convoyeurs aériens, ascenseurs, trans-stockers, palettiseurs et chargeurs, le *Pick & Place*, l'encaissage, la palettisation ;
- le ferrage, la pose d'étanchéité ;
- l'assemblage, le soudage à l'arc, l'encollage, les parachèvements ;
- la fabrication des circuits imprimés, le traitement et le conditionnement des composants électroniques, le report de composants électroniques sur substrat souple (textile, etc.) ;
- les opérations de process en général.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Diminution des durées de cycle et amélioration des cadences de production, disparition ou diminution des goulets d'étranglement.
- Flexibilité.
- Amélioration de la qualité des process et des produits.
- Saisie méticuleuse des données.

Sur le plan technologique

L'augmentation du niveau d'automatisation permet de mieux organiser l'espace utile, de décharger l'homme des activités pénibles et pauvres en valeur ajoutée et d'intégrer des systèmes de contrôle CNC en ligne plus facilement. Les robots peuvent remplacer l'homme dans les environnements dangereux.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Gagner en compétitivité permet dans certains cas de ne pas être obligé de délocaliser ou de sous-traiter, voire de réintégrer des productions sous-traitées.
- L'automatisation et la robotisation de process permet de laisser plus de temps à l'homme dans les prises de décisions et l'analyse des problèmes.
- Des nouveaux métiers apparaissent liés au concept de systèmes cyber-physiques, l'automatisation et la robotisation étant aujourd'hui très liées à la mobilité.

FICHE 6

AUTOMATISATION, TRANSITIQUE ET ROBOTIQUE DE PROCESS

Sur le plan environnemental, sociétal

- Valorisation du travail des employés à travers une augmentation de leur création de valeur ajoutée.
- Amélioration de la qualité des postes de travail des opérateurs.
- Amélioration des conditions de travail et de sécurité ; soulage les opérateurs sur les postes de travail contraignants, fatigants ou dangereux qui peuvent impacter leur santé (ex : TMS – troubles musculosquelettiques).
- Permet de consacrer du temps à l'innovation et de se concentrer sur la satisfaction du client.
- Amélioration de l'image de l'entreprise, sensation de modernité et de maîtrise.

► **LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique

- Dans une optique d'optimisation du travail par des systèmes robotiques au sein de la chaîne de production, il est nécessaire d'analyser les mouvements, les déplacements, les besoins en capteurs.
- Intégration mécanique, électrique, électronique et logicielle en phase avec les besoins spécifiques de l'utilisateur final.

► **MATURITÉ DE L'OFFRE**Au niveau numérique

- Intelligence grandissante des systèmes : maintenance prédictive, contrôle automatisé de la production, analyse de données, accompagnement des opérateurs dans les prises de décision.
- Analyse d'image et traitement du signal plus rapides et plus efficaces.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Les métiers très orientés procédés au départ vont évoluer vers plus de maîtrise des systèmes automatisés : chef de projet, conducteur de ligne de production ou logistique, technicien de maintenance, programmeur roboticien, automaticien, etc.
- Les compétences nouvelles intéresseront l'intégration des processus et l'organisation, la modélisation et la simulation, la supervision, la sûreté et la sécurité, les interfaces et les protocoles de communications des systèmes, l'immersion et la e-maintenance.

Les questions à se poser

- Quel est le niveau d'automatisation et de robotisation recherché en fonction du budget et des délais souhaités ?
- Quelles sont les tâches à automatiser ?

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

COMPOSANTS INTELLIGENTS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les systèmes de production de l'usine du futur reposeront sur des composants de type actionneurs mécatroniques : dans un environnement donné, l'apparition d'un phénomène, même non prévu, engendra une prise de décision des composants. L'intelligence de ces derniers se distingue par les propriétés suivantes :

- une intuitivité lors de leur manipulation ;
- une capacité à communiquer avec le processus de production : les décisions sont effectuées et optimisées à partir de nombreuses informations (lois et modèles de commande, capteurs, énergies instantanées mobilisables) ;
- une interconnexion décentralisée (wifi ou Ethernet industriel par exemple).

Les composants intelligents reposent donc sur la logique du *Plug & Produce* : les étapes de la production sont configurées de manière flexible afin d'être en mesure de répondre aux changements de situation. L'organisation du réseau de production est optimisée en prenant en compte la chaîne de valeur globale.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- L'usage hybride optimisé de plusieurs solutions de restitution d'énergie (accumulateurs oléopneumatique, volants d'inertie, batteries, supercondensateurs) et l'intégration d'actionneurs intelligents aux équipements génèrent des économies énergétiques.
- La flexibilité de production autorisée par les composants intelligents implique également des cadences plus élevées donc une augmentation de la productivité.

Sur le plan technologique

- L'intégration de composants intelligents permet une augmentation de la fiabilité des systèmes complexes

(autodiagnostic, autoadaptation, tolérance aux pannes, redondance à l'aide de technologies différentes).

- La communication avec les autres équipements permet de décentraliser les fonctions de commande et donc de réduire les temps de traitement des informations.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les interfaces homme-machine intuitifs et interactifs permettent de mieux configurer et ainsi d'optimiser le comportement de chaque composant intelligent selon l'application métier.
- En parallèle, l'adaptabilité des composants intelligents rend possible leur intégration dans de nombreux équipements, ce qui augmente par conséquent la flexibilité de ces derniers.

Sur le plan environnemental, sociétal

- L'optimisation des procédés *via* les composants intelligents fournit également une possibilité d'amélioration de la prévention des accidents et de la sécurité des procédés.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

Le développement des composants intelligents nécessite :

- la réalisation de commandes et d'interfaces compatibles (par exemple, tracteur-outil). Les évolutions concernant leur standardisation sont à observer avec attention ;
- la maîtrise des modélisations et essais sur les fonctionnements hybrides ;
- un gain en maturité concernant la gestion des stockages intermédiaires (accumulateurs oléopneumatique, volants d'inertie, batteries, supercondensateurs) ;
- un développement des lois de commande permettant l'optimisation des mouvements et des consommations ;

FICHE 13

COMPOSANTS INTELLIGENTS

- une adaptation de l'actionnement au temps réel des processus mécaniques visés;
- la réalisation miniaturisée de systèmes embarqués performants.

Au niveau numérique

- La communication est un aspect central des composants intelligents. Certaines données sont traitées au niveau du composant (autodiagnostic, optimisation de lois de commande, fonctionnement en mode dégradé). Les autres données transmises par le composant doivent être optimisées quantitativement et qualitativement, fiables et interprétables par son environnement.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Promouvoir les formations d'ingénieurs en mécatronique.
- Renforcer les formations d'ingénieurs en sciences des données.

Les questions à se poser

- Quels sont les nouveaux services réalisables à l'aide des fonctionnalités offertes par les composants intelligents ?
- Est-il possible d'adapter efficacement la production à chaque client ?
- Jusqu'à quel niveau de diversité produit les composants intelligents sont-ils capables de s'adapter ?
- Comment répondre au dilemme enrichissement mécatronique vs production de données ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 14

COMPOSITES À FORTS VOLUMES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La notion de production de pièces en composites à forts volumes est souvent associée à des productions à haute cadence, c'est-à-dire de l'ordre de la minute, pour des marchés bien spécifiques qui intègrent de plus en plus de composites dans leurs produits. Il est important de noter ici que l'approche composite à forts volumes s'inscrit dans une logique de rupture technologique et suppose un fort savoir-faire et un fort niveau d'industrialisation. D'importantes innovations sont attendues dans ce secteur pour accroître les performances, réduire les coûts et les cycles de production, et développer des matériaux plus respectueux de l'environnement.

Principales applications de ces technologies :

Les marchés qui tirent la demande en pièces composites sont l'aéronautique, l'automobile pour les véhicules de sport ou électriques, le bâtiment ou encore l'éolien avec les pales qui s'allongent. L'enjeu est souvent de fabriquer des pièces de structure plus légères que les pièces mécaniques et plus résistantes que les pièces plastiques. L'automobile cherche à intégrer ces matériaux dans des composants critiques (structure siège, renfort tableau de bord, châssis, longerons). Les secteurs aéronautique, génie civil, naval de plaisance voient l'application des composites étendue à des éléments structuraux.

Principaux segments technologiques concernés :

- composites à matrice thermoplastique TP à fibres longues (prepregs, comélanges...) et leur mise en œuvre ;
- composites à matrice thermoplastique TP renforcé par des fibres (carbone, verre) et leur mise en œuvre ;
- enroulement filamentaire ;
- formage ;
- incorporation de nanotechnologies (charges électriquement conductrices, charges amortissantes...);
- injection séquentielle ;

- intégration de fonctions (renforcement, insonorisation, ignifugation, propriétés de surface, autoréparation) ;
- mise en forme par infusion, infusion sous vide ;
- mise en forme par pultrusion ;
- moulage par transfert de résine (RTM) ;
- RTM fibres longues ;
- placement de fibre – composites ;
- *Reaction Injection Moulding* (RIM) ;
- thermoformage ;
- hybridation des procédés de mise en œuvre des composites ;
- procédé haute cadence et automatisés ;
- composites hybrides-thermoplastiques/thermodurcissables ;
- composites intelligents.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réduction des délais et du coût de fabrication compte tenu des formes que l'on peut obtenir et de l'intégration éventuelle de fonctions (instrumentation, etc.) pour augmenter le taux d'utilisation dans certains secteurs.
- Robustesse du positionnement marché.
- Perspectives de croissance et de taux de pénétration optimistes.
- Amélioration de la durée de vie des pièces et optimisation de certaines propriétés (vibrations, conductibilité, corrosion, etc.).
- Réduction des pertes matières et des rebuts.
- Recyclabilité pour les composites thermoplastiques.

FICHE 14

COMPOSITES À FORTS VOLUMES

Sur le plan technologique

- Allègement des produits tout en conservant des propriétés mécaniques importantes et orientables, tenue à la corrosion.
- Obtention de formes complexes (avec des matériaux sur mesure) ou de grandes dimensions.
- Réduction du nombre de pièces, simplification de l'assemblage (y compris avec des pièces métal).
- Intégration de fonctions, absorption de chocs, tenue aux vibrations, neutralité chimique.
- Durée de vie de la pièce en fonction du procédé mis en œuvre.
- Réparabilité et recyclabilité des pièces dans certains cas.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Nécessité de travailler avec l'ensemble de la supply chain, des chercheurs et des fabricants d'équipements jusqu'aux donneurs d'ordres pour industrialiser la production à forts volumes.
- Possibilité de changement de métier en basculant du métallique au composite.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Implication nécessaire des filières de recyclage adaptées dans les discussions (exemple : dissolution des résines, extraction des fibres pour réemploi) pour garantir une fabrication durable.
- Bonne acceptation par le public des produits en composite.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Il est nécessaire d'avoir une réflexion globale « matière-procédé-outillages-produit » pour aboutir au meilleur compromis performance, robustesse, cycle et coût.

Au niveau technologique

- Innovations liées aux fibres de carbone à bas coût pour des applications produites en grande série : à titre d'exemple, l'utilisation de la lignine ou d'autres précurseurs pour réduire le prix des fibres de carbone sont actuellement à l'étude.
- Développement de fibres de verre aux performances mécaniques et chimiques améliorées.
- Développement des procédés « grande cadences » :
 - > la compression, l'injection et le RTM sont les procédés les plus utilisés pour les grandes séries, tandis que le drapage manuel et le RTM sous vide sont réservés aux cadences inférieures à 1 000 pièces par an ;
 - > l'enroulement filamentaire, le spiralage et la centrifugation sont les méthodes idéales pour les pièces de révolution.
- Adaptation et/ou développement des technologies de contrôle (forme, santé matière, etc.) en continu, adaptés aux pièces et aux procédés (tomographie haute résolution, ultrasons mono et multi éléments, thermographie infrarouge active, radiographie X, imagerie Thz).
- Adaptation des procédés d'assemblage, entre eux et avec des pièces métalliques.
- Réduction du temps de préparation du matériau composite en amont du procédé et du temps de cycle de fabrication (robotisation, pilotage autoadaptatif).

FICHE 14

COMPOSITES À FORTS VOLUMES

Au niveau numérique

- La chaîne numérique doit être la plus complète possible entre procédés et conception.
- Conception optimisée en s'appuyant sur des bases de données matériaux.
- Appui sur des technologies de simulation/essais multi matériaux pour :
 - > optimiser la composition renfort/matrice (renfort au bon endroit, dans le bon sens avec le bon maillage en minimisant les pertes matières) ;
 - > maîtriser la viabilité du procédé lié à l'anisotropie des composites.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Nécessité de s'affranchir des géométries et savoir-faire métallique, penser « composite ».
- Sensibilisation à l'intégration d'un maximum de fonctionnalité lors de la mise en œuvre du composite par l'hybridation des procédés (insertion de composants pendant la fabrication).

Les questions à se poser

- Puis-je faire ma pièce en composite ? Quels sont les avantages techniques ?
- Quelles fonctions puis-je intégrer à ma pièce ?
- Le ROI est-il compatible avec ma stratégie d'investissement ?

▶ MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FABRICATION ADDITIVE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La fabrication additive (ou impression 3D) désigne l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique directement à partir de son modèle numérique. Ces procédés, nombreux, se différencient par :

- la manière de déposer les différentes couches de matériaux (fusion, frittage, polymérisation,...) ;
- les matériaux utilisés sous forme solide (poudres métalliques, polymères, granulés...), liquide (résine photosensible...), ou encore sous forme de produits semi-finis (rubans, fils...).

Ces différents procédés permettent, par rapport aux technologies de fabrication conventionnelles (usinage, forgeage, emboutissage), de réaliser des produits de forme quasi arbitraires (personnalisables à l'unité près, adaptable à de vastes familles de pièces, etc.), non réalisables autrement (formes complexes, structures internes, *lattices*, etc.), avec une chaîne de machine et d'outillage minimale.

Principales applications de ces technologies :

Le coût actuel de production sur ces technologies les rend intéressantes pour le moment sur des segments pour pièces complexes en petites/moyennes séries. Les marchés les plus porteurs actuellement sont l'aéronautique, le spatial ou encore le médical (pièces métalliques à forte valeur ajoutée ou personnalisées). Les usages se développent de façon plus générale dans le transport (automobile, ferroviaire, naval), l'énergie, les biens de consommations (luxe) et sont amenés à terme à se diffuser sur l'ensemble des secteurs industriels (avec des besoins et technologies associés propres) On distingue souvent quatre usages : pièce pour prototypage rapide ; pièce d'outillage (moule, préhenseur, adaptateur, etc.) ; pièce intermédiaire (qui sera retravaillée) ; pièce finale (peu retravaillée).

Principaux segments technologiques concernés :

Ces technologies sont nombreuses et évoluent rapidement avec les avancées des constructeurs de machines. On les distingue essentiellement par les matériaux employés (métaux, polymères/plastiques, céramiques, cartons, bois, béton...) et la source d'énergie ou d'agglomération utilisée (faisceau laser ou électron, fusion par arc, photopolymérisation, fil fondu, frittage, découpe par stratification...). Différents acronymes sont utilisés, associés ou non à des offres commerciales, souvent interchangeables, et rendent la lecture du paysage plus difficile. Une typologie peut être consultée ici¹.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Simplicité de mise en œuvre du procédé.
 - > Réduction des coûts et des délais de réalisation de prototypes et de pièces de petite série.
 - > Gestion optimisée des stocks (production à la demande), des pièces de rechange et des réparations.
 - > Localisation possible de la production au plus près du besoin (notamment pour les réparations et les pièces de rechange).
 - > Versatilité du moyen de production par rapport aux pièces produites.
- Optimisation des procédés de fabrication
 - > Réduction des étapes de fabrication requises et du nombre d'assemblages.
 - > Réduction du nombre d'outillages ou optimisation des outillages (par exemple, pour les moules la réalisation de canaux de refroidissements thermiques).
- Optimisation de la pièce finie
 - > Rajout de fonctions pour procédé de fabrication équivalent, allègement de masse.
 - > Réalisation de nouvelles géométries, nouvelles architectures, nouveaux matériaux.

1. <https://www.3dhubs.com/s3fs-public/talk/attachments/Additive-Manufacturing-Infographic-3DHubs.png>.

FABRICATION ADDITIVE

Sur le plan technologique

- Possibilité de créer des formes complexes (*lattices*, matériaux architecturés) impossibles à fabriquer selon les procédés conventionnels.
- Intégration de fonctions : possibilité de produire une pièce composée de plusieurs sous-systèmes en moins d'étapes, impliquant ainsi une réduction de nombre d'opérations d'assemblage.
- Opportunité de mise en œuvre de nouveaux matériaux, fabrication multi-matériaux.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Possibilité de travail avec le réseau de fournisseurs et/ou de distribution pour mutualiser les moyens de production et l'optimisation des coûts matière.
- Réorganisation des unités de production au plus près des lieux d'usage ou d'intégration.
- Évolution vers des gammes de produits personnalisés et de produits à la demande, dans une approche service, collaborative et boucle courte avec le client.
- L'utilisation simplifiée du prototypage rapide pour faire évoluer les processus d'innovation et d'usages.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Utilisation de matière uniquement là où c'est nécessaire : économies de matières premières par rapport aux procédés soustractifs.
- Optimisation des pièces (allègement de masse) et des moyens de production (chaîne de production simplifiée, localisée) : réduction de la consommation énergétique et des émissions de carbone.
- Transition de la production de masse vers la personnalisation de masse.
- Possibilité d'inclure au plus près de l'entreprise les contributions de la communauté d'utilisateurs aux

processus d'innovation ouverte, de nouveaux usages et de production (similaire à ce qu'on pourrait trouver dans les communautés logicielles « Open Source »).

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Anticiper le coût de production par pièce (lié aux capacités de production des machines) :
 - > vitesse d'impression ;
 - > nombre de pièces imprimables en même temps ;
 - > taille des pièces imprimables.
- Garantir une pièce bonne qualité matière grâce une meilleure maîtrise des paramètres de fabrication (ainsi que les implications pour les pièces critiques à certifier ou à qualifier notamment pour les filières transport et médicale).
- Intégrer au plus près du procédé les opérations de contrôle qualité.
- Anticiper les étapes de parachèvement (par rapport aux états de surface ou d'état du matériau requis).
- Considérer les possibilités d'utilisation conjointe des procédés plus traditionnels (forge, usinage, emboutissage..).

Au niveau numérique

- Considérer les nouvelles capacités d'intégration logicielle entre la conception, la production (y compris les post-traitements) et le contrôle qualité.
- Prendre en compte les capacités à simuler et à capitaliser les données sur le processus de fabrication additive et les performance matériau.
- Considérer les nouvelles opportunités de conception adaptées à la fabrication additive (optimisation topologique, etc.).
- Anticiper les implications sur la contrefaçon, la traçabilité et la propriété intellectuelle associée aux modèles numériques et pièces produites.

FICHE 24

FABRICATION ADDITIVE

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Sortir de l'approche traditionnelle de la fabrication : les bureaux d'études peuvent désormais concevoir par rapport à une fonctionnalité souhaitée et non par rapport aux contraintes de fabrication des procédés.
- Repenser le processus de conception des pièces existantes grâce à l'optimisation topologique ainsi que la conception conjointe des pièces et de leur paramètres machine de fabrication.
- Rester informé des évolutions rapides technologiques, d'usage et d'offre de formation (continue et initiale).

Les questions à se poser

- Quels sont les impacts de la fabrication additive au-delà du moyen de production de pièces (versatilité du moyen de production, gestion différente des stocks et logistique, relations nouvelles de co-conception ou innovation avec le client-fournisseur, nouveau business model...)?
- Quelle meilleure approche entre *make or buy* (dois-je acquérir une machine ou solliciter un sous-traitant, ou mutualiser un équipement...) par rapport aux maturités des différents procédés et les conditions d'hygiène de mise en œuvre, notamment par rapport aux procédés poudres fines?
- Quel impact sur les exigences de certification-qualification de ma filière?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 25

FIABILITÉ DES SYSTÈMES MÉCATRONIQUES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La fiabilité correspond à la confiance, dans le temps, qu'un utilisateur peut accorder à un équipement ou à un dispositif dont il attend un service. Elle doit être considérée comme une performance à part entière. Les constructeurs doivent mettre en œuvre les moyens permettant d'atteindre les objectifs de fiabilité visés. Les équipements mécatroniques doivent fonctionner sans défaillance pendant des durées de service de plus en plus longues. Les conditions d'emploi particulièrement sévères de la mécatronique embarquée font apparaître des mécanismes de défaillance nouveaux.

Principales applications de ces technologies :

Aérospatial, agroalimentaire, automobile, chimie/pharmacie/cosmétique, défense, électroménager, énergie, ENR, ferroviaire, industrie papetière, machine-outil, machines d'emballage, machines de fabrication additive, machines textile, machinisme agricole, manutention, matériel de TP, matériel médical, robotique.

Principaux segments technologiques concernés :

Internet des objets, sûreté de fonctionnement, modes dégradés, modèles dynamiques de la fiabilité.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réduction du nombre de composants critiques.
- Réduction du coût et du nombre de prototypes nécessaires à la validation du système.
- Réduction du nombre de pannes et donc des temps d'arrêts des équipements.
- Allongement de la durée de vie.

Sur le plan technologique

- Intégration fonctionnelle (collaboration entre les composants pour la réalisation des fonctions du système mécatronique) et intégration physique.
- Information embarquée et connectivité aux réseaux.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Analyses qualitatives fonctionnelles (FAST, SADT...) et dysfonctionnelles telles que l'AMDEC impliquant davantage d'experts et de compétences techniques variées, modèles dynamiques de la fiabilité (ex : variations de température).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduction des consommations énergétiques par une meilleure intégration des sous-systèmes.
- Équipement croissant des pays émergents, qui constituent actuellement les foyers de croissance les plus importants.
- Sécurité des utilisateurs renforcée.
- Ergonomie : informations utilisateur.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Compréhension des effets des contraintes d'origine thermique, vibratoire, humide, électrique et électromagnétique, intégration progressive des composants électroniques dans les systèmes embarqués avec des contraintes d'environnement sévères.
- Prédire l'origine d'une défaillance sur un composant.

Au niveau numérique

- Gestion des systèmes de contrôles et de régulation.
- Sécurité des systèmes et contrôle des accès commande.

FICHE 25

FIABILITÉ DES SYSTÈMES MÉCATRONIQUES

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- La mécatronique nécessite de rassembler des compétences techniques variées (mécanique, hydraulique, pneumatique, électronique, informatique, automatique, métrologie...) mises en commun à travers des démarches de co-ingénierie et de travail collaboratif.
- La mécatronique impose notamment de faire dialoguer les experts de différents domaines entre eux.

Les questions à se poser

- La combinaison de ces technologies doit être étudiée dès la phase de conception des systèmes mécatroniques de façon à garantir leur fiabilité : analyse fonctionnelle, simulation du comportement dynamique et évaluation de la sûreté de fonctionnement.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FONCTIONNALISATION DE SURFACE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les propriétés d'emploi des matériaux dépendent de plus en plus de leur composition superficielle. L'industrie s'est en effet attachée, au cours des trente dernières années notamment, à développer des revêtements et des traitements permettant, par des moyens mécaniques, physiques, chimiques ou électrochimiques, d'obtenir à la surface d'un matériau la modification de sa nature, de sa composition, de sa structure ou de l'état de ses contraintes superficielles, sans modifier ni altérer ses caractéristiques à cœur. Les traitements de surface permettent donc d'améliorer les propriétés de surface d'un matériau pour conférer aux produits une plus grande valeur ajoutée en les rendant plus résistants à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure et au frottement, et plus performants thermiquement et électriquement, en améliorant leur aptitude au soudage ou simplement leur aspect, etc. On peut ainsi, en protégeant un acier au carbone par un revêtement de zinc, une passivation et un système de peintures, lui conférer une résistance à la corrosion tout en gardant d'excellentes propriétés mécaniques, comme c'est, par exemple, le cas des tôles automobiles.

Le développement de tels traitements a nécessité la mise en place d'outils d'étude et de contrôle afin d'aboutir à des produits fiables et reproductibles.

Compte tenu de l'essor de l'industrie des traitements de surface, l'analyse et d'une façon plus large la caractérisation des surfaces ont aujourd'hui une nécessité dans de nombreux domaines : corrosion, oxydation, passivation, catalyse, usure, frottement, lubrification, diffusion, adsorption, adhérence, conductivité thermique et électrique, photovoltaïque, etc. Suivant le problème étudié et les propriétés concernées, la définition du terme surface peut varier de façon très importante, depuis la stricte monocouche ou multicouches (de quelques micromètres d'épaisseur) jusqu'à des couches atteignant plusieurs dizaines de micromètres ou plus, de 50 à 100 µm d'épaisseur d'alumine (Al₂O₃) par exemple, après traitement d'anodisation dure sur une pièce en aluminium.

Il existe une grande variété de méthodes d'analyse disponibles, dont certaines sont essentiellement utilisées dans les centres de recherche universitaires ou les centres techniques. On constate toutefois que la localisation des appareils s'est considérablement étendue suite aux nombreux développements réalisés et qu'elle dépend aujourd'hui d'une part du degré de sophistication et d'avancement de la technique, et d'autre part, de la valeur ajoutée du produit analysé. Cependant, si l'on exclut le domaine de la microélectronique, peu de méthodes sont adaptées au contrôle des surfaces industrielles, à partir du moment où l'on souhaite une information rapide sur un grand nombre d'éléments et pour des épaisseurs de couches très variables, ce qui est souvent le cas après les traitements ou les revêtements. Par ailleurs, la qualité des échantillons ne permet pas toujours l'obtention d'un vide poussé (porosité, rugosité importante, présence de résidus organiques, etc.).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Améliorer les propriétés de surface d'un matériau pour conférer aux produits une plus grande valeur ajoutée en les rendant plus résistants à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure et au frottement, et plus performants thermiquement et électriquement en améliorant leur aptitude au soudage ou simplement leur aspect, etc.
- Élargir l'offre industrielle par des produits novateurs et différenciateurs.
- Possibilité de « reconverter » des produits en leur donnant une autre fonction et s'ouvrir ainsi de nouveaux marchés.
- Limiter l'usure, et par voie de conséquence la chaleur à évacuer, réduit considérablement les coûts de maintenance.

Sur le plan technologique

- Mise en place d'outils d'étude et de contrôle afin d'aboutir à des produits fiables et reproductibles.

FONCTIONNALISATION DE SURFACE

- Attribuer de nouvelles fonctions aux matériaux, pour répondre à des objectifs multiples d'utilisation (frottement, étanchéité, design esthétique, électrique, optique, hydrophobie et oléophobie, antireflet, adhérence, antibactérien, anti-contrefaçon, anticorrosion, antigivrage, anti-graffiti, anti-rayure, ignifugation, nettoyabilité...).
- Possibilité de combiner des fonctions.
- Augmenter la durabilité de l'intégrité des surfaces vis-à-vis des sollicitations de service.
- Diminuer le coût énergétique de fonctionnement par des caractéristiques tribologiques maîtrisées.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Maîtriser la grande variété de méthodes d'analyse disponibles.
 - > Le choix de la technologie permettant d'obtenir la caractéristique voulue implique une réflexion spécifique pour trouver le meilleur compromis matériaux-caractéristiques-procédés-contrôle, en particulier lors de la recherche de propriétés innovantes.
 - > Le matériau de base ainsi que ceux d'apport, s'il y en a, doivent être parfaitement maîtrisés. La dispersion statistique des caractéristiques initiales ne doit pas trop perturber le résultat final, ou du moins, permettre de se focaliser uniquement sur la dispersion obtenue par le procédé de fonctionnalisation.

Au niveau numérique

L'emploi d'outils de simulation multi-physique permet

d'anticiper les problèmes, d'optimiser les outillages et le réglage des paramètres. Par exemple, la simulation du traitement thermique donne la possibilité de décrire préventivement le profil de dureté, les profils de concentration, le niveau et l'orientation des contraintes résiduelles et le niveau de déformation. La simulation de croissance des couches minces permet de prévoir la structure et la morphologie de surfaces d'un dépôt selon les conditions d'élaboration appliquées, donc intrinsèquement, sa composition chimique et certaines de ses propriétés mécaniques et structurales.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Besoins en maîtrise des procédés de collage et de leur évolution, et aux méthodes de contrôles de ces procédés en termes d'état de surface et de propriétés fonctionnelles de ces surfaces.
- Les compétences à mobiliser dépendent des procédés de fonctionnalisation et des modes de contrôle. La plupart font néanmoins appel à des connaissances maîtrisées en physique-chimie ainsi qu'à des techniques de contrôle et de mesure de type laboratoire (caractérisation micro/nano, etc...).

Les questions à se poser

- Est-ce que les performances mécaniques et en fatigue de mes pièces sont suffisantes ?
- Puis-je reconvertir un produit en lui donnant une autre fonction et m'ouvrir ainsi de nouveaux marchés ?
- Quelles sont les procédés de fonctionnalisation de surface qui me sont accessibles de façon économique et technologique ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Contributeur : Arts et Métiers (Corinne Nouveau, LABOMAP)

FORMAGE ET USINAGE INNOVANTS OU OPTIMISÉS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Cette fiche technologique désigne les nouvelles solutions apportées aux procédés conventionnels de formage et d'usinage pour gagner en flexibilité, qualité et productivité.

Principales applications de ces technologies :

Si les acteurs directement concernés sont principalement situés dans le secteur de la transformation métallique (que ce soit par enlèvement de copeaux ou par déformation de tôles), les technologies de formage et usinage sont omniprésentes et transversales à de nombreux secteurs d'activités : de l'énergie aux transports en passant par l'automobile, le BTP, l'électronique ou encore le nucléaire.

Les principales innovations à mettre en œuvre sont décrites dans le paragraphe « Enjeux sur le plan technologique ».

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Diminution des coûts de production (temps de cycle, temps de manipulation, taux de rebuts).
- Agilité accrue pour produire plus de références en un même temps et augmenter le taux d'occupation des machines.
- Flexibilité de l'outil de production en vue de personnalisation des produits et la diminution du time to market.

Sur le plan technologique

Pour l'usinage :

- amélioration du procédé par une assistance à la coupe pour augmenter la durée de vie des outils et obtenir un état de surface amélioré avec des technologies cryogéniques, vibratoires, ultrasonores, par jet haute pression ou laser ;
- palettisation rapportée pour apporter une grande flexibilité et une meilleure agilité – par exemple, contrôle sur machine à mesurer tridimensionnelle en cours d'usinage ;

- utilisation de machines multi-procédés ou hybrides pour obtenir directement des pièces terminées sans changer de référentiel ;
- utilisation de machines auto-adaptatives, c'est-à-dire qui adaptent automatiquement les paramètres d'usinage aux conditions rencontrées lors de l'opération (température, vibrations, puissance absorbée...).

Pour le découpage-emboutissage :

- amélioration de la productivité et de la formabilité de la tôle par l'utilisation de presses à servomoteurs (qui permettent d'obtenir des profils de vitesse-déplacement impossibles à obtenir auparavant) ;
- mise en œuvre de technologie de formage incrémental (sorte de repoussage étendu aux formes quelconques autres que révolution) qui permettent de s'affranchir d'outils pour les petites séries ;
- mise en œuvre de technologies de formage et découpage à grande vitesse (procédés adiabatiques, formage par décharge électrique, magnétoformage) qui autorisent des cadences de production extrêmement rapides et améliorent la qualité des pièces fabriquées ;
- formage à mi-chaud appliqué aux aluminiums, jusque-là non formables à froid, pour l'allègement des pièces acier ;
- réalisation de trempe sous presse pour gagner en productivité (pièce traitée dans l'outil).

Sur le plan numérique

- Instrumentation des outils pour ajuster au mieux les paramètres de fabrication et fournir des pièces bonnes à 100 %.
- Simulation numérique des procédés prenant de mieux en mieux en compte les spécificités métiers.
- Instrumentation des palettes par des puces embarquées pour obtenir de l'information en temps réel et renseigner directement le MES pour une planification au plus près des besoins.

FORMAGE ET USINAGE INNOVANTS OU OPTIMISÉS

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduction de la quantité d'effluents nocifs générés par les procédés d'usinage ou de formage.
- Amélioration de la biodégradabilité des biolubrifiants d'origine végétale.
- Conditions de travail améliorées par la réduction des effluents (environnement plus propre et sain).
- Diminution des rebuts pour une entreprise plus propre et compétitive.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Innovation incrémentale : impact relativement faible sur le processus production ou le mode d'organisation du travail et de l'entreprise.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Maîtrise plus difficile des procédés de formage à chaud.
- Hybridation des procédés usinage-formage laser-formage électromagnétique.
- Lubrification plus complexe au niveau des alliages légers (aluminium, magnésium).
- Avancées récentes dans les technologies de formage de tôle qui nécessitent une adaptation des règles métier de base.

Au niveau numérique

- L'étude par simulation numérique de ces procédés requiert une parfaite connaissance du comportement plastique du matériau.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

- Développement d'outils de modélisation et de simulation numérique de procédés de formage électromagnétique.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Durant les prochaines années, la filière de l'usinage va être touchée par un vieillissement du personnel en atelier, entraînant un nécessaire renouvellement des effectifs.
- Manque de connaissance des lois de déformations des alliages légers pour le formage.
- Manque de connaissance du comportement des matériaux sous l'effet des forces électromagnétiques.
- Pratiques traditionnelles de lubrification en usinage et formage fortement ancrées.

Les questions à se poser

- Comment puis-je augmenter ma productivité ?
- Comment puis-je répondre à l'évolution des exigences qualité de mon client ?
- Comment diminuer le nombre d'opérations pour la fabrication de mes pièces ?
- Comment mettre en œuvre les nouveaux matériaux imposés par mes clients ?
- Comment faire face à l'augmentation des cadences de production voulus par mes clients ?
- Comment faire face devant la diminution de la taille de mes séries ?

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

MACHINES INTELLIGENTES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les fabricants qui investissent dans les usines intelligentes, ou « usines 4.0 », prévoient des gains d'efficacité pour les activités manufacturières de 27 % au cours des cinq prochaines années, soit une contribution de 500 milliards de dollars en valeur ajoutée annuelle à l'économie mondiale¹. L'usine intelligente, souvent considérée comme le socle de la révolution industrielle digitale, exploite les dernières technologies comme l'IoT (Internet des objets), l'analyse big data, l'intelligence artificielle et la robotique avancée pour gagner en productivité, en efficacité et en flexibilité. Ces usines de pointe utilisent, par exemple, des robots collaboratifs, des outils de réalité augmentée et des machines qui génèrent automatiquement des alertes lorsqu'elles nécessitent des opérations de maintenance.

Selon un nouveau rapport de Gartner intitulé « Smart Machines: Consulting and System Integration Services Market Forecast and Opportunities », près d'un tiers des entreprises vont utiliser sous différentes formes des machines intelligentes dans les cinq prochaines années. En devenant courantes, les machines ouvriront l'ère d'une nouvelle industrie ; une industrie estimée à près de 29 milliards de dollars d'ici cinq ans.

Au fil du temps, l'augmentation des opportunités créée par le nombre croissant d'entreprises implémentant des programmes de machines intelligentes plus complexes devrait être contrebalancée par une réduction des coûts d'adoption, car chaque adoption ultérieure de la même solution de machine intelligente sera moins chère et plus rapide.

Le développement de l'industrie 4.0 passe, entre autres, par la modernisation des équipements. Une remise à niveau qui permet de gagner en productivité. Alors que l'industrie 4.0 prend une ampleur certaine dans les différents secteurs de l'industrie, les infrastructures et machines de production

subissent une mise à niveau progressive. De nombreuses entreprises utilisent encore des moyens de production qui exigent d'être modernisés. Et dans un contexte industriel de plus en plus marqué par la fusion entre les entreprises et Internet, les besoins s'avèrent évidemment importants.

L'automatisation gagne du terrain, grâce à l'accélération du développement de solutions de *machine learning* par les industriels. L'IA dote désormais les machines d'une capacité à apprendre par elles-mêmes. C'est en particulier le cas des circuits neuronaux convolutifs multicouches, inspirés du fonctionnement de nos propres cerveaux. Une machine ainsi équipée est capable de reconnaissance faciale et vocale. La reconnaissance vocale peut notamment être utilisée dans le traitement automatisé du langage.

Nous partageons dorénavant l'infosphère avec des agents artificiels, qui deviennent de plus en plus intelligents, autonomes et même sociaux. Nous devons ainsi nous habituer à cohabiter avec des entités numériques de plus en plus nombreuses et perfectionnées.

Depuis des décennies, les technologies digitales et l'informatisation ont commencé à remplacer la main d'œuvre dans l'agriculture et dans l'industrie. Elles s'attaquent dorénavant aussi aux services. Nul doute que les machines intelligentes constitueront de plus en plus une aide indispensable à l'homme, et ce dans de nombreux secteurs d'activité.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Grâce aux gains de productivité et l'amélioration de la flexibilité et de l'efficacité, les usines intelligentes pourront réduire sensiblement leurs coûts opérationnels :

- moderniser son parc de production afin d'améliorer la traçabilité pour l'élaboration de ses produits ;

¹ <https://www.capgemini.com/fr-fr/news/les-usines-intelligentes-contribueront-pour-500-milliards-de-dollars-a-leconomie-mondiale-au/>

MACHINES INTELLIGENTES

- pouvoir utiliser les informations relatives aux ordres de fabrication des opérateurs pour les intégrer directement aux machines de production ;
- collecter des données issues des processus de fabrication ;
- rationaliser les dépenses logistiques et matérielles et optimiser l'efficacité de l'équipement et la qualité de la production.

Sur le plan technologique

- Le calcul cognitif, l'intelligence artificielle (IA), l'automatisation intelligente, l'apprentissage automatique et l'apprentissage en profondeur sont tous considérés comme des « machines intelligentes ».
- Capacité à apprendre en continu, plus vite que l'homme et sur des quantités de données massives, pour mieux les valoriser.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

L'utilisation de ces *smart machines* par les entreprises peut aussi bien être transformatrice que perturbatrice. Ces machines vont profondément changer notre façon de travailler et de produire de la valeur. Les années à venir s'annoncent cruciales pour les industriels, car ils devront accélérer leur transformation digitale et peaufiner leurs approches pour en maximiser les retours commerciaux.

Pour les fournisseurs de services, les machines intelligentes représentent des occasions d'aider les entreprises à évaluer,

sélectionner, mettre en œuvre, changer et adapter les talents, ainsi que les processus informatiques et commerciaux.

Sur le long terme, les machines intelligentes feront partie intégrantes des outils de la trousse d'outils des fournisseurs de services et seront intégrées à toutes les offres de services de nouvelle génération.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

L'intégration et la maîtrise de l'ensemble des technologies incluses dans le périmètre de l'industrie 4.0 : IoT, big data, AI, blockchain...

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

De nouveaux métiers devraient émerger, notamment dans le domaine du consulting, de l'intégration système, la conception stratégique, la formation, le déploiement et l'intégration. L'avènement des usines intelligentes transformera le marché mondial du travail. Le nombre de postes peu qualifiés a été déjà été réduit à l'issue des premières vagues d'automatisation, et acquérir de nouvelles compétences est devenu un impératif.

Les postes hautement qualifiés dans des domaines tels que l'automatisation, l'analyse et la cybersécurité sont autant d'opportunités de créations d'emplois.

► MATURETÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

MACHINES PROGRAMMABLES INNOVANTES OU OPTIMISÉES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Facteur d'évolution et de compétitivité pour les entreprises, la transition numérique modernise l'ensemble des systèmes de production. C'est un levier puissant pour minimiser les coûts et optimiser les procédés industriels. En effet, la compétitivité industrielle repose avant tout sur la capacité des entreprises à améliorer la performance de leurs systèmes de production et à en augmenter la flexibilité et l'agilité en mobilisant de nombreuses briques technologiques complémentaires (logiciels et technologies de calcul, automatisation, recoupement d'informations, mise en réseau) auxquelles on intègre également les matériaux et les procédés de mise en forme.

La maîtrise des matériaux (métalliques, polymères, composites...) et de leur mise en œuvre par des procédés de transformation et d'assemblage sont des connaissances clés permettant d'asseoir la compétitivité industrielle. Aujourd'hui, les matériaux doivent répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants : meilleures performances, durées de vie allongées, coûts à l'usage toujours plus bas...

Concevoir des pièces avancées, au fort niveau de complexité et possédant des propriétés et fonctions inédites nécessite d'avoir recours à des procédés de fabrication multifonctionnels et multimatériaux, à l'image des machines à commande numérique multiprocédés et/ou à déplacements programmables dont le but est de réduire les temps de cycle de production ou d'envisager des opérations non possibles avant. Ces dernières contribuent grandement à l'augmentation de la flexibilité de l'outil de production. Ces machines multifonctions et multi-procédés combinent différentes approches de la fabrication (fabrication additive, usinage, tournage, rectification, texturation...).

Ces procédés représentent parfois la seule voie possible pour réaliser des pièces aux propriétés très spécifiques : formes complexes, structures allégées à parties creuses, assemblages multi-matériaux, etc. Les techniques de fabrication additive permettent, en outre, de réaliser des

économies de matière première en produisant des pièces quasiment aux cotes, éliminant ainsi les rebus d'usinage. Les pièces multimatériaux sont susceptibles d'offrir des avantages en matière de coûts, ce qui explique qu'un nombre sans cesse croissant d'industries les utilisent.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Gains de performance considérables dans toute une palette d'industries, d'applications et de machines.
- Développement d'une capacité d'adaptation des machines au besoin de production et une plus grande intégration au système de production, en intégrant l'homme à ces systèmes.

Sur le plan technologique

- Capacités améliorées en termes de transformation de précision des pièces, de réduction du temps de réglage, d'ajustement des procédés et d'intégration aux systèmes d'automatisation.
- Mesures et ajustements rapides de la fabrication.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Échanger avec les fournisseurs en se basant sur des éléments plus significatifs, interroger la faisabilité en production, évaluer et mettre à l'épreuve les contraintes de fabrication, et avoir recours à des simulations pour adapter, améliorer ou personnaliser le produit.

Sur le plan environnemental, sociétal

Les procédés de *manufacturing* avancés devraient permettre, à terme, de produire à moindre coût des pièces aux performances améliorées. Ces procédés représentent ainsi une réelle opportunité pour l'industrie tout entière de monter en performance, impliquant de réelles retombées sur le plan environnemental et sociétal.

MACHINES PROGRAMMABLES INNOVANTES OU OPTIMISÉES

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- Robots et automates intelligents, capables d'effectuer des tâches complexes et précises dans un laps de temps court, et même d'interagir avec leur environnement et de définir à partir de celui-ci des actions autonomes.
- Données de comparaison relevées pour définir les corrections des procédés.
- Automatisation des mises à jour des correcteurs d'outil dans les procédés de fabrication.
- *Machine learning* pour l'enregistrement des actions passées et la capacité d'auto-perfectionnement des procédés pour gagner en efficacité et en productivité.
- Capture, reconnaissance, exploitation et analyse avancée des données clés fournies tout au long de la chaîne de production.
- Ces technologies du big data doivent donc impérativement être encadrées par une solution adaptée en termes de cybersécurité.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Des formations doivent être dispensées pour une maîtrise des nouvelles technologies, des métiers (les « talents du 4.0 ») à l'image des programmeurs big data, d'outils de simulation ou encore des managers de robots...

Les questions à se poser

- L'évaluation du potentiel de montée en performance associée à l'adoption de ces nouveaux types de procédés industriels avancés nécessite de casser les barrières et les contraintes établies au niveau des procédés traditionnels :
 - > en l'absence de l'ensemble des contraintes actuelles de l'appareil productif, quelle pourrait être la capacité d'innovation de la chaîne de production et quels seraient les gains économiques associés ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 41

MATÉRIAUX INTELLIGENTS ET ADAPTRONIQUES, MATÉRIAUX FONCTIONNELS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Matériaux disposant de capacités fonctionnelles et évolutives leur permettant de s'adapter en temps réel aux fluctuations de leur environnement (bruit, vibration, déformations des structures...), de récupérer ou de générer de l'énergie. Ces différents matériaux intelligents et systèmes de contrôles actifs sont aujourd'hui destinés à piloter le bruit, les vibrations ou la déformation des structures ou des machines.

Principales applications de ces technologies : les matériaux intelligents sont dotés de capacités d'interaction avec l'extérieur, qui leur permettent de se comporter comme des capteurs, des actionneurs, ou parfois comme des processeurs (pour traiter, comparer, et stocker des informations). Ces propriétés intrinsèques leur permettent d'être explorés actuellement pour de nombreuses applications : contrôle actif de structure ou d'équipement pour empêcher la génération de bruit ou les vibrations, récupération de la chaleur des moteurs, structures autoréparantes (automobile, aéronautique, ferroviaire, énergie, biomédical, BTP).

Principaux segments technologiques concernés : intégration actionneurs/capteurs exploitant les caractéristiques intrinsèques des matériaux pour les petits déplacements, Intégration de capteurs directement dans les matériaux pour la surveillance de structure (polymères électroactifs dans les composites par exemple), isolation vibratoire par suspension actives (à fluides magnéto-rhéologiques par exemple), matériaux multifonctionnels (un même matériau peut être utilisé comme capteur ou comme actionneur), matériaux piezo-électriques, magnétostrictifs (se déformant sous l'action d'un champ magnétique ou générant un champ magnétique sous l'effet d'une déformation), matériaux antimicrobiens, matériaux à gradient de propriétés, structures de matériaux basées sur le biomimétisme, matériaux autoscellant, matériaux polymères transformant chaleur en énergie, polymères chargés électriquement, polymères supra-moléculaires, matériaux pour conditions extrêmes, matériaux à changement de phase, sensibilité des robots par peaux artificielles, systèmes haptiques.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Amélioration du confort des utilisateurs de machines : contrôle actif du bruit (vitrages actifs pour filtrer les bruits de circulation) et des vibrations (suspensions à fluides magnéto-rhéologiques).
- Augmentation de la précision et de la rapidité des procédés de production.

Sur le plan technologique

- Meilleure réactivité et flexibilité des équipements du fait de la capacité des matériaux intelligents à s'adapter en temps réel aux conditions de fonctionnement des installations : isolation vibratoire par suspensions actives, contrôle actif de structure pour l'atténuation du bruit ou pour empêcher la génération du bruit.
- Augmentation des performances d'actionneurs ou de capteurs qui exploitent les propriétés physiques du matériau (physiques, chimique ou mécanique). Profonde transformation de la conception des systèmes électromécaniques futurs, par laquelle les dispositifs électroniques (capteurs, circuits imprimés, puces) pourront être insérés dans la matière lors du procédé de fabrication additive.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Transformation profonde des pratiques à tous les niveaux de la chaîne de valeur : recherche et développement, production, maintenance et marketing.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Optimisation de la consommation énergétique des équipements en fonction des conditions.
- Sécurité renforcée des utilisateurs de par le monitoring de structure.
- Réduction de la pollution sonore.

FICHE 41

MATÉRIAUX INTELLIGENTS ET ADAPTRONIQUES, MATÉRIAUX FONCTIONNELS

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Dans la surveillance de structure, difficultés à différencier une avarie d'une discontinuité de structure (perçage, renfort...), et à exploiter les signaux quand les machines sont en fonctionnement (perturbation par les vibrations par exemple).
- Techniques d'intégration des capteurs et actionneurs dans la matière encore insuffisamment maîtrisées.
- Coûts élevés des composants et des produits finis.
- Développement de nouvelles solutions de contrôles non destructifs correspondant aux spécificités des défauts et phénomènes de vieillissement/rupture des matériaux intelligents.

Au niveau numérique

- Renforcement de la chaîne numérique entre le développement matériaux, la conception du produit, l'optimisation fonctionnelle, les procédés de fabrication ou encore la maintenance.
- Conception optimisée en s'appuyant sur des bases de données matériaux
- Fabrication additive : optimisation topologique pour produire des composants à gradient de fonctionnalités et de performances.
- Commande numérique de l'insertion de composants et

du dépôt de couches de circuits imprimés sur ou dans les pièces. Les pièces mécaniques deviennent des systèmes électromécaniques connectés.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Le déploiement de l'adaptatronique suppose d'allier des compétences en matériaux, régulation, électronique, calcul, intégration de systèmes, techniques de fabrication et fiabilité.
- Sensibilisation nécessaire du personnel aux opportunités d'intégration de fonctions et fonctionnalités au sein des nouveaux produits.

Les questions à se poser

- Généralisation du contrôle actif des vibrations et du bruit à de nombreux domaines pour augmenter le confort des utilisateurs et la durée de vie des équipements.
- Déploiement et taux de pénétration de l'impression 4D (fabrication d'objets capables de se transformer au fil du temps (autoassemblage, déplacement, rétractation...) en fonction de stimulations extérieures, technologie qui forme un horizon pour l'industrialisation des procédés de fabrication.
- Développement de la « sensibilité » des robots à l'aide de peaux artificielles.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

MATÉRIAUX NON MÉTALLIQUES ET FLUIDES BIOSOURCÉS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les produits biosourcés pour la chimie et les matériaux sont des produits industriels non alimentaires obtenus à partir de matières premières renouvelables issues de la biomasse (végétaux par exemple). Dans un contexte où l'épuisement des ressources fossiles (pétrole, minerais...) et l'augmentation des prix des matériaux liés à ce phénomène est une réalité, il semble nécessaire de rechercher de nouvelles solutions à base de biomasse. De plus, l'impact des solutions actuelles sur l'environnement pousse cette dynamique vers des énergies et des solutions plus vertes, notamment avec des matériaux et substances biosourcés. Les matériaux biosourcés, quel que soit le secteur d'utilisation, sont des matériaux répondant aux critères techniques exigés (dans le secteur de la construction ou de la chimie verte par exemple), mais aussi à des critères environnementaux, tout au long de son cycle de vie.

Toutefois, les projets de lois et objectifs issus du Grenelle de l'environnement en 2007 et plus récemment de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LOI n° 2015-992 du 17 août 2015) pourraient encourager le décollage de cette approche. Les laboratoires de recherche et centres techniques développent pour des secteurs métiers des processus de validation technique pour les ETI, PME/TPE. Les acteurs adossés aux laboratoires et pôles de recherches centrés sur les matériaux, les procédés et produits innovants (exemple : le CSTB – Conseil Scientifique et Technique du Bâtiment) et qui sont soutenus par des actions pilotées par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) permettent de développer et proposer des solutions alternatives à base de matériaux biosourcés. Ainsi, le nombre de marchés d'applications et de donneurs d'ordres qui lancent des gammes de produits biosourcés est en constante augmentation.

Principales applications de ces technologies : automobile, aéronautique, ferroviaire, énergie, oil and gas, biomédical santé, textile, agro-alimentaire, bâtiment ou encore les biens d'équipements. De manière plus générale, il s'agit de tous les

secteurs ou les matériaux en masse ou en surface ont un rôle fonctionnel important.

Principaux segments technologiques concernés : biofluides, agro-solvants (dérivés des terpènes, des esters méthyliques végétaux, d'alcools...), agro-lubrifiants, biomatériaux (caoutchouc biosourcé...), fibres d'origine végétale (lin, chanvre, miscanthus, bois, kenaf...) pour servir de renfort dans les pièces composites, bionanocomposites (dérivés de l'amidon et de la cellulose, du PLA, de la polycaprolactone, des PBS et PHB), formulation des matrices pour les composites TP hautes performances à base de polyamide, composites TD, graisses biosourcées, nanoparticules (microfibrilles de cellulose, nanocellulose), élastomères chargés et nanochargés, élastomères fluorés, silicones, composites TP bio/bois, additifs biosourcés, charges d'origine végétale, polymères partiellement biosourcés (mousses PU, polyamides huile de ricin, bio-PET et bio-PE, PP...), traitement de surfaces.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réduire l'impact du coût du pétrole et des émissions de CO₂.
- Diversifier les sources d'approvisionnement en matière première.
- Bénéficier d'un retour sur investissement intéressant à long terme (en prenant en compte la conception, la fabrication, l'entretien, ainsi que les problèmes évités liés, par exemple, à la pollution ou la déconstruction).

Sur le plan technologique

- Qualités techniques et performances durables dans le temps.
- Nouvelles propriétés des matériaux et produits issus de la biomasse.

MATÉRIAUX NON MÉTALLIQUES ET FLUIDES BIOSOURCÉS

- Faciliter le recyclage des matériaux et bénéfices supérieurs offerts d'un point de vue environnemental et sanitaire.
- Nouveaux procédés de production de fibres de carbone à partir de précurseurs renouvelables à bas coût : cellulose de lignine et nanotubes de carbone.
- Pallier les déficits d'image et de visibilité du « biosourcé ».
- Recyclabilité, normalisation et labels (ex : teneur en matière, caractère renouvelable, performance environnementale...).

Au niveau numérique

Sur le plan environnemental, sociétal

- Faibles répercussions environnementales.
- Diminution de l'empreinte écologique de la construction.
- Diminution des risques toxicologiques et écotoxicologiques.
- Création d'emplois en France, où le développement des matériaux biosourcés a été bien plus lent qu'en Europe du Nord, en Allemagne et aux Pays-Bas.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Identification de l'origine des matériaux et substances alternatifs.
- Gestion/exploitation des ressources naturelles de matières premières.
- Procéder à une meilleure évaluation du réel impact sur l'environnement de ces matériaux (mode de calcul).
- R&D à réaliser pour tester les nouveaux produits (ex : tenue à la corrosion au contact de biofluides, stabilité du PLA) et procédés associés.
- R&D à réaliser pour développer de nouvelles transformations de biomasse ou de valorisation de coproduits.
- Degré de maturité hétérogène selon les matériaux.
- Maîtriser de nouveaux matériaux (technicité, performance...), leurs propriétés et leur mise en œuvre (manque de recul sur le vieillissement des pièces).

- De nouvelles techniques de modélisation numérique des processus de transformation de matériaux biosourcés doivent atteindre un niveau de maturité plus élevé.

- Exemples de travaux en simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés.

- Le pôle de compétitivité Fibres-Énergivie se lance dans la formation professionnelle sur les matériaux biosourcés et la maquette numérique pour le bâtiment.

- Création et diffusion d'informations (*Market Place*) sur les fournisseurs, disponibilités et propriétés des matériaux ou composants biosourcés.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- En partenariat avec les organisations professionnelles et les associations de l'écoconstruction, les régions favorisent la montée en compétence de milliers de professionnels dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.
- Implication avec les acteurs des filières amont (de la graine à l'arbre ou à la plante) issu des secteurs de l'agro-industrie.

Les questions à se poser

- Est-ce que le manque de maturité des technologies associées aux matériaux biosourcés n'est pas un frein à la volonté de monter en compétences des entreprises ?
- Normalisation des matières premières biosourcées.

FICHE 42

MATÉRIAUX NON MÉTALLIQUES ET FLUIDES BIOSOURCÉS

► MATURITÉ DE L'OFFRE



► LIENS UTILES

Contributeurs : Arts et Métiers (Nicolas Perry I2M)

MICRO-FABRICATION

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Dans un monde, où l'on cherche à avoir des composants de plus en plus petits, la micro-fabrication et les techniques associées se développent énormément. Elle se caractérise par le fait de fabriquer des pièces de taille millimétrique à micrométrique issues des techniques destinées à l'horlogerie, la bijouterie, la mécanique et l'électronique. La micro-fabrication a permis d'aller vers la nano-fabrication désormais très utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs.

Principales applications de ces technologies : la micro-fabrication représente un challenge technique et scientifique dans de nombreux domaines : électronique grand public, aéronautique (électronique de mesure embarquée, pression en cabine...), automobile, médical (chirurgie oculaire, échographie, *lab-on-chip*, implants, dispositifs médicaux), procédés industriels. Les métiers de l'horlogerie, la bijouterie, la mécanique et l'électronique sont de grands consommateurs historiques de ces technologies.

Principaux segments technologiques concernés : *desktop factory* (micro-usines de la taille d'un bureau), micro-assemblage, micro-décolletage, micro-fabrication multi-fonctions, micro-formage des tôles, micro-logistique et micro-transitique, micro-moulage par injection, micro-moulage multimatières, micro-poinçonnage, micro-plier et micro-emboutissage, micro-soudage laser, micro-usinage, micro-usinage chimique, nano et micro extrusion de films plastiques, micro-thermoformage, contrôle des épaisseurs de films multicouches nanométriques, contrôle des procédés et des pièces plastiques micro, nano-électroérosion.

ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La micro-fabrication répond aux besoins de miniaturisation, de compacité et d'allègement exprimés dans de nombreux marchés pour notamment ajouter des capteurs ou des actionneurs, augmenter l'intelligence de ces composants ou encore réduire l'encombrement total.
- La micro-fabrication permet d'augmenter les cadences de production grâce notamment aux techniques de formage de feuillards, de tôles ou de bandes très minces sur des pièces métalliques.
- Le faible coût d'une micromachine est un élément important, sa petite taille également, dès lors que l'usine se trouve sur une zone où le foncier est cher.

Sur le plan technologique

- À fonction équivalente, les microsystèmes apportent un gain en volume et en masse. Inversement, ils permettent de réaliser plus de fonctions dans le même volume.
- Faibles masses mises en jeu et développement de nouveaux modes d'actionnement (électrostatique par exemple).
- Proposer de nouveaux produits non réalisables par les techniques traditionnelles.
- Augmenter la robustesse par rapport aux pièces équivalentes macroscopiques par leur faible taille et par l'utilisation de matériaux proportionnellement beaucoup plus robustes (car monocristallins par exemple).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- On observe une transformation/mutation de certains usiniers vers la micro-fabrication.
- Afin d'envisager un remplacement de l'usine dans la ville, celle-ci doit être peu polluante, faible consommatrice d'énergie et facilement reconfigurable.

FICHE 44

MICRO-FABRICATION

- La Chine devrait devenir un des marchés principaux spécialisés sur les micro-technologies dans ces prochaines années.
- Davantage de flexibilité sur les équipements de production.
- Développement de solutions de visualisation 3D pour la micro-fabrication de MEMS.
- Amélioration des performances des asservissements des machines de micro-usinage.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduction de la consommation de matière et d'énergie grâce à la micro-fabrication. En effet, la micro-fabrication permet d'économiser les matières premières utilisées dans la fabrication de certaines pièces.
- Réduction de la consommation d'énergie dans la mesure où la consommation des microsystèmes est souvent inférieure à celle du système équivalent.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Maîtrise de nouveaux outils permettant d'aller sur des secteurs variés : micro-outils de coupe, préhension de pièces micromécaniques, micro-usinage 5 axes, micro-soudage et micro-usinage laser, assemblage, montage, micro-décolletage, micro-moulage par injection, nano-électroérosion, machines de micro-fabrication multifonctions, micro-formages des tôles : micro-poinçonnage, micro-plier et micro-emboutissage.
- Utilisation croissante du laser comme outil de micro-fabrication (découpe, soudure, usinage, marquage, texturation).

Au niveau numérique

- Adaptation de logiciel de FAO et développement de solutions de CNC adaptés aux dimensions.

► MATURITÉ DE L'OFFRE**Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation**

- Outillage spécifique et main d'œuvre qualifiée pour la manipulation.
- Familiariser les opérateurs au fait de spécialiser les machines sur un faible nombre d'opérations plutôt que de disposer de machines encombrantes capables de tout faire.
- Maîtriser les phénomènes physiques à l'échelle micro ou nanométrique.
- Bonne connaissance des nombreuses techniques de micro-fabrication.

Les questions à se poser

- Rôle de la fabrication additive dans la fabrication de micro-composants.
- L'aspect un peu gadget des machines de desktop factory peut rebuter certains utilisateurs.
- Même si les technologies de l'ordre du micro sont connues, les risques industriels et sanitaires que pourraient engendrer les nanotechnologies sont encore mal évalués.
- Adaptation au changement d'échelle (en particulier, problématique de préhension des pièces ou impact sur la qualité de la pièce).

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

PROCÉDÉS NEAR NET SHAPE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Procédés permettant d'obtenir des pièces métalliques ou plastiques de plus en plus complexes et très proches de la forme définitive, ce qui réduit fortement les opérations de finition, généralement par usinage. L'utilisation de ces procédés engendre à la fois une réduction des temps et coûts de production, des pertes matières et ouvre de nouvelles opportunités en termes de forme de pièces.

Les composants *Near Net Shape* (NNS) sont des pièces produites sous leur forme quasi finale qui ne nécessite plus qu'une étape de finition pour répondre aux spécifications requises, comme des dimensions précises ou une certaine rugosité.

Principales applications de ces technologies : si les acteurs directement concernés sont principalement situés dans le secteur de la transformation métallique, les technologies et procédés de fabrication near net shape sont transverses à de nombreux secteurs d'activités : automobile, aéronautique, énergie, *oil & gas*, biomédical-santé, biens d'équipement, luxe.

Principaux segments technologiques concernés : compression isostatique à chaud (HIP), frittage flash (SPS), frittage micro-ondes, moulage par injection de poudre (PIM), procédé de forgeage et de moulage intégré (ICFP), thixoformage, thixomoulage, thixoforgeage.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réalisation en net shape, de pièces complexes à hautes performances et constituées de matériaux difficiles à usiner (exemple : moulage de poudres par injection – PIM).
- Réduction des coûts liés au stock ou au gaspillage de matière première.

- Accélération des cycles de développement et de prototypage, mise en œuvre en une seule opération (ex : thixoformage) au lieu de plusieurs avec les procédés conventionnels.

Sur le plan technologique

- Mise en forme possible de matériaux, alliages difficiles à usiner, à forger...
- Élimination des porosités des composants métalliques (fonderies, MIM, fabrication additive par laser ou faisceau d'électron) et des opérations de finitions.
- Fabrication de pièces de géométrie complexe issues de la métallurgie des poudres (SLS, HIP).
- Amélioration des propriétés mécaniques (fatigue, allongement, dureté).
- Réduction des traitements thermiques (frittage flash, frittage micro-onde).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les avancées dans le domaine de la fabrication additive (frittage sélectif, fusion) et notamment en termes de qualité de surface permettent d'envisager dans certaines applications de niches une relocalisation de la production à proximité des lieux de consommation (centre de réparation, fabrication de pièces détachées sur demande).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Dans le contexte actuel mondial, la tendance s'oriente vers des procédés technologiques à faible consommation d'énergie.
- Les procédés poudres permettent d'importantes économies de matières premières par rapport à l'usinage (qui génère d'importants déchets).
- Les techniques de formage à l'état semi-solide produisent des pièces très proches de leur forme finale et nécessitent moins d'énergie que le forgeage à chaud traditionnel.

PROCÉDÉS NEAR NET SHAPE

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Ces procédés nécessitent une connaissance approfondie des matériaux et souvent une expertise post traitement.
- Ils nécessitent une phase de mise au point pour que la stabilité et la qualité soient maîtrisées.

Au niveau numérique

- Simulation itérative du procédé de fabrication jusqu'à l'obtention du procédé optimal validé expérimentalement.
- Modélisation des procédés peu développée et méconnue des utilisateurs.
- De nouveaux algorithmes pourront être utilisés aussi bien pour le processus de finition que pour la réalisation de modèles 3D.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- La flexibilité des procédés de fabrication nécessite une évolution des métiers et compétences pour prendre en compte l'hybridation des technologies : informatique, automatisme, métier lié au procédé mis en œuvre, techniques de contrôle, etc.

Les questions à se poser

- Quel ROI vis-à-vis du coût des machines de fabrication near net shape comme le debinding et le sintering ?
- Le niveau de maturité technologique est variable selon les procédés (moyenne de 7), mais thixomoulage du magnésium, HIP et MIM ont un TRL de 9.
- Quel est le meilleur compromis entre les caractéristiques mécaniques et la tenue à la corrosion élevée ?

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

PROCÉDÉS PROPRES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Dans l'industrie de production et plus particulièrement dans l'industrie chimique, il existe un besoin urgent de procédés plus acceptables du point de vue de la préservation de l'environnement. Cette tendance vers ce qui est maintenant connu sous le nom de « procédés propres » nécessite une évolution des concepts traditionnels d'efficacité des procédés vers une évaluation intégrant la valeur économique de l'élimination des déchets à la source.

L'appellation « technologie propre » couvre toute méthode de fabrication ou procédé utilisant le plus rationnellement possible les matières premières et/ou l'énergie, tout en réduisant la quantité des effluents polluants, des déchets, ou rebuts produits lors de la fabrication ou pendant l'utilisation du produit.

Les technologies propres et sobres permettent de concilier production industrielle et protection de l'environnement, de manière d'autant plus efficace que leur adoption s'accompagne aussi d'avantages économiques et stratégiques pour l'entreprise. Ces technologies prennent en compte les limitations ou interdictions d'usages de matériaux et de substances référencées dans les réglementations (REACH par exemple) ou en phase d'interdiction.

Trois objectifs, distincts mais complémentaires, motivent l'introduction de procédés propres :

- la diminution de consommation de matière première ;
- la diminution de la consommation d'énergie ;
- la minimisation de la production de déchets et d'effluents.

Il s'agit donc d'allier les intérêts écologiques et économiques en épargnant sur l'alimentation en matières premières et sur la consommation d'énergie et en améliorant le rendement et la qualité du produit fini.

Ainsi, avec pas ou peu de production de déchets, les bénéfices s'identifient sous forme de gain de production mais aussi par des économies sur le paiement des redevances pollution.

Les technologies propres se définissent par un ensemble d'étapes, appliquées selon la nature des problèmes identifiés et la complexité des interventions requises, pour intégrer des opérations au sein d'un processus industriel.

Trois méthodes complémentaires coexistent :

- l'optimisation du procédé en place ;
- la substitution de technologies par d'autres moins polluantes ;
- et/ou la modification du procédé.

Définies dans une directive IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*), les meilleures techniques disponibles (MTD) visent à minimiser l'ensemble des effets néfastes de la plupart des activités industrielles au sein de l'Union européenne (émissions de polluants potentiels dans l'air, l'eau et le sol ; bruit, odeurs, accidents...). Ainsi, les opérateurs des installations industrielles se voient obligés de prévenir la pollution de l'environnement en s'inspirant des MTD. Les indicateurs ne se limitent pas aux seules émissions, mais incluent la minimisation et le recyclage des déchets, l'efficacité énergétique et la prévention des accidents affectant l'environnement (réduction des effets des accidents et réhabilitation des sites).

En conclusion, les MTD peuvent être résumées par :

- meilleures : techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement ;
- techniques : les techniques employées, la manière dont l'installation est conçue, construite, exploitée et mise à l'arrêt ;
- disponibles : dans des conditions viables économiquement et techniquement. Toutes les MTD ne sont pas systématiquement applicables à chaque installation.

L'UE a développé une certification pour les entreprises innovantes et particulièrement impliquées dans des démarches de production propre. L'ETV (*Environmental Technology Verification*) permet de proposer (par l'entreprise en collaboration avec un/des experts indépendants) et de

FICHE 51

PROCÉDÉS PROPRES

justifier, pour son processus de production, une démarche de vérification. Elle donne également une assurance sur la qualité environnementale des procédés mis en œuvre et sur la capacité de l'entreprise à assurer son auto-évaluation et son amélioration.

Par exemple, les biotechnologies blanches pourraient être une bonne alternative à certains procédés chimiques classiques dans un souci économique et environnemental. Elles consistent à employer des systèmes biologiques tels que les micro-organismes ou les enzymes pour la mise au point de procédés de fermentation ou catalytiques pour produire des intermédiaires chimiques et de la bioénergie à partir de la biomasse. Grâce aux progrès sans précédent de la biologie depuis la fin du XX^e siècle, notamment dans la connaissance du vivant, le génie génétique est maintenant plus que jamais armé pour faire ce que la nature ferait en plusieurs milliers d'années.

Si la biomasse comporte de nombreux avantages, il faut aussi pouvoir l'exploiter sans pour autant sacrifier le secteur alimentaire. L'avenir est plutôt à la deuxième génération des biocarburants qui utiliserait toute la plante (paille, tiges, tronç) pour en extraire la lignocellulose, molécule contenue dans toutes les cellules végétales (notamment le bois d'arbres à croissance rapide et la paille) ; il serait alors possible d'exploiter la biomasse non alimentaire, voire ses déchets, dont la combustion fournirait par ailleurs de l'énergie pour l'extraction, avec peu d'émissions de gaz à effet de serre.

Au vu de la dynamique mondiale actuelle, il nous est permis de croire que la chimie du végétal est promise à une place notable dans l'industrie et parmi nos biens de consommation courants. Ces démarches s'appliquent néanmoins à tous les procédés de production, tous secteurs confondus, aux étapes de production primaire ou secondaire, mais aussi aux étapes de fin de vie des produits et biens.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

La compétitivité de l'entreprise : la recherche de moindre consommation et d'économie est associée à une performance accrue, voire à des innovations. L'entreprise sera également plus attractive pour ses collaborateurs et ses clients.

La pérennité de l'activité : au-delà de la conformité réglementaire, des solutions pérennes et adaptées éloignent le risque d'obsolescence et d'interdiction ou de rejet par les parties prenantes. La moindre dépendance aux ressources (énergie, eau, matières premières) est aussi un bénéfice.

- Intégration des notions de propreté et de sobriété lors du développement des produits conduisant à une meilleure fiabilité et à une diminution des coûts de fonctionnement.
- Au niveau des procédés : mise en place de techniques et/ou de bonnes pratiques visant l'élimination des déchets ou leur traitement à la source, la diminution des consommations, le recyclage de l'eau, diminuant ainsi les coûts par une meilleure maîtrise de l'outil de production (utilisation des Meilleures Techniques Disponibles décrites dans les documents BREF liés à la Directive IED sur les émissions industrielles).

Sur le plan technologique

- Développement de systèmes (capteurs et traitement de l'information) analysant, en temps réel, les consommations et rejets d'un produit, d'un équipement ou d'un procédé avec gestion des alertes et valorisation des gains.
- Généralisation de l'informatique verte (réduction des consommations d'eau et d'énergie, recyclage de l'eau, algorithmes de calcul optimisés, etc.).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Une entreprise améliorant de façon continue la propreté de son outil de production, dans une vision durable et en mettant en place un management de projet efficace (Kaisen,

PROCÉDÉS PROPRES

5S, etc.) verra son occupation des sols diminuer de façon importante. Cette surface gagnée pourra servir à accroître son activité ou à en lancer de nouvelles.

Sur le plan environnemental, sociétal

Une usine propre redevient compatible avec la ville moderne, ce qui rapproche le lieu de travail des habitations et contribue donc à diminuer la facture carbone liés aux déplacements. Une usine propre conduit également à un environnement de travail compatible avec des conditions de sécurité et de toxicité de meilleure qualité pour les employés.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

L'intégration de technologies propres dans une entreprise peut être réalisée selon 3 niveaux distincts dans le but de limiter à la source la production de déchets, rejets... :

- la mise en place de bonnes pratiques mettant en place des actions organisationnelles (ex : suivi et maintenance des fluides de coupe pour augmenter leur durée de vie et par conséquent réduire le volume consommé et la facture déchet);
- l'intégration de moyens complémentaires de traitements (ex : mise en place d'un évapo-concentrateur pour réduire le volume d'effluents aqueux traités et recycler l'eau récupérée);
- le remplacement de technologies (ex : remplacement de l'opération de rectification, génératrice de boues d'usinage

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Contributeurs : Arts et Métiers (Nicolas Perry, I2M)

et d'effluents, par le tournage dur ou des procédés de mise en forme par métallurgie des poudres);

- l'intégration de capteurs (couplés avec des simulations plus fines des procédés), tout au long des process pour mieux maîtriser et piloter les systèmes de production.

Les questions à se poser

- Où se situent les pertes par gaspillage ? Comment différencier la marge de confort de la marge de sécurité dans les consignes ? Comment améliorer la saturation des équipements ? Quelles bonnes pratiques adopter pour l'ordonnement ? Comment dimensionner les utilités thermiques et aérauliques ?
- En quoi les technologies propres peuvent-elles contribuer à améliorer ma compétitivité ? Mes clients sont-ils sensibles à l'image de l'entreprise ou exigent-ils des performances environnementales ? Est-ce que la performance environnementale de mes procédés est une condition d'acceptabilité par la collectivité locale ou de pérennité de mon activité ? Est-ce que la réduction de l'impact environnemental de mes produits peut contribuer à ma stratégie de développement ?
- Quelles sont les grandeurs et échelles de mesure pertinentes pour alimenter des tableaux de bords ou des modèles de pilotage techniques, économiques et environnementaux ? Peut-on anticiper et planifier des process dont les objectifs sont de réduire les émissions et de minimiser les consommations ?

SURVEILLANCE À DISTANCE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La surveillance à distance dans l'industrie tire parti des avancées effectuées dans les domaines des télécommunications, des capteurs, de l'Internet des objets ou encore dans le traitement des signaux acoustiques, vibratoires, thermiques, ou électriques. Cette notion englobe un ensemble de technologies qui permettent de surveiller à distance un outil de production, soit par une liaison Internet téléphonique, soit par les moyens mobiles comme les smartphones ou les tablettes. Elles permettent, par exemple, à un agent de maintenance d'être assisté à distance, pour un dépannage, par un spécialiste qui dispose des informations voulues en temps réel.

Cette surveillance offre la possibilité de détecter en continu et en temps réel des endommagements ou des dérives des systèmes de production et autorise ainsi la mise en place d'une maintenance prévisionnelle. Les capteurs communicants commencent, par exemple, à être intégrés d'origine dans des composants (roulements). Cela représente la première étape pour intégrer une fonction surveillance et évoluer vers la maintenance conditionnée à l'état de la machine.

Principales applications de ces technologies :

Automobile, aéronautique, ferroviaire, énergie, mines et carrières, oil and gas, biomédical santé, agro-alimentaire, machinisme agricole, matériel de travaux publics, machines spéciales, machine-outil, industrie papetière, chimie-pharmacie-cosmétologie, bâtiment pour des relevés de paramètres, du suivi de flottes, de l'analyse prédictive ou encore du contrôle non destructif.

Principaux segments technologiques concernés :

Automatisation de la surveillance et des interventions, consulter à distance, disposer d'expert distants, intelligence artificielle, systèmes apprenants, modélisation de l'équipement, traitement du signal, choix des variables indicatrices, moyens centralisés d'expertise, de données et d'accès aux machines distantes, mutualisation de moyens.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Afin d'être compétitifs et de se différencier de la concurrence, les constructeurs européens cherchent à améliorer leurs services après-vente et à développer des services complémentaires pour leurs clients.
- Amélioration de la productivité et de la disponibilité des moyens.
- Minimisation des temps et coûts de réparation grâce à l'anticipation des pannes.
- Augmentation de la durée de vie des équipements.
- Optimisation des déplacements d'experts *in situ*.

Sur le plan technologique

- Détection précoce des pannes, anticipation et échelonnage des actions de maintenance.
- Connaissance, potentiellement en temps réel, des sollicitations sur les matériaux.
- Les moyens de communication, le big data et les pools d'experts favorisent le diagnostic et l'assistance à distance rapides.
- Aide à l'anticipation des risques accidentels.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Minimisation de la maintenance, réactivité d'intervention sur machine, transparence, traçabilité des événements.
- Possibilité de consulter les équipements à distance et de les analyser par des experts distants et non sur site.
- Anticipation des besoins en pièces détachées pour réduire les ruptures d'approvisionnement et optimiser la chaîne logistique.

SURVEILLANCE À DISTANCE

Sur le plan environnemental et sociétal

- Connaître en permanence les sollicitations, prévenir les ruptures catastrophiques (avions, navires, *oil and gas*) afin de renforcer la sécurité des utilisateurs et du personnel.
- Meilleur suivi de l'efficacité énergétique des machines et outil d'aide à la décision pour la réduire.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- S'assurer de la pertinence du choix des variables transmises par les capteurs en amont de leur mise en service.
- Les progrès en modélisation des équipements et process, pronostic, intelligence artificielle, smart data, big data, fusion de données, *health monitoring*, calcul de durée de vie résiduelle, systèmes apprenants, touchent d'abord les équipements à haute valeur.

Au niveau numérique

- Garantir la confidentialité des données échangées.
- La vaste diffusion du numérique permet de tirer bénéfice de l'Internet des objets et du cloud. Les protocoles d'échanges et les normes métiers sont remis à jour selon ces évolutions.
- Les sociétés d'intervention disposent de moyens améliorés : appareils plus portables, downsizing, applis sur mobiles et drones.
- Croiser des données provenant de plusieurs sources.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Développer des outils de diagnostic de pannes, de décision (arrêt, mode dégradé, réparation...), de management des équipements.
- Développer des moyens centralisés d'expertise, de gestion des données, d'accès à des machines distantes, de mutualisation de moyens, d'aide à la décision.

Les questions à se poser

- Quelle est l'influence de l'aspect contractuel (assurances, responsabilités, engagements sur les résultats) sur la surveillance à distance ? Quels risques en termes de cybersécurité ?
- Calcul du retour sur investissement de la mise en place de la surveillance à distance ?
- La surveillance « hétéroclite », mixant machines modernes et anciennes et le retrofit (intégration de solutions connectées à d'anciennes machines) reste nécessaire.
- Transformation des modèles économiques et développement de nouvelles offres : par exemple, certains constructeurs d'équipements proposent des contrats de maintenance incluant la surveillance du parc et des services spécialisés, comme SKF avec l'offre *Rotation For Life* (fourniture de roulements, gestion de lubrification, diagnostic à distance et analyse des causes de défaillance), définie pour répondre à des objectifs de performance convenus avec le client.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

SYSTÈMES NUMÉRIQUES DE CONTRÔLE-COMMANDE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'automatique, discipline dédiée à la commande et à la régulation des systèmes d'asservissement, a pleinement bénéficié de l'essor de l'informatique industrielle. Grâce à cela, les machines industrielles dépendent de moins en moins de l'homme, ce qui permet d'augmenter le rendement et la répétabilité. Même si certains process imposent au fonctionnement de ces systèmes une contrainte de taille : le facteur temps.

Les systèmes d'automatisation industrielle conçus pour permettre la mise en œuvre des concepts d'Internet des objets industriel et d'industrie 4.0 doivent couvrir différents niveaux de contrôle-commande qui, chacun, nécessitent de relever leurs propres défis de conception et requièrent des solutions matérielles et logicielles optimisées.

Un système de contrôle distribué ou DCS (*distributed control system*) ou encore système numérique de contrôle-commande (SNCC) est un système de contrôle industriel destiné aux usines ou process industriels dont les éléments de commande sont distribués ou géo-répartis. À la différence des systèmes de contrôle centralisés qui comportent un seul contrôleur central qui gère toutes les fonctions de contrôle-commande du système, les systèmes de contrôle distribués ou DCS sont constitués de plusieurs contrôleurs qui commandent les sous-systèmes ou unités de l'installation globale.

Les systèmes de contrôle distribués sont principalement utilisés dans les industries de procédés intégrant la gestion par batch ou recette. Par exemple, on peut retrouver les DCS dans les industries de raffinage, dans l'industrie pétrolière, dans les stations de production d'énergie, dans les cimenteries, dans l'industrie pharmaceutique, etc.

Des concepts clés tels que la maintenance intelligente, fondée sur l'analyse prédictive et les actionneurs intelligents décentralisés, apportent d'ores et déjà de nombreux avantages, notamment une plus grande flexibilité, une efficacité accrue et des temps d'arrêt réduits pour les

interventions de maintenance. Toutefois, leur mise en œuvre accentue les défis de conception pour les équipements d'automatisme sur les sites de production.

Les systèmes d'automatisation industrielle conçus pour permettre la mise en œuvre du concept de l'industrie 4.0 comportent principalement trois niveaux d'équipement qui gèrent les communications et les opérations de contrôle-commande en temps réel :

- le niveau terrain avec les modules d'E/S, les actionneurs qui assurent l'exploitation physique des équipements industriels sur le site et les actionneurs intelligents qui, de plus, reçoivent de l'information de leur environnement, communiquent entre eux et contribuent ainsi à décentraliser les fonctions de contrôle-commande ;
- le niveau de contrôle-commande avec les API (automates programmables industriels) et les CN (machines-outils à commande numérique) qui collectent des informations du niveau terrain pour pouvoir commander les fonctions du processus qui restent centralisées (exemple : les modes de marche arrêt, le contrôle des fonctions de sécurité) ;
- le niveau opérateur avec les interfaces homme-machine (pupitres opérateur) qui communiquent des informations aux opérateurs pour permettre le contrôle/commande.

Chacun de ces niveaux nécessite de revoir les règles classiques de conception en silos afin d'optimiser les solutions matérielles et logicielles qui gèrent communications et fonctions de contrôle-commande. Il est important de comprendre l'intérêt de décentraliser les fonctions de contrôle-commande au niveau des actionneurs intelligents. Ces derniers s'autocontrôlent, mais traitent aussi de l'information en provenance de leur environnement pour agir sur celui-ci afin d'optimiser l'efficacité de la production. Ils contribuent ainsi à rendre les réseaux de communication (informations, ordres) moins tentaculaires, à diminuer les temps d'exploitation des données en réduisant leurs longueurs de transit et à rendre les systèmes d'automatisation industrielle moins gourmands en énergie.

SYSTÈMES NUMÉRIQUES DE CONTRÔLE-COMMANDE

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Améliorer la compétitivité et les performances.
- Apporter des solutions d'aide au diagnostic en temps réel.

Sur le plan technologique

- Actionneurs capables d'estimer en temps réel leur durée de vie restante (RUL).
- Actionneurs qui contrôlent-commandent d'autres actionneurs.
- Actionneurs qui traitent des données externes. Connectivité avec le cloud nécessaire à la transmission de données exploitées par l'analyse prédictive.
- Systèmes d'exploitation temps réel (RTOS) et périphériques pour communications industrielles, caractérisés par leur aptitude à répondre aux contraintes temporelles.
- Prise en charge des protocoles de bus de terrain industriels en assurant de faibles latences et des temps de cycle réduits.
- Prise en charge multiprotocole afin d'assurer la compatibilité entre les différents standards.

- Disposer d'un grand nombre d'interfaces périphériques, notamment Ethernet, et d'une solution de communication programmable et flexible pour donner aux développeurs la capacité de créer des solutions d'automatisme plus efficaces, avec la possibilité de s'adapter à des standards en plein évolution et de mettre à niveau les designs avec de nouveaux protocoles de communication au fur et à mesure qu'ils apparaissent sur le marché.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Optimiser les fonctions de contrôle-commande en les décentralisant le plus possible au niveau des actionneurs intelligents.
- Automatisation basée sur la topologie et la sécurité.
- Intégration complète entre les équipements pour garantir une utilisation optimale des informations.

Les questions à se poser

- Repenser la conception, l'exploitation et la maintenance des installations et y compris sur le plan ergonomique.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

TECHNOLOGIES DE RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La France s'est fixée comme objectif de réduire de 30 % sa consommation d'énergies fossiles en 2030 et de réduire de 50 % sa consommation d'énergie finale en 2050. En parallèle, la loi de transition énergétique prévoit qu'en 2030 les énergies renouvelables représenteront 40 % de la production d'électricité et 38 % de la consommation finale de chaleur. La directive européenne 2012/27/UE fixe également un cadre législatif relatif à l'efficacité énergétique. L'industrie mécanique et l'usine du futur sont évidemment impactées par ces objectifs. De nombreuses start-up et PME se positionnent ainsi sur l'efficacité énergétique (souvent qualifiée d'efficacité énergétique), qui désigne l'état d'un système dont la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu égal.

L'efficacité énergétique peut être passive (isolation...) ou active (système de mesure et de management de l'énergie, etc.). Dans la vision de l'Industrie du Futur, les procédés gèreront intelligemment plusieurs sources d'énergie (solaire, éolien, chaleur récupérée, etc.) et pourront dans certains cas en produire. La réduction de la consommation énergétique des sites de production passe entre autres par une optimisation énergétique des locaux industriels et des systèmes de conditionnement d'ambiance, la réduction de la consommation des process de production (pilotage du processus, gestion optimale des flux, etc.), l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements de production (machines-outils, fours, bains de traitement, etc.) et la récupération de l'énergie fatale.

Les technologies et pratiques suivantes contribuent entre autres à l'efficacité énergétique de l'Industrie du Futur.

- Au niveau de l'éclairage :
 - > détecteurs de présence sur les dispositifs d'éclairage ;
 - > tubes fluorescents haut rendement T8, maîtrise de l'éclairage (mesure luxmètre, plan de remplacement, localisation des points d'éclairage...).
- Au niveau des fluides :
 - > détection et annulation des fuites de fluides (eau, air...) ;
 - > économiseurs sur les effluents gazeux de chaudière de production de vapeur ;
 - > maîtrise de l'eau chaude (absence de chauffage en heures creuses par exemple).
- Au niveau du bâtiment :
 - > maîtrise du chauffage des locaux (surface optimisée, hauteur sous plafond, source d'énergie, régulation, pertes de charge dans les canalisations, etc.) ;
 - > isolation thermique, calorifugation.
- Au niveau des machines :
 - > optimiser les systèmes selon l'application plutôt que les composants considérés isolément ;
 - > récupération de chaleur sur les compresseurs d'air comprimé ;
 - > faire un suivi en temps réel des consommations énergétiques.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Les économies d'énergie se traduisent directement en gains économiques.
- L'affichage d'un impact CO₂ réduit des produits fabriqués peut constituer un argument marketing.
- Selon une étude de la Commission européenne, le retour sur investissement des mesures mises en place en efficacité énergétique dans l'industrie est de l'ordre de 2 ans.

Sur le plan technologique

- Les technologies liées à la récupération d'énergie sont pour la plupart connues, même si leurs applications restent peu développées.

TECHNOLOGIES DE RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Le développement de nouvelles technologies de fabrication (fabrication additive, robotisation...) implique des modifications du paradigme énergétique de l'entreprise.

Sur le plan environnemental, sociétal

- L'optimisation énergétique peut s'effectuer à grande échelle, par exemple, au niveau d'une zone d'entreprises afin de gérer au mieux la récupération d'énergie, dans l'industrie chimique notamment.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Développer la mixité des énergies (renouvelables et traditionnelles) et leur stockage dans les applications du secteur industriel.
- Optimiser le pilotage et la régulation des procédés d'un point de vue énergétique.
- Valoriser les énergies fatales industrielles.
- Développer les technologies de récupération de la chaleur.
- Optimiser les comportements des systèmes par le développement de la mécatronique.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Au niveau numérique

- L'augmentation des volumes de données échangés possède une influence directe sur la consommation énergétique des serveurs. Les technologies de récupération de chaleur sont en particulier applicables aux salles informatiques et serveurs. Le recours au cloud computing permet également d'externaliser en partie la consommation d'énergie liée au numérique.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Rendre visibles les performances énergétiques de l'organisation aux décideurs appropriés. Dans les grandes entreprises, la distance hiérarchique entre les personnes en charge des problématiques énergétiques et les décideurs peuvent rendre les processus longs et difficiles.
- Évaluer le juste besoin en énergie avant d'investir dans de nouveaux équipements.

Les questions à se poser

- Comment tenir compte des fluctuations des coûts de l'énergie lors d'un investissement portant sur la maîtrise de la consommation énergétique ?

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

TECHNOLOGIES DE SOUDAGE À HAUTES PERFORMANCES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les technologies de soudage à hautes performances désignent, soit des solutions de rupture (encore peu utilisées industriellement mais appelées à un développement important tel que le soudage par friction-malaxage ou par impulsion magnétique), soit des technologies de continuité bénéficiant d'évolutions importantes, grâce notamment aux développements dans le domaine de l'électronique de puissance (soudage MIG-MAG, soudage hybride laser-MAG par exemple).

Principales applications de ces technologies :

Le soudage est aujourd'hui une technique d'assemblage innovante et utilisée dans tous les domaines : automobile, aéronautique, ferroviaire, énergie ou nucléaire.

- Procédé de soudage par friction malaxage : utilisé pour la construction d'éléments de fuselage d'avions (application de plus en plus répandue), de lanceurs (fusées), de ponts de navires, de certaines pièces automobiles. La très grande majorité de ces applications industrielles concernent des pièces en alliages d'aluminium, mais quelques applications existent également avec du cuivre.
- Par ailleurs, le soudage à froid par impulsion magnétique intéresse particulièrement l'automobile, du fait de ses nombreuses pièces tubulaires et de la capacité à réaliser des assemblages multi-matériaux
- Procédé de soudage hybride laser-MAG : utilisé en construction navale (soudage de panneaux en acier), dans l'automobile, en construction mécano-soudée, dans le ferroviaire. Les machines de soudage se perfectionnent et leur utilisation se simplifie (hybride laser-arc).

Principaux segments technologiques concernés :

Soudage par friction et malaxage (FSW), soudage laser, soudage hybride laser-MAG, soudage par impulsion magnétique, techniques de brasage et de soudage-diffusion, techniques de soudage conventionnelles par fusion (sans protection gazeuse, sous atmosphère, sous vide).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- De manière transverse, les technologies de soudage à hautes performances telles que décrites dans cette fiche ont pour objectif d'offrir des gains de temps de cycles importants et d'augmenter la reproductibilité des opérations d'assemblage par l'automatisation du procédé.
- Soudage par friction malaxage : pas d'apport de matière, pas de préparation de joint, faible consommation électrique.
- Gain de masse en éliminant les rivets ou encore en limitant l'épaisseur d'assemblage.

Sur le plan technologique

- Forte tenue mécanique de la soudure.
- Les procédés de soudage à l'état solide permettent d'assembler des matériaux métalliques dont les points de fusion peuvent être très différents (soudage d'aluminium et d'acier inoxydable).
- Soudage par friction malaxage : soudage de plusieurs nuances d'aluminium entre elles (pas de fissuration à chaud ou de porosité), assemblages hétérogènes.
- Soudage par impulsion magnétique : réalisation d'assemblages homogènes et hétérogènes à l'état solide et à grande vitesse.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Soudage par impulsion magnétique : cette technologie ne produit ni chaleur, ni rayonnement lumineux, gaz ou fumées et consomme peu d'énergie.
- Soudage par friction-malaxage : pas de dégagement de fumée et pas de consommables (économies de matière première).

TECHNOLOGIES DE SOUDAGE À HAUTES PERFORMANCES

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Soudage hybride : coût d'investissement principalement dû à la technologie laser > 250 k€, beaucoup plus de paramètres opératoires à régler.
- Développement du soudage FSW robotisé pour limiter le coût de l'investissement machine et disposer d'un outil avec une vraie capacité 3D.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Méconnaissance de ces procédés et de leurs capacités à apporter des solutions nouvelles et performantes.
- Complexité de réglage des paramètres opératoires.
- Nécessité de former les personnels de BE à ces nouvelles technologies, afin de (re)concevoir les pièces de manière optimale pour le procédé choisi.

Les questions à se poser

- Qualification des modes opératoires (normes internationales en cours d'élaboration, très avancées pour FSW et hybride laser-MAG).
- Il faut tenir compte des contraintes d'hygiène-sécurité : champs magnétiques très intenses inhérents au soudage par impulsion magnétique et le rayonnement lumineux dangereux utilisé en soudage laser et hybride laser-MAG.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 3

APPLICATIONS INDUSTRIELLES NOMADES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'Industrie du Futur devient mobile avec la surveillance, le pilotage à distance des machines, du process et l'optimisation des performances en temps réel. La connectivité à distance avec les systèmes de fabrication automatisés devient une exigence fondamentale pour la compétitivité de l'ensemble de l'industrie manufacturière et du process. En effet, la capacité de surveiller, de commander et de diagnostiquer des systèmes rapidement est essentielle. La surveillance à distance flexibilise la localisation des équipements et des personnels, entraînant une réduction des coûts, une meilleure efficacité et une polyvalence accrue pour s'adapter aux changements internes et aux tendances extérieures.

L'avènement des applications mobiles et l'accès aux données *via* différents périphériques permettent également une mobilité nouvelle des ressources humaines. Le digital répond très bien aux enjeux de mobilité et évolue rapidement vers davantage de compatibilité, de continuité et d'unicité. En effet, des standards d'interopérabilité mondiaux émergent comme OPC UA permettant de connecter des équipements et des systèmes provenant de fabricants différents. Des nouveaux outils adressent progressivement les problématiques associés à la maîtrise du BYOD (*bring your own devices*). Ces derniers doivent rester simples et efficaces pour permettre aux nouvelles générations de travailleurs de les adopter.

Les applications industrielles nomades ouvrent ainsi à la porte à l'avènement de nombreux systèmes intelligents tels que des solutions de gestion de la performance, des systèmes de contrôle et de surveillance à distance, des solutions de commande pour les bâtiments, de gestion énergétique des infrastructures et d'optimisation de l'utilisation des flottes de véhicules...

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Des centres d'opération et d'optimisation à distance peuvent être créés. Ils sont capables de piloter et d'optimiser la production, d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité des sites industriels par :
 - > une maintenance prédictive des équipements ;
 - > une amélioration en termes de productivité et de performance opérationnelle.
- Les applications nomades accroissent la puissance de la révolution digitale en permettant une réduction des coûts, un allongement de la durée de vie des actifs et une plus grande efficacité des opérations.
- Les tablettes et les smartphones sont devenus abordables financièrement et certaines applications sont devenues gratuites en téléchargement.

Sur le plan technologique

- La convergence de multiples technologies d'automatisation et de communication de données permet :
 - > d'extraire, d'analyser et de gérer à distance des données provenant de capteurs et de composants similaires (explosion de l'Internet des objets) ;
 - > une intégration des capteurs à une capacité de surveillance dans un système de contrôle de processus ;
 - > des fonctions d'apprentissage et/ou de paramétrage à distance ;
 - > la planification, la coordination et la mise en œuvre d'actions correctives et d'activités de maintenance préventive.
- *Via* les technologies immersives et de réalité virtuelle :
 - > décentraliser la formation et la maintenance ;
 - > améliorer la transmission ;
 - > développer et maintenir le goût de l'apprentissage.

FICHE 3

APPLICATIONS INDUSTRIELLES NOMADES

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les applications mobiles permettent de construire une organisation capable d'acquérir la vélocité, l'agilité et l'ouverture pour intégrer intelligemment les nouvelles opportunités technologiques.
- L'introduction et la diffusion des nouvelles technologies numériques dans les sites de production et le travail quotidien (scan 3D, réalité augmentée, tablettes tactiles...) sont facilitées.
- Les démarches d'innovation ouverte entre les équipes des sites de production et l'écosystème associé sont optimisées.

Sur le plan environnemental, sociétal

- L'impact sur l'environnement est réduit, ne serait-ce que par la limitation des déplacements physiques.
- Image moderne de l'entreprise qui attire une population jeune vers les nouveaux métiers de l'industrie.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Il est nécessaire d'assurer une plus grande compatibilité d'une part entre les différentes technologies mobiles et d'autre part entre celles-ci et les applications informatiques sédentaires.
- Il est obligatoire de disposer d'un environnement robuste et fiable exploitant le meilleur du cloud et de la virtualisation.

Au niveau numérique

- La réussite passe par une recherche de simplicité, de puissance, de connectivité, de sécurité, et de suivi des coûts :
 - > aborder l'expérience utilisateur sous l'angle de la simplicité ;
 - > doter l'entreprise d'un terrain propice à la création de nouveaux usages et de nouveaux business.
- Il faut être vigilant sur les coûts et la compréhension du bénéfice pour rendre pertinent l'investissement.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Maîtrise du big data et des data sciences : deux savoir-faire emblématiques de la transformation digitale.
- Naissance de nouveaux métiers : pilotes en temps réel, analystes qui étudient la production et l'optimisation des consommations.

Les questions à se poser

- Quel est le niveau de pilotage à distance nécessaire à l'optimisation de la performance et à la minoration du risque associé à une gestion distancée ?
- Quelle est la compatibilité des infrastructures existantes et la mise à niveau des équipements à réaliser ?
- Suis-je bien renseigné sur le gain de performance accessible et les impacts indirects associés à l'appropriation des dernières innovations technologiques dans le domaine du numérique ?
- Il ne faut pas oublier les questions liées à la cybersécurité lors de l'intégration des technologies et applications mobiles.

FICHE 3

APPLICATIONS INDUSTRIELLES NOMADES

► **MATURITÉ DE L'OFFRE**

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► **LIENS UTILES**

Rédacteur : Cabinet

Contributeurs : Cetim, Gimélec

FICHE 5

APPLICATIONS COLLABORATIVES ROBOTISÉES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Depuis plus de vingt ans, la robotique s'est largement répandue dans l'industrie. Développée à l'origine pour être autonome, dans un souci de travailler à la place de l'humain et d'effectuer des tâches difficiles ou rébarbatives, elle devient aujourd'hui collaborative. En témoigne l'arrivée d'un nouveau segment de marché : la robotique collaborative.

La particularité d'un « robot collaboratif » n'est pas de se substituer à l'humain, mais de travailler de concert avec lui. Pour mettre au point pareille machine, il est indispensable de penser dès la phase de conception à l'ergonomie de l'interaction entre le robot et son utilisateur.

Collaborateurs ou co-acteurs, les applications collaboratives robotisées permettent de robotiser des situations de production qui ne pouvaient pas l'être jusqu'à présent parce que le temps de cycle était trop faible.

On peut ainsi identifier plusieurs familles au sein des technologies robotisées, selon l'intensité de l'interaction entre le robot et l'être humain. Les applications collaboratives robotisées concernent les situations de coexistence et de collaboration.

Tout l'enjeu tourne autour de l'interface homme/machine et l'ergonomie du système robotisé. L'objectif est double : préserver la santé au travail tout en améliorant la performance, et adapter le système aux caractéristiques humaines et donc que l'on puisse utiliser le robot, que l'on soit petit, grand, expérimenté ou non.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Abaissement des coûts de production qui, à son tour, permet d'éviter les délocalisations, voire d'envisager des relocalisations.
- Facile à programmer et à intégrer à proximité des hommes, adaptable à de petites séries respectant des préférences clients de plus en plus variées, pour des investissements raisonnables.

Sur le plan technologique

- Définir précisément un cahier des charges pour l'intégrateur.
- Préférer la polyvalence des robots plutôt qu'un équipement trop spécialisé.
- Ne pas robotiser un processus qui n'est pas sous contrôle, c'est-à-dire maîtrisé.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Bâtir une véritable stratégie industrielle, et un plan de communication afférent, autour des cinq piliers non séparables : l'économie (rentabilité, chiffre d'affaires), la production (performance, qualité), l'intégration (processus, système d'information, évolution), le réglementaire (directives, normes) et l'humain (valorisation, conditions de travail).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduire l'exposition des opérateurs humains aux risques associés aux contraintes physiques, aux environnements agressifs et aux rythmes de travail pénibles.
- Partie intégrante de l'industrie du futur et de sa vision plaçant l'humain au cœur de l'usine.

FICHE 5

APPLICATIONS COLLABORATIVES ROBOTISÉES

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- Choisir les meilleures solutions au regard de nos futurs systèmes de production, des facteurs humains et de l'avancée de la technologie.
- Se faire accompagner et mettre en œuvre une méthodologie d'introduction de systèmes collaboratifs robotisés.
- Trouver le bon équilibre entre capacité du robot, ergonomie, sécurité et coût.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Mettre en place une méthodologie permettant de penser et concevoir ces robots collaboratifs et l'interface qui leur donnera la possibilité d'interagir avec leur utilisateur, dans le souci de pouvoir être manipulé par tous :
 - > l'opérateur est intégré dans cette méthodologie. Pas seulement au niveau de la formation, mais dès la phase de conception du système robotisé interactif afin de répartir au mieux les tâches entre l'homme et la machine.
- Proposer un plan de formation personnalisé afin que chaque opérateur sache travailler avec un robot dans des conditions de sécurité maximales.

Les questions à se poser

- Proposer un plan de formation personnalisé afin que chaque opérateur sache travailler avec un robot dans des conditions de sécurité maximales.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 10

COBOTS ET EXOSQUELETTES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les cobots sont nés de la volonté des industriels de réduire les troubles musculosquelettiques sur les lignes/chaines de production et d'améliorer les conditions de travail. La technologie peut être utilisée pour différents usages : parachèvement, contrôle, manipulation, etc. Les cobots ont pour but de concilier la flexibilité humaine et la performance robotique, en toute sécurité.

Les définitions suivantes permettent de bien situer les cobots :

- un **robot** est un moyen d'automatiser une activité. Il ne nécessite donc pas l'intervention d'un technicien de production. L'homme et le robot peuvent cohabiter mais sur deux tâches de travail différentes, le robot travaillant de façon isolée (enfermé dans une zone sécurisée) ;
- un **système robotisé collaboratif** met en œuvre un robot spécifiquement conçu pour travailler avec l'opérateur, ou à côté de lui, en toute sécurité. Il est doté de toutes les technologies permettant d'assurer la sécurité totale de l'homme sans être enfermé ;
- un **cobot** assiste l'opérateur comme un amplificateur d'effort avec retour d'informations. L'homme le manipule avec son bras. Il est totalement dénué d'autonomie ;
- un **exosquelette** est un robot porté par l'opérateur. Il peut assister les membres inférieurs, les membres supérieurs, ou les deux. Le plus souvent, il est utilisé pour diminuer les efforts fournis par les opérateurs lors de manutentions par exemple. Il peut également servir pour aider au maintien statique de l'opérateur.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La cobotique n'a pas comme vocation première l'augmentation des volumes produits mais peut apporter une certaine fiabilité dans l'exécution des processus de fabrication. L'implantation des cobots va permettre d'améliorer la performance industrielle en gagnant en flexibilité grâce à leur mobilité (il n'y a pas de cellules grillagées), mais aussi d'augmenter la productivité et la qualité en s'affranchissant des limites liées aux capacités humaines. Dans certains cas, un cobot pourra effectuer le travail de plusieurs opérateurs.
- Bénéfices économiques liés à la réduction des maladies du travail et des accidents du travail.

Sur le plan technologique

- Diminution des erreurs humaines et augmentation de la fiabilité.
- Augmentation des capacités humaines.
- Mise en place de protocoles sécurisés pour faciliter le travail homme/machine.
- Manipulation de pièces aux caractéristiques non compatibles avec la manipulation directe humaine (radiation, chaleur, etc.).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Respect des exigences réglementaires et des politiques engagées.
- Investissement dans la prévention des risques.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Amélioration des conditions de travail : la cobotique va permettre de faciliter les tâches difficiles et répétitives (exemple du ponçage) qui peuvent entraîner des TMS ou des accidents du travail. À titre indicatif, les accidents du travail représentent 1 milliard d'euros en termes de jours

FICHE 10

COBOTS ET EXOSQUELETTES

remboursés par la Sécurité sociale (principalement des TMS) et 2,5 à 3 fois plus en termes de perte de productivité pour les entreprises.

- Apparition de nouveaux emplois et diminution des emplois dit « difficiles ». Ces efforts ont pour conséquence de faire monter en compétence les employés sur des tâches à plus haute valeur ajoutée tout en revalorisant leur travail.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Intégration mécanique, électrique, électronique et logicielle.
- Précision des mouvements augmentée.
- Consommation énergétique faible.

Au niveau numérique

- Réalisation de software à haute valeur ajoutée permettant le travail homme/machine de manière sécurisée.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Formation à l'utilisation de cobots ou d'exosquelettes pour permettre à la fois de rassurer l'opérateur sur la facilité de manipulation mais aussi de lui apprendre à travailler avec lui de la meilleure façon possible.
- Il n'y a pas de compétences particulières à l'utilisation mais il faut maîtriser les différentes technologies du cobot au niveau maintenance.

Les questions à se poser

- Existe-t-il, dans mon entreprise, des postes de travail qui nécessitent des postures difficiles ou des efforts musculaires importants ?
- Certains postes de travail pourraient-ils être accessibles à des personnes de faible constitution, âgées ou handicapées ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 33

INNOVATION OUVERTE ET COLLABORATIVE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'innovation collaborative consiste, pour une entreprise souhaitant élargir son champ de développement, à s'associer avec d'autres organisations partenaires (entreprises, organismes de recherche, centres techniques, Instituts Carnot...) pour faire émerger, décider et/ou réaliser un ou plusieurs projets d'innovation de façon conjointe. L'innovation collaborative implique pour ces partenaires de trouver un accord concernant la propriété intellectuelle, le partage des risques, la mise en commun des ressources, et la répartition des bénéfices du ou des projets d'innovation objet du partenariat. Les projets d'innovation collaborative sont, le plus souvent, conduits par un consortium soutenu par un pôle de compétitivité, ou en réponse à un appel à projets collaboratifs d'un organisme public de soutien financier (PIAVE, FUI, Bpifrance, ADEME, H2020 de la Commission européenne...), mais peuvent aussi s'effectuer dans un cadre privé, entre entreprises ou encore entre une entreprise et un organisme de recherche (exemples les plus fréquemment rencontrés) qui contractualisent un accord pour formaliser leur collaboration.

On parle d'innovation ouverte (*open innovation*) quand une organisation :

- va chercher à l'extérieur des idées et des expertises pour accroître ses propres expertises ;
- propose ses propres expertises et brevets.

On peut distinguer :

- le *scouting* : le fait de rechercher une ou des solutions existantes à un problème ou, inversement, rechercher des nouvelles applications à une technologie, et ce, au-delà des frontières géographiques, culturelles, scientifiques ou techniques ;
- le *crowdsourcing* : solliciter une communauté plus ou moins large afin de récolter de nouvelles idées et solutions. Cette sollicitation se fait le plus souvent par le biais de challenge ouvert au grand public ou sur une base plus fermée.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Pour l'innovation collaborative :

- Pour des entreprises dont les offres sont complémentaires, l'intérêt est de s'associer pour renforcer la position et de gagner des parts sur un marché. Pour une PME, s'associer avec son client dans un projet d'innovation constitue une force commerciale indéniable, en lui apportant un avantage concurrentiel qui doit lui permettre d'être en position favorable pour vendre le produit ou service issu de cette collaboration sur le marché. Les échanges entre partenaires permettent à chacun d'avoir une vision et une compréhension du marché plus large.
- L'entreprise bénéficie d'une réduction du *time to market* ainsi qu'une réduction des risques en les mutualisant.

Pour l'innovation ouverte :

- L'innovation ouverte peut être une réponse adaptée à l'heure où les budgets dédiés à l'innovation se réduisent. Elle permet de multiplier les idées. Cependant un investissement est nécessaire pour gérer l'*open innovation* et pour l'exploitation d'une innovation propriété d'une autre entreprise (licences, royalties...).

Sur le plan technologique

Pour l'innovation collaborative :

- Pour les PME, le partenariat permet d'accéder à des compétences ou moyens technologiques qu'elles ne possèdent pas, en France et/ou au-delà des frontières. Cette ouverture peut être également profitable à une ETI ou une grande entreprise afin de lui permettre de se lancer dans une innovation à risques forts pour maintenir sa compétitivité.

FICHE 33

INNOVATION OUVERTE ET COLLABORATIVE

Sur le plan numérique

Pour l'innovation ouverte :

- L'utilisation de certaines plates-formes web dédiées permet de trouver un apporteur de solution, qui peut être un expert au bout du monde, totalement inconnu jusque-là. Cet expert peut être une start-up, un scientifique... ou un amateur, qui aura toutefois quelques notions scientifiques ou des outils appropriés.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Pour l'innovation collaborative :

- Le management d'un projet collaboratif demande des ressources et compétences que l'on trouve le plus souvent dans une grande entreprise, un organisme de recherche, un centre technique... Les PME s'appuient en général sur ces ressources externes. Du fait du partage de moyens, les projets collaboratifs présentent des avantages (réduction du coût d'un projet, des risques, ou accélération du processus d'innovation) qui peuvent se révéler des inconvénients lorsque le consortium se compose d'un trop grand nombre de partenaires (ce qui induit une lourdeur et une lenteur administrative).

Sur le plan environnemental, sociétal

Pour l'innovation collaborative :

- Travailler ensemble, entre organisations de cultures et de métiers différents, constitue un progrès et une richesse dans les relations humaines.
- Les projets collaboratifs permettent d'aborder les enjeux environnementaux. D'une part, ces enjeux constituent des challenges nouveaux, dont l'horizon est parfois lointain, ce qui se prête bien à un partage des risques. D'autre part, les appels à projets publics comportent généralement des critères de sélection qui favorisent la réponse aux enjeux environnementaux.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

Pour l'innovation collaborative :

- Pouvoir accéder à une technologie nouvelle et porteuse pour l'application visée.

Pour l'innovation ouverte :

- La nature du besoin technique mis en ligne et sa formulation sont primordiales. Elles doivent être choisies avec beaucoup d'attention. Ainsi, un besoin complexe peut être décomposé en plusieurs thématiques, qui seront mises en ligne pour les rendre plus anonymes et limiter la fuite d'idée.

Au niveau numérique

Pour l'innovation collaborative :

- L'innovation collaborative est favorisée par l'existence d'outils numériques ou de plateformes qui permettent à plusieurs acteurs de travailler ensemble et d'interagir de façon simultanée sur un même projet d'innovation.

Pour l'innovation ouverte :

- De nombreux outils sont disponibles pour faire de l'*open innovation* avec des finalités différentes :
 - > outils de créativité pour générer des idées en s'appuyant sur les collaborateurs de l'entreprise à tous niveaux ; ces outils servent ensuite à sélectionner, développer et valider par simulation ;
 - > les plateformes de modélisation et simulation ouvertes pour valider les concepts ;
 - > plateforme avec moteur sémantique pour prendre connaissance des projets R&D ou projets existants ;
 - > plateforme de mise à disposition d'experts ou d'entreprises.

FICHE 33

INNOVATION OUVERTE ET COLLABORATIVE

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

Pour l'innovation collaborative :

- S'associer à des partenaires qui maîtrisent les compétences nécessaires.

Pour l'innovation ouverte :

- De nombreux outils peuvent faciliter l'*open innovation* dans l'entreprise tels que les réseaux sociaux internes et des plateformes d'innovation collaborative.
- L'exploitation d'une plateforme d'*open innovation* n'est pas sans risques. Se posent notamment les problèmes de confidentialité et de propriété intellectuelle (tant vis-à-vis de la protection des savoir-faire de l'entreprise, que des droits attachés aux solutions proposées). Une vigilance doit être portée sur le choix des « experts » référencés sur les plateformes ouvertes.

Les questions à se poser

- L'entreprise a-t-elle identifié les ressources à mobiliser pour les futurs projets d'innovation qu'elle veut conduire ?
- Quels sont les projets d'innovation que l'entreprise a intérêt à conduire seule et ceux qu'elle a intérêt à conduire en partenariat ?
- L'entreprise, ses dirigeants et salariés, sont-ils suffisamment impliqués dans les réseaux et les écosystèmes d'innovation pour être capables de distinguer les opportunités de partenariat intéressantes ?
- Le consortium est-il équilibré et le nombre de partenaires pas trop conséquents pour aboutir à des résultats valorisables ?
- Bien définir le partage de la propriété intellectuelle et ses modalités d'exploitation avant de collaborer.

► **MATURITÉ DE L'OFFRE**

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 52

RÉALITÉ AUGMENTÉE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La réalité augmentée assiste les opérateurs dans leurs tâches en leur apportant d'une manière simple les informations dont ils ont besoin dans leur champ de vision (par exemple, la visualisation des KPIs des machines simplement en regardant la machine à travers des lunettes de réalité augmentée). Elle est considérée comme une interface entre des données «virtuelles» et le monde réel (source : Association de promotion de la réalité augmentée) en superposant au monde réel des données virtuelles en temps réel *via* des périphériques. Les systèmes de réalité augmentée sont conçus pour améliorer la perception du monde qui entoure l'utilisateur et faciliter son interaction avec celui-ci.

Principales applications de ces technologies : plus que de marchés d'application, il est important de parler ici des usages qui se développent de manière transverse dans l'ensemble des secteurs : partage d'informations à distance, utilisation pour la conception (produits, systèmes de production), pour la formation à distance, pour la maintenance, pour la sécurité et l'intervention à distance. De ce fait, on observe une pénétration des technologies et usages dans l'automobile, l'aéronautique, le ferroviaire, l'énergie, l'oil and gas, le médical, l'agroalimentaire, le BTP ou encore dans le secteur des biens de consommation (tourisme, luxe, logement, mobilier...).

Principaux segments technologiques concernés : assistance des opérateurs dans leur tâche, périphériques (casque d'immersion, préhenseur actif pour dispositifs haptiques, tablettes...).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Augmentation de l'efficacité des opérations de maintenance grâce à la téléassistance augmentée.
- Réduction des cycles de formation et des temps de prises de décision.
- Nouvelle expérience de commercialisation des produits en contexte.

Sur le plan technologique

- Miniaturisation des dispositifs d'affichage tête haute.
- Combinaison avec les technologies de traitement du langage naturel et le *data mining*.
- Sur le plan de la transformation de l'entreprise
- Accès à l'ensemble des données des systèmes d'Information sur les lieux d'exploitation.
- L'expert n'est plus obligé de se rendre sur place lors d'opérations de maintenance urgentes grâce à la téléassistance augmentée.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Téléassistance augmentée : réduction des frais de transports associés aux impacts écologiques.
- Publicité augmentée : des contenus plus immersifs et paperless (réduction de la consommation et de la pollution papier).
- Réduction des frais liés aux retours de marchandises inadéquats grâce à l'essayage virtuel en contexte.

FICHE 52

RÉALITÉ AUGMENTÉE

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- L'évolution rapide des offres de matériels et outils.
- L'interaction avec les données *via* un dispositif de réalité augmentée reste encore complexe en mode main libre (besoin d'interfaces intelligentes basées sur des reconnaissances de gestes et de paroles).
- Le positionnement spatial du dispositif dans son environnement naturel reste délicat (en fonction des conditions lumineuses ou autres).
- La modélisation des systèmes : besoin de tenir compte des niveaux de performances attendues et des pratiques des opérateurs.
- L'usage simple et direct des modèles CAO et automatisation de leur simplification pour le temps-réel.

Au niveau numérique

- Amélioration de la résolution et de la précision des modèles.
- Qualité des IHM et ergonomie pour faciliter l'adoption de ces technologies et faciliter la conduite du changement, problématiques techniques propres à la continuité numérique.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Formation des équipes support, service clients, maintenance.

- Parallèlement, la réalité augmentée permet de faire face à des pénuries de compétences sur certains métiers d'opérateurs ou techniciens grâce à la téléassistance ou les tutoriels augmentés.
- Préparation des données en amont des revues de projets (adaptation importante et parfois scénarisation des maquettes CAO).
- Maîtrise des kits de développement spécifique à la réalité augmentée.
- Nouvelles méthodes pédagogiques à mettre en place grâce à la portée de la réalité augmentée.

Les questions à se poser

- Des problématiques financières sur l'évaluation d'un ROI, cruciale dans le choix des applications pour l'intégration et l'utilisation effective de ces nouvelles technologies.
- Impact de technologies émergentes (machine learning, Informatique quantique)
- Réalisations sur des marchés porteurs, notamment les industries « à risque » (installations pétrolières et gazières, centrales nucléaires, mines...)
- Comment prendre en compte les aspects de protection des données et de confidentialité ?
- Acceptation par le grand public de porter de plus en plus souvent un dispositif tête haute.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	---------------	--------	----------	----------

FICHE 53

RÉALITÉ VIRTUELLE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le but de la réalité virtuelle est de faire percevoir à un utilisateur un monde artificiel (créé numériquement) ressemblant ou non à un monde réel et de donner à cet utilisateur la possibilité d'interagir intuitivement et naturellement avec ce monde [source : Centre de réalité Virtuelle de la méditerranée]. La réalité virtuelle consiste en un ensemble de technologies qui, d'une part, capture les mouvements de l'utilisateur lui permettant d'interagir au moyen de son avatar et, d'autre part, restitue à l'utilisateur les effets de l'interaction de son avatar avec l'environnement virtuel par l'intermédiaire d'interfaces sensorielles (image, son, retour d'effort ...). Ces technologies sont constituées d'interfaces mécatroniques et d'interfaces graphiques temps réel. Les outils et logiciels de réalité virtuelle en lien avec ceux de la CAO permettent la visualisation interactive à l'échelle et dans le contexte d'usage des produits en conception.

Dans les usines, elle permettra d'améliorer l'apprentissage des tâches en termes de temps et de qualité, la qualification de l'ergonomie de postes de travail.

Principales applications de ces technologies :

Plus que de marchés d'application, il est important de parler ici des usages qui se développent de manière transverse dans l'ensemble des secteurs : apprentissage de tâches complexes pour préparer une situation réelle (simulation d'opérations d'urgence ou de maintenance par exemple), qualification de l'ergonomie de postes de travail (impact sur les conditions de travail des opérateurs et la productivité), assistance à la conception et à la validation d'assemblage lors de revue de projets, outil d'aide à la vente. De ce fait, on observe une pénétration des technologies et usages dans l'automobile, l'aéronautique, le ferroviaire, l'énergie, l'oil and gas, le médical, l'agroalimentaire, le BTP ou encore dans le secteur des biens de consommation (tourisme, luxe...). Appliquée à l'industrie, il est possible d'envisager le jumeau numérique de l'usine réelle permettant l'accompagnement de la vie de l'usine par les objets connectés et utilisant la réalité virtuelle comme vecteur d'information à l'utilisateur.

Principaux segments technologiques concernés :

Réalité virtuelle immersive, interaction naturelle, immersion 3D, retour haptique, interfaces limitant le mal de l'immersion, outils de navigation (logiciels ou matériels), utilisation de salles immersives, préparation des données, scénarisation.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Outil d'aide à la vente : amélioration de l'image de l'entreprise et des produits en proposant une expérience immersive dans le futur produit (voyage, bâtiment, appartement, voiture par exemple).
- Validation virtuelle d'assemblage ou de techniques de pose : réduction des délais de développement et du risque d'erreur lors de la construction.

Sur le plan technologique

- Amélioration de la qualité d'immersion et réduction des effets de nausées.
- Évolution technologique rapide des dispositifs de réalité virtuelle portée par le marché du grand public.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Implication de l'ensemble des divisions de l'entreprise : marketing, maintenance, recherche et développement dans la conception d'un produit.
- Développement de la cocréation en impliquant au plus tôt le client, les distributeurs...
- Séances de travail et conférences immersives : réduction des déplacements et modification des habitudes de réunion à distance.

FICHE 53

RÉALITÉ VIRTUELLE

Sur le plan environnemental, sociétal

- Prototypage virtuel : la réalité virtuelle réduit voire élimine la création de produits superflus (économie de matières premières).
- Réduction des frais de stockage et de transports associés aux impacts écologiques grâce à l'essayage virtuel.
- Publicité virtuelle : des contenus plus immersifs et *paperless* (réduction de la consommation et de la pollution papier).
- Analyse de l'environnement à distance grâce à une caméra 360°, une exploration sans perturber les lieux (travaux de recherche, tourisme).
- Nouveau moteur de sensibilisation : crises humanitaires, réchauffement climatique.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Modélisation des systèmes : besoin de tenir compte des niveaux de performances attendues et des pratiques des opérateurs (il n'est pas toujours nécessaire d'être au plus près du réel).
- Usages directs des modèles CAO qui doivent souvent faire l'objet de reprises pour garantir le temps réel.
- Déploiement des solutions logicielles compatibles multi-supports (casques, CAVE...).
- Accès à la technologie par SNUI (super natural user interface) et interaction « sensorielle » avec l'ordinateur.

Au niveau numérique

- Qualité des IHM et ergonomie pour faciliter l'adoption de ces technologies et faciliter la conduite du changement, problématiques techniques propres à la continuité numérique.
- Évolution vers la « réalité mixte » ou « réalité virtuelle augmentée », qui fusionne les mondes réels et virtuels.
- Amélioration des avatars et des expériences utilisateurs dans le cadre de session collaborative.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Préparation des données en amont des revues de projets (adaptation importante et parfois scénarisation des maquettes CAO).
- Maîtrise des kits de développement spécifique à la réalité virtuelle ou de nouvelles offres intégrées aux outils de conception.
- Nouvelles méthodes pédagogiques à mettre en place grâce à la portée de la réalité virtuelle.

Les questions à se poser

- Des problématiques financières sur l'évaluation d'un ROI, qui est cruciale dans le choix des applications pour l'intégration et l'utilisation effective de ces nouvelles technologies.
- Dans combien de temps la réalité virtuelle sera-t-elle adoptée par le grand public ?
- Questions non encore résolues sur les effets d'expositions prolongées sur la santé (physique et mentale) des sujets (publics jeunes, opérateurs en usine).
- Comment protéger les données ? Quelle est la manière la plus éthique de collecter les données des opérateurs ?

FICHE 53

RÉALITÉ VIRTUELLE

► MATURITÉ DE L'OFFRE

- L'offre logicielle est pour l'instant très fragmentée et induit une possible rupture de la continuité numérique.
- Les grands éditeurs accroissent leur capacité native à intégrer la réalité virtuelle au sein même de leurs outils de conception.

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Contributeurs : Arts et Métiers (Frédéric Mérienne, LISPEN Institut Image)

FICHE 8

CLOUD ET BIG DATA

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'« informatique en nuage » (*cloud computing*) est un système d'information et de services accessible via Internet. Le cloud désigne un ensemble de processus qui consiste à utiliser la puissance de calcul et/ou de stockage de serveurs informatiques distants à travers un réseau, généralement Internet. Ces serveurs sont loués à la demande, le plus souvent par tranche d'utilisation selon des critères techniques (puissance, bande passante...) ou au forfait.

Le big data est le résultat de l'explosion quantitative de données numériques qui a amené les chercheurs et les analystes à proposer de nouveaux moyens technologiques et organisationnels pour les analyser et les exploiter. Ces « données de masse » (big data) sont en général stockées dans le cloud. En effet, ses capacités de collecte, de stockage et la facilité d'accès aux données qu'il apporte en fait un outils approprié à la multiplicité quantitative et qualitative de données. Il permet de découvrir des tendances cachées, d'effectuer des analyses prédictives et de réaliser des gains d'efficacité.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

L'interconnexion des sites de production et des départements au sein de l'entreprise implique un partage de grandes quantités de données, rendue plus facile grâce au cloud. Ce dernier peut être particulièrement utile aux chaînes d'approvisionnement puisqu'il qui permet :

- de créer des liens coopératifs entre de multiples localisations ;
- une visibilité des gains de productivité ou autre sur un tableau de bord ;
- une mise sur le marché plus rapide ;
- une réponse plus rapide aux besoins changeants des clients.

Le big data autorise quant à lui l'identification des gains économiques réalisables grâce aux concepts « d'entrepôts de données » (*data warehousing*) pour les ordonner, de datavisualisation pour en permettre leur analyse, de business intelligence et d'analyse prédictive.

Sur le plan technologique

La présence de capteurs sur les machines et les produits permet de collecter et d'analyser d'importantes sommes de données. Avec les bons outils de traitement et d'analyse, ces données permettent :

- une meilleure compréhension du fonctionnement des équipements complexes en confrontant les données de monde virtuel et de mode réel (notion de jumeaux numériques) ;
- de qualifier des équipements par des outils de test virtuels (ou hybrides, c'est-à-dire alliant tests virtuels et bancs de tests) ;
- d'inventorier, de contrôler, et d'optimiser la chaîne de production ;
- d'augmenter la durée de vie des machines grâce à des actions de maintenance préventive rendue possibles par l'anticipation des dysfonctionnements.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Le cloud industriel sécurisé permet à toutes les entreprises, notamment aux PME de bénéficier de logiciels informatiques adaptés (applications métiers) et évolutifs (PLM, MOM, ERP) sans nécessiter l'acquisition de matériel informatique haut de gamme ni l'installation de logiciels complexes.
- L'analyse des big data peut apporter aux fabricants un feedback sur la façon dont leurs produits sont utilisés. Ceux-ci en tiendront compte dans la conception de la génération suivante. De nouveaux modèles commerciaux comme l'usage à la demande et/ou la facturation à l'usage vont permettre de réduire le coût de possession et ainsi significativement améliorer le retour sur l'investissement des matériels (capital non-mobilisé).

FICHE 8

CLOUD ET BIG DATA

Sur le plan environnemental, sociétal

L'analyse du big data consentira une réduction de la consommation en énergie. Toutes les variables provenant de tous les systèmes d'information d'un site (énergie, production, qualité, etc.) peuvent en effet être collectées et analysées afin de définir les réglages optimaux des procédés d'un point de vue énergétique.

▶ LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Les fabricants réaliseront leur chiffre d'affaires en vendant leurs machines mais également en proposant de nouveaux services.
- Connaissance et utilisation d'outils de collecte et de traitement big data (bases de données NoSQL, traitement massivement parallèle, stockage clé/valeur ou Memtables, HADOOP/MAPREDUCE...).
- Le big data se base sur cinq éléments clés, les «5V», à prendre en compte :
 - > **volume** : les volumes de données à collecter et analyser sont considérables et en augmentation constante ;
 - > **vélocité** : c'est-à-dire à quelle vitesse se crée et se déplace la donnée et à quelle vitesse dois-je analyser ma donnée pour qu'elle soit utile à mon entreprise ;
 - > **variété** : les données peuvent prendre des formes très variées et très hétérogènes (voix, données faciales,

données transactionnelles, web analytics, textes, images, etc.) ;

- > **véracité** : la véracité ou fiabilité des données est notamment menacée par les comportements déclaratifs (sur formulaires), par les diversités des points de collecte, par la multiplication des formats de données et par l'activité des robots et des faux profils innombrables sévissant sur Internet ;
- > **valeur** : dans un contexte d'infobésité, il s'agit d'être capable de se concentrer sur les données ayant une réelle valeur et étant actionnables.

Au niveau numérique

Adoption de nouveaux niveaux de sécurité et de sauvegarde, à traiter avec les fournisseurs de services informatiques. Le cloud inclut le SaaS (*Software as a Service*), PaaS (*Platform as a Service*), IaaS (*Infrastructure as a Service*), etc.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- L'utilisation du cloud nécessite une hausse de dépenses opérationnelles par rapport aux dépenses en immobilisations.
- Se tenir au courant des nouveaux standards et savoir les appliquer.

Les questions à se poser

- Est-ce que mes données sont sécurisées ? Le recours au cloud et au big data implique de surveiller la sécurité des données.

▶ MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 9

CND INNOVANTS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'industrie européenne cherche aujourd'hui à produire des composants de plus en plus légers, tout en maximisant leur durée d'utilisation et leur fiabilité. Les importants coûts liés à la sécurité et à la maintenance ont encouragé le développement de techniques non destructives capables de détecter les défauts au plus tôt, tant sur les lignes de production que sur les équipements en service. La recherche croissante de fiabilité des méthodes et procédures d'analyse a entraîné le développement de nombreux outils de simulation de CND (contrôle non-destructif) et de modèles mathématiques. De nouveaux domaines de recherche apparaissent également afin d'accroître à la fois la quantité d'informations autour des technologies CND et la valeur économique des inspections réalisées en intégrant ces informations dans un contexte de qualité.

De nombreuses technologies de CND modernes seront donc mises en œuvre dans le cadre de l'industrie du futur. Celles-ci s'appuient notamment sur le développement de nouvelles techniques de traitement du signal, d'imagerie numérique ainsi que sur l'évolution des capteurs (avec ou sans contact). Les principales méthodes de CND innovantes (en imaginant qu'elles seront couplées dans des systèmes de CND multiphysiques/multicapteurs) sont les suivantes :

- systèmes acoustiques (intensimétrie, antennerie, holographie, interférométrie) ;
- systèmes inductifs ;
- systèmes optiques (faisceau laser, à semi-conducteur/LED, holographie, nouveaux rayonnements térahertz etc.) ;
- thermographie infrarouge (thermique et/ou hyperspectrale de l'infrarouge proche à l'infrarouge millimétrique) ;
- CND couplé à la robotique (instruments robotisés : vision industrielle sur les lignes de production, instruments fixes et pièces mobiles) ;
- tomographie 3D par rayons X ;
- capteurs IR (spectroscopie) suivi multicouches/mélange ;
- courants de Foucault et ultrasons multiéléments et/ou détection thermique ;
- technologies de contrôle de pièces micrométriques et/ou multiéchelles (du micron au mètre) ;
- technologie d'analyse de liquides (viscosimètre pour mélange polymère/nanocharges, calorimètre pour suivi de réaction chimique, spectroscopie Raman).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Les CND innovants, et notamment les CND multiéléments (multicapteurs, multiphysiques, multiéchelles) autorisent une réduction des coûts grâce au gain de temps de réglage des capteurs et d'acquisition des données.

Sur le plan technologique

- Les technologies de mesure sans contact (optiques/laser par exemple) autorisent l'insertion du CND au sein des procédés industriels : les mesures sont applicables à de nombreux matériaux quel que soit l'état de surface (mou, fragile, chaud, acide...) et peuvent être effectuées en continu sur des pièces en mouvement ou difficilement accessibles.
- Pour les applications acoustiques ou vibratoires, l'antennerie acoustique autorise l'identification et la localisation déportée des sources de bruit et par conséquent la caractérisation vibratoire à distance de pièces difficilement accessibles ou en mouvement.
- Les technologies sans contact permettent un gain de sécurité opératoire, la mesure s'effectuant à distance d'une machine ou d'un procédé dangereux.
- L'analyse de champs et la corrélation d'images numériques (mesure du champ de déplacement de la surface d'une image déformée par rapport à une image de référence à l'aide de caméras CCD) rendent possible un couplage fort entre vision industrielle et robotique. Une analyse 3D peut être obtenue grâce à la combinaison de plusieurs caméras.

FICHE 9

CND INNOVANTS

- La structure interne de pièces complexes (tous types de matériaux, dont les composites) est autorisée par les méthodes de tomographie.
- L'imagerie numérique en transmission peut être associée au process de fabrication additive pour améliorer la réalisation de formes internes/externes complexes.
- Le CND par courants de Foucault ou ultrasons peut être réalisé à l'aide de sondes multiéléments, qui comprennent plusieurs capteurs de même type et améliorent ainsi la précision des mesures tout en réduisant le temps d'acquisition des données.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Les technologies optiques doivent être adaptées à l'environnement : leurs performances peuvent dépendre des conditions ambiantes (température, hygrométrie, gouttelettes d'eau ou d'huile en suspension, etc.).
- L'amélioration des temps d'acquisition et de calcul en tomographie est un axe de recherche. Une meilleure maîtrise de l'incertitude de mesure est également nécessaire. Certains types de défauts (fissures jointives, matériaux très homogènes) restent de plus difficiles à détecter.

Au niveau numérique

- Dans le cas des méthodes d'analyse de champs, il est nécessaire de mettre en place des moyens adaptés aux temps de calculs importants pour le traitement des données.
- Les nouveaux systèmes de CND permettent l'acquisition de grandes masses de données (big data). Les méthodes d'analyse doivent considérer des méthodes de réduction de ces données et parallèlement des méthodes de réduction des modèles physiques adaptées à ces données.
- Les méthodes d'aide à la décision doivent être adaptées à l'environnement numérique (données, analyses, modèles).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Certaines méthodes peuvent nécessiter une montée en compétences, dans le cas de systèmes numériques orientés expertise par exemple.
- La généralisation de l'utilisation des CND multiéléments/ multiphysiques (courants de Foucault ou ultrasons) passe par la formation des opérateurs.
- Les mesures sans contact doivent être réalisées selon les nouvelles normes ISO 10-360.

Les questions à se poser

- Dans le cas de la corrélation d'images numériques, comment se préparer à l'arrivée de la nouvelle norme AFNOR (publication prévue d'une pré-norme pour une méthode fiable et harmonisée) ?
- Comment tirer parti des recherches très avancées effectuées dans les laboratoires académiques ?
- Quelles structures intermédiaires entre laboratoires académiques et milieu industriel (laboratoires communs, centre techniques) ?
- Comment intégrer toutes les solutions de CND à un environnement de travail numérique ?

FICHE 9

CND INNOVANTS

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Contributeurs : Arts et Métiers (Jean-Christophe Batsale I2M)

FICHE 15

CONCEPTION ET QUALIFICATION VIRTUELLE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'implantation d'un nouveau site industriel comporte plusieurs phases : conception du site de production, préparation et suivi de chantier de construction, mise en route et réception des installations, formation des opérateurs à leurs postes de travail et aux procédures... Autant d'étapes incontournables que veulent simplifier les nouvelles technologies virtuelles et immersives. La réalité virtuelle est un outil précieux sur la totalité de ce cycle avec extension possible de son usage vers l'exploitation, le SAV et la maintenance. Son importance est démontrée dans le processus d'intelligence collective, résultat d'une collaboration améliorée entre tous les secteurs de la société.

La première étape consiste à visualiser en 3D un site industriel avant son implantation, dans la phase d'avant-projet. La visualisation de cette maquette tridimensionnelle est indispensable pour accélérer la prise de décisions, mieux maîtriser les interfaces et rendre plus robuste les choix techniques. Pour le client, elle permet une visite en avant-première de sa future installation grâce à l'aspect collaboratif des interfaces. Cette présentation permet d'avoir une vision de l'ensemble des briques fondamentales d'une usine : bâtiment et infrastructures¹, process de production, moyens logistiques...

Les technologies immersives permettent d'immerger l'humain dans l'usine et de valider les interactions entre l'homme et son environnement, voire d'apporter les modifications nécessaires pour satisfaire des critères d'efficacité, de sûreté et d'ergonomie. Cela permet aussi d'exercer de façon pratique les futures tâches afin de sensibiliser les opérateurs aux risques et dangers encourus sur site notamment pour prévenir certains risques accidentels.

Dans un deuxième temps, ces technologies virtuelles et immersives peuvent contribuer à la formation des premiers compagnons sur le nouveau site de production. Il est en effet possible de former les opérateurs à leur environnement de

travail en parallèle de la construction du site de production et d'être ainsi opérationnel dès le premier jour d'implantation. Les dispositifs virtuels et immersifs peuvent également être utilisés a posteriori de la construction d'un site de production pour des stages de perfectionnement, des formations sur des opérations à risque, de la collaboration à distance pour des opérations de terrain difficiles ou encore de l'aide à la décision sur l'amélioration de l'ergonomie d'un poste de travail.

Même si le coût des centres d'immersion reste élevé, et souvent incompatible avec les ressources des PME, la multiplication des centres mutualisés rend cet accès plus facile et le développement des applications immersives avec des casques de réalité virtuelle tend à largement démocratiser ces technologies. Un casque est en effet parfaitement adapté à la préparation de scénarios réalisés en exercice individuel. Le contenu préparé peut être ensuite partagé *via* des applications collaboratives ou en salle de réalité virtuelle mutualisé pour des revues à plusieurs.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Le coût de création d'un équipement de réalité virtuelle est bien inférieur à celui d'un poste de travail sur une ligne d'assemblage.
 - > Faire en sorte que chaque outillage soit bien conçu dès le départ évite d'avoir à le modifier en cours de route ou de devoir mettre au rebut un outil de production coûteux.
 - > Pouvoir tester de nouvelles configurations et apporter de la flexibilité et de l'agilité à l'outil de production.
- Accélérer la prise de décisions et mieux maîtriser les interfaces.
- Concernant les aspects de formation théorique sur site de production :
 - > gain de temps sur la formation du personnel ;
 - > diminution des risques sur site ;
 - > amélioration de la productivité opérationnelle.

¹. On parle, par exemple, ici de BIM : *building information modelling*.

FICHE 15

CONCEPTION ET QUALIFICATION VIRTUELLE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

- Concernant les aspects de formation pratique en interaction avec l'environnement virtuel :
 - > gain de temps sur la formation du personnel ;
 - > diminution des risques sur site ;
 - > assurance de la sécurité du personnel ;
 - > optimisation de la productivité du site.

Sur le plan technologique

- Ces technologies sont assez matures pour un usage industriel déployé de manière systématisée dans les processus de développement.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Formation continue de tous les corps de métier, qui s'appuie sur la digitalisation progressive de l'ensemble de la chaîne de valeur du *manufacturing*.
- Garantir l'adoption de ces technologies par tous les acteurs de la chaîne de valeur par la continuité numérique entre tous les contenus virtuels.

Sur le plan environnemental, sociétal

- L'optimisation des opérations de fabrication et d'assemblage ont un impact direct sur les performances énergétiques et environnementales des outils de production, au même titre que les conditions de travail des salariés.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- Les technologies (*hardware*) sont aujourd'hui matures et disponibles. Les barrières, situées essentiellement au niveau de la numérisation et la virtualisation des outils de production, sont progressivement levées (adoption de la digitalisation, moyens de numérisation...).
- Les clés de la réussite se trouvent ainsi sur la mobilisation des bonnes compétences avec l'identification d'un retour sur investissement à court terme justifiant un investissement conséquent sur le sujet.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Considérer l'apport de la réalité virtuelle sur l'évolution des logiciels de formation d'une part et sur l'évolution des instructions de travail dans les ateliers de production, de maintenance et dans les entrepôts d'autre part.

Les questions à se poser

- Les acteurs industriels doivent saisir la valeur ajoutée de ces approches, qui permettent dans bien des situations d'apporter des gains importants en termes d'ergonomie, de productivité et d'agilité.

FICHE 16

CONCEPTION ET SIMULATION DU PRODUIT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

À l'ère des objets connectés, de l'électronique et de la fabrication additive, la simulation numérique est l'une des technologies clés de l'ingénierie. Elle consiste à réaliser l'étude virtuelle d'une pièce ou d'un processus selon différents scénarios d'étude. Mise à la portée de l'ensemble des entreprises, quels que soient leur secteur et leur taille, elle peut être un outil majeur de progrès technique et de gain économique.

La montée en performance des outils existants permet d'élargir le périmètre d'utilisation de la simulation, pour être intégrée dès le début du processus de conception afin d'examiner en temps réel l'impact des modifications et ainsi explorer rapidement l'ensemble des options possibles.

Ainsi, des applications comme la maquette numérique du produit (*digital mock-up*) ou la prise en compte de critères biomimétiques arrivent progressivement à maturité. Les outils intègrent une dimension multi-physique toujours plus forte, avec une utilisation facilitée (multi-device, mode SaaS..).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Répondre à l'ensemble des problématiques concernant les matériaux utilisés, le produit et le procédé.
- Optimiser les paramètres de production, réduire le poids des pièces.
- Réduire le coût et le temps de développement.
- Optimiser la performance mécanique du produit.

Sur le plan technologique

La simulation au service de l'industrie est un moyen d'accélérer les phases de conception et de fabrication. De nombreuses briques technologiques innovantes viennent donner une autre dimension à la simulation :

- la réalité virtuelle pour permettre aux acteurs d'appréhender et de s'approprier les futurs produits en s'immergeant dans l'exhaustivité visuelle et fonctionnelle d'une gamme ;
- l'accélération GPU pour réduire le temps nécessaire à l'exploration de nombreuses variables de conception afin d'optimiser les performances et de respecter les délais ;
- les technologies des data sciences pour permettre aux industriels de résoudre et d'anticiper les phénomènes de variabilité et d'instabilité, avec des applications en maintenance préventive grâce à la création de jumeaux numériques des produits et des procédés ;
- les évolutions technologiques permanentes du calcul intensif (HPC), du big data et du cloud qui étendent chaque jour davantage les champs d'application de la simulation numérique, avec la mise en place de portail et d'outils de visualisation à distance.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Transformer la vision du couple produit/client de l'entreprise et l'orienter complètement sur la notion d'usage grâce aux données sur l'utilisation des produits.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- L'assimilation de données pour l'analyse et la prévision :
 - > cartographie des données disponibles et structuration du système d'information ;
 - > disponibilité d'un nombre croissant de mesures physiques pour une intrication de plus en plus étroite entre simulations numériques et données.

FICHE 16

CONCEPTION ET SIMULATION DU PRODUIT

- La quantification des incertitudes et les simulations d'ensemble :
 - > l'accroissement de la puissance des calculateurs permet d'envisager un grand nombre de simulations du même phénomène en perturbant de manière aléatoire les paramètres qui les influencent ;
 - > ces expériences permettent de quantifier les incertitudes d'un résultat en fonction des incertitudes des paramètres d'entrée.
- Combiner mesures et modèles à l'aide de considérations statistiques :
 - > étroitement liée à l'assimilation de données et aux analyses de quantification d'incertitudes qui reposent sur des simulations d'ensemble ;
 - > rapprochement progressif de la modélisation physique et du traitement des données.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Compétences avancées autour de l'ensemble des expertises clés de la simulation : modélisation et simulation, processus de conception, data sciences et analyses prédictives...

Les questions à se poser

- Elles sont relatives à l'impact des outils de simulation avancée dans la performance de l'entreprise, à l'échelle de son organisation, de sa production, ou de son évolution.
- Quels sont les enjeux en termes de rentabilité ?
- Quels sont les impératifs en termes de pérennité de l'activité et de transition numérique ?
- Quels sont les investissements nécessaires (outils, RH, transformation des processus...) ?

► **MATURITÉ DE L'OFFRE**

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 29

GESTION DE LA QUALITÉ PRODUIT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Pour rester compétitives, les entreprises doivent établir une stratégie leur permettant de générer de meilleurs produits, plus vite et moins cher que leurs concurrents. L'usine du futur permettra d'améliorer la gestion de la qualité en l'évaluant durant tout son cycle de vie (conception, production, utilisation et destruction), notamment *via* des technologies de détection des défauts en production, de gestion de l'identification, de traçabilité et de géolocalisation des produits et des opérations de fabrication.

La gestion de la qualité produit implique notamment :

- la mise en place de technologies d'identification et de traçabilité (datamatrix, RFID, codes à barres, NFC, tag actifs ou passifs...);
- la détection des défauts en production (géométrie, santé matière, CND automatisé, tests fonctionnels à 100 %, ...);
- la géolocalisation des produits outdoor et indoor ;
- la gestion de l'information (fiches suiveuses, codes-barres...);
- l'intégration de la traçabilité dans les logiciels de production ;
- la lutte anti-contrefaçon ;
- la traçabilité des produits et des opérations de fabrication ;
- l'historisation des usages (*via* HUMS *health and usage monitoring system*) en operation.

L'axe majeur de la qualité doit être l'écoute et la prise en compte des clients. Il s'agit d'alimenter la démarche par des enquêtes clients, pour recueillir leurs attentes et leurs points de vue, les utiliser comme levier pour provoquer le mouvement et analyser les processus au regard des éléments recueillis.

La qualité doit s'inscrire dans un cadre clairement défini tout en encourageant les initiatives. Son déploiement nécessite une réelle souplesse. Il est indispensable de dissocier ce qui est négociable de ce qui ne l'est pas.

Les initiatives sont appuyées et soutenues par une méthodologie qui encourage la mise en place d'une

animation en réseau, valorise des bonnes pratiques, organise la comparaison des performances avec d'autres entreprises, développe les échanges informels.

La péréquation « coût de non-qualité » versus « coût d'obtention de la qualité » sera impacté par ces nouvelles technologies permettant de faire mieux et moins cher, et ouvre donc le champ des possibles.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Quand il s'agit de l'achat et de la vente de produits, la qualité est l'une des caractéristiques qui permet de générer de la confiance et donc de déclencher l'acte d'achat. En cela, la gestion de la qualité du produit et des processus de l'outil productif représente un élément essentiel de la performance économique de l'entreprise.

Sur le plan technologique

- Des systèmes composés de centres d'usinage, de systèmes de transport et de robots industriels adaptés les uns aux autres permettent une fabrication compétitive en grande série tout en répondant aux besoins de personnalisation des clients.
 - > Capteurs de température, de pression, de niveau et de débit pour une surveillance fiable des fluides process.
 - > Cellules robotisées et stations de montage, barrières de sécurité multifaisceaux, barrages immatériels de sécurité et détecteurs de sécurité inductifs pour la protection des machines et des personnes.
 - > Détecteurs inductifs, capacitifs et optoélectroniques et détecteurs pour vérins pour une détection précise des positions des parties des machines.
 - > Systèmes de surveillance vibratoire pour la maintenance préventive conditionnelle de machines-outils.
 - > Systèmes RFID, lecteurs de codes et systèmes de caméra pour la traçabilité de matériel et la surveillance de la qualité.

FICHE 29

GESTION DE LA QUALITÉ PRODUIT

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Il est important de mettre en place des bases d'amélioration continue, omniprésentes et structurées, afin d'améliorer l'efficacité et l'efficacé des processus de l'entreprise. Ce processus se réalise en deux temps :

- améliorer les produits et les services, les processus et le bouclage des processus par des actions curatives, correctives et préventives, réaliser des audits ;
- déterminer des objectifs en termes d'efficacité et d'efficacé et des critères pour évaluer s'ils sont atteints puis mettre en place, pour tous, des méthodes, outils et techniques visant à augmenter le niveau de qualité. Ils permettront à la fois de résoudre les problèmes et de repenser les processus pour améliorer leur efficacité.

Sur le plan environnemental, sociétal

La gestion de la qualité permet d'intégrer l'outil productif et le produit dans une démarche plus responsable, aussi bien d'un point de vue sociétal qu'environnemental. Les utilisateurs finaux sont d'ailleurs de plus en plus sensibles au respect de l'environnement et à la volonté de l'entreprise de favoriser le développement d'une économie responsable.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

Un parcours certifié de production et un protocole interne propre pour obtenir un flux de travail continu et vérifiable qui garantisse qualité d'un côté et efficacité de l'autre en permettant d'intervenir à tout moment dans la filière pour des vérifications et des contrôles.

Expérimenter et réaliser en continu des prototypes pour réaliser des produits toujours plus à l'avant-garde en ce qui concerne l'efficacité et l'écologie.

Au niveau numérique

La transformation numérique conforte la démarche qualité d'une entreprise. La fonction qualité au sens large intervient en termes d'accompagnement méthodologique et de suivi de la mise en œuvre des projets en matière de transformation. Elle se nourrit ainsi des nouveaux outils du numérique.

Avec l'analyse des données de plus en plus poussée, d'incroyables possibilités s'annoncent. L'utilisation de masses d'informations peut améliorer encore la relation de services avec le client tant au niveau de la réactivité que de la personnalisation.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

La gestion ou le management de la qualité fait référence aux activités de la haute direction en rapport avec la qualité. On parle d'établir une politique qualité et des objectifs qualités ainsi que de déterminer les responsabilités qualité des différents intervenants. Ces activités sont mises en œuvre par la planification, la maîtrise, l'assurance et l'amélioration de la qualité, dans le cadre d'un système qualité. On vise à établir des stratégies permettant d'améliorer les résultats de l'entreprise ou de réduire les coûts d'exploitation. Cette fonction vitale est généralement assurée par un directeur qualité ou par le président lui-même, dans le cas d'entreprise plus petite.

Pour attester du respect d'un référentiel qualité, les entreprises ont recours à des organismes certificateurs accrédités. Ces derniers mènent des audits dans le but de certifier la conformité des pratiques à une norme.

Les organisations mettent en place des indicateurs qui débouchent sur des actions correctives menées à l'aide de nombreux outils. Tout est consigné dans une documentation opérationnelle dont l'objectif est de maîtriser ses processus.

Les audits internes et externes permettent de s'assurer que les processus restent en ligne avec les référentiels qualité retenus.

FICHE 29

GESTION DE LA QUALITÉ PRODUIT

Les questions à se poser

- Il est primordial de se questionner sur l'organisation et sur son efficacité : les revues de processus permettent d'analyser les performances opérationnelles puis d'engager une démarche d'amélioration.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 30

GESTION ET PILOTAGE DE LA PRODUCTION

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La gestion et le pilotage de la production regroupent les activités de planification et d'ordonnancement, de traçabilité des opérations de production, de mise en place des processus de contrôle qualité et de maintenance, de gestion des flux et des stocks, de suivi des opérateurs et de leur temps de travail et de tableaux de bord portant sur l'ensemble de ces activités. Ces activités ont connu une profonde mutation du fait de l'intelligence grandissante des équipements comme des composants (vannes, pompes, moteurs...) et les pratiques d'autocontrôle et d'autodiagnostic.

Principales applications de ces technologies :

Non spécifique à un domaine, la production couvre l'ensemble des secteurs industriels (aéronautique, métallurgie, électronique, automobile, plasturgie, agroalimentaire...) et s'adresse à tous types d'entreprises (PME-PMI, grands groupes, TPE).

Principaux segments technologiques concernés :

Gestion centralisée, GPAO (gestion de production assistée par ordinateur), MES (*manufacturing execution system* ou gestion des processus de production), MOM (*manufacturing operation management*, extension du MES pour une solution multi-usines couvrant toutes les activités en relation avec la production comme la logistique, les processus qualité et de maintenance des équipements, etc.), tableaux de bord de performance (productivité, flexibilité, utilisation optimale des équipements, environnement et satisfaction client), suivi d'indicateurs clés comme l'OEE (*overall equipment efficiency*) ou le TRS (taux de rendement synthétique des installations) sur les équipements sensibles (goulots d'étranglement, procédés spéciaux...).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Pour la production :
 - > meilleure gestion des flux de production ;
 - > réduction des ruptures de chaîne ;
 - > production au plus juste pour réduire les coûts.
- Pour la logistique :
 - > amélioration du flux de matières (matières premières, produits fabriqués) ;
 - > optimisation et fiabilité des délais de livraison ;
 - > meilleure gestion des stocks.
- Pour la planification :
 - > visibilité plus large sur l'activité et les ressources de l'atelier ;
 - > coordination facilitée avec les différents services ou donneurs d'ordres (production, achats, logistique, qualité, marketing...) ;
 - > contrôle et suivi des bilans de fabrication.
- Pour le service méthodes :
 - > prise de recul et capitalisation des données liées à la fabrication ;
 - > dossiers de fabrication complets, centralisés et partagés (avec liens sur documents) ;
 - > analyse des centres de coût pour améliorer la productivité.
- Pour le service de contrôle qualité :
 - > réduction du taux de rebut par le suivi d'indicateurs clés et l'ajustement en temps réel de la production ;
 - > conformité aux processus qualité internes et aux réglementations gouvernementales (par exemple, dans l'industrie pharmaceutique ou aéronautique) ;
 - > traçabilité de l'ensemble des éléments intervenant dans la fabrication d'un produit, permettant de cerner rapidement les composants impliqués en cas de non-conformité.

FICHE 30

GESTION ET PILOTAGE DE LA PRODUCTION

Sur le plan technologique

- Pilotage et commande :
 - > interconnexion avec l'extérieur : solutions de pilotage à distance, applications mobiles et bases de données partagées avec les fournisseurs ;
 - > planification et gestion centralisée des machines ;
 - > commande numérique.
- Gestion des flux :
 - > informatisation des flux d'ordre, en relation avec l'ERP ;
 - > automatisation de la logistique interne : GPAO, ERP, PLM ;
 - > interconnexion logistique externe : GPAO partagée.
- Traçabilité des produits :
 - > suivi des lots ;
 - > suivi unitaire des pièces : puces RFID, laser, gravure ;
 - > capteurs de condition : capteurs thermiques, hygrométriques, de comptage...

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- L'optimisation de l'utilisation des équipements, des activités humaines et des stocks peut modifier profondément le déroulé et l'exécution des processus. Une implication forte du management autour des objectifs stratégiques comme la réduction des coûts, le contrôle qualité et l'amélioration continue est nécessaire.
- Le suivi des opérations requiert souvent un niveau de détail très fin pour être pertinent et implique beaucoup d'acteurs dans l'entreprise qui n'ont pas forcément l'habitude de travailler sur un outil informatique partagé dans l'atelier.
- De nouvelles stratégies de planification et d'ordonnement transforment profondément le processus de production : par exemple, le juste à temps repose sur l'ajustement en temps réel des quantités produites en fonction de la demande client (implique une flexibilité, une fiabilité et une qualité totales des lignes de production pour produire rapidement de petites séries différenciées).

- Des postes de travail de plus en plus mobiles : les travailleurs peuvent changer de poste ou suivre et contrôler un équipement à distance.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Augmentation de la sécurité des travailleurs : un suivi détaillé de l'activité des opérateurs et des procédures de maintenance des équipements peut fournir de nombreux enseignements comme un rythme de travail trop rapide, des consignes de sécurité non respectées, une mauvaise formation du personnel, un défaut d'entretien des machines, etc.
- Conformité avec la législation sociale locale garantie par ce même suivi de l'activité des travailleurs. Optimisation du stockage et du transport de matières premières et composants (réduction des émissions de CO₂).
- Réduction de la consommation (électrique, en eau...) des processus de production grâce au pilotage et à la gestion optimale des flux.

▶ LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Développement d'IHM (interfaces homme-machine) pour les fonctions de pilotage (flux d'informations et ergonomie) : par exemple, pilotage de la production par tablettes numériques avec des écrans simples et nécessitant un minimum de clics.
- Homogénéisation et intégration progressive du pilotage informatique : MES (*manufacturing execution system*), PLM (*product life cycle management*), ERP (*enterprise resource planning*), SCM (*supply chain management*).
- Des capteurs apportent de nouvelles fonctionnalités aux machines (pilotage, surveillance, maintenance prédictive et autonomie).

FICHE 30

GESTION ET PILOTAGE DE LA PRODUCTION

Au niveau numérique

- Pilotage à distance de machine à l'aide de nouvelles applications techniques mobiles.
- Une plus grande maîtrise de la sécurité vis-à-vis du cloud.
- Pilotage et surveillance optimisés sur la base de réseaux de capteurs connectés (*Industrial Internet of things*).

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Identifier, analyser et répondre aux besoins générés par la production.
- Optimiser les moyens de production en termes de coûts, délais, qualité.
- Maîtriser et identifier les fonctions périphériques au domaine des différents acteurs.
- Développer des liaisons techniques, organisationnelles et relationnelles avec les acteurs internes ou externes à l'entreprise.
- Conduire un projet, mettre en œuvre et suivre les certifications qualité-sécurité-environnement.

- Penser la problématique de gestion de la production au niveau de l'entreprise globale, afin de faire partager les bonnes pratiques industrielles par l'ensemble des sites de production.

Les questions à se poser

- Les différents paramètres de planification ne peuvent pas être pensés indépendamment des critères de performance, d'où la nécessité de faire des choix. La combinaison idéale des paramètres dépend de la performance recherchée par l'entreprise.
- La mise en place d'une solution globale de gestion et pilotage de production est un projet stratégique et longue haleine. Il est opportun d'identifier les domaines prioritaires d'intervention (gestion des stocks, contrôle qualité, suivi de production...) afin de découper le projet en phases maîtrisables, en commençant par les applications offrant le meilleur retour sur investissement.

► **MATURITÉ DE L'OFFRE**

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	---------------	----------	----------

FICHE 31

INFRASTRUCTURES DE SIMULATION

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La simulation des produits et des procédés prend en compte des phénomènes multiphysiques mis en jeu à différentes échelles spatiales et temporelles. L'optimisation numérique vise à déterminer des optima vis-à-vis de nombreux paramètres indépendants (mécanique, coût, consommation énergétique, etc.). Même si le domaine de l'aéronautique est extrêmement impacté par les infrastructures de simulation, les simulations, au sens large, touchent un spectre d'applications considérable (non-exhaustif) :

- météorologie;
- mécanique automobile;
- physique des particules;
- électronique;
- biologie;
- physique quantique.

Les techniques de simulations les plus courantes sont les suivantes :

- simulation numérique (uniquement logiciel);
- simulation hybride (logiciel et matériel);
- simulation interactive (interaction de l'homme *via* une IHM);
- simulation pilotée (interaction de l'homme à travers un scénario);
- simulation instrumentée (utilisation de matériel par l'homme);
- simulation temps réel.

La méthode de simulation numérique par les éléments finis est une des méthodes les plus répandues pour étudier le comportement des matériaux. C'est un moyen de simuler de manière virtuelle un produit dans son environnement final et ainsi de répondre à de multiples enjeux industriels tels qu'anticiper les écueils de conception, réduire les prototypes ou encore favoriser l'innovation. En soit, toute simulation

numérique est une approximation d'un problème réel, soit parce que celui-ci n'admet pas de solution analytique, soit parce que l'ordinateur possède une puissance limitée par nature.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

La simulation permet une meilleure prise en compte des besoins et des contraintes ainsi qu'une modification rapide des paramètres à moindres coûts.

Certaines techniques d'optimisation permettent également de faire des économies rationnelles de matériaux et d'améliorer la qualité et la durée de vie des produits et/ou d'optimiser des processus de production.

Sur le plan technologique

- Dues à la complexité de faire de tels calculs « à la main », les simulations numériques permettent de rendre compte de phénomènes passés, présents ou futurs. Elle constitue une présentation approximative des phénomènes effectifs, qui permettent d'en tirer des informations pertinentes.
- Les évolutions technologiques permanentes du calcul intensif (HPC), du cloud et des techniques de *data mining* étendent chaque jour davantage les champs d'application de la simulation numérique, avec la mise en place de portail et d'outils de visualisation à distance pour simplifier l'accès et l'utilisation du calcul intensif.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Les progrès de la simulation permettent de réduire les délais de production et de mise sur le marché, ceci couplé à des économies financières. Ce n'est pas encore une méthode de production classique mais elle tend à le devenir.
- En parallèle, l'adaptabilité des simulations rend possible leur intégration dans de nombreux domaines et applications métiers.

FICHE 31

INFRASTRUCTURES DE SIMULATION

Sur le plan environnemental, sociétal

- L'environnement virtuel créé par la simulation permet de limiter le nombre de prototypes physiques à produire, se traduisant par des économies d'argent et d'énergie.
- En offrant un environnement de test virtuel, la simulation permet aussi de réduire le nombre de tests physiques ou d'essais in vivo de produits ou d'équipements, permettant d'identifier plus tôt les anomalies et donc, favorisant une mise sur le marché plus rapide, plus sûre et souvent à moindre coût.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique et numérique**

L'adoption des outils de simulation nécessitent :

- une amélioration des performances machines et de l'intuitivité des interfaces : ils permettront d'accélérer la démocratisation de ces solutions et leur développement au sein des entreprises ;
- de trouver un équilibre entre perception par l'être humain et modélisation des comportements et des environnements ;
- d'être intégré naturellement dans l'environnement informatique de l'entreprise ;

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

- de rendre l'utilisation de ces outils mobiles : la réalité virtuelle peut rentrer dans ce cadre, notamment dans le domaine de la santé.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Une action permettant aux entreprises d'être sensibilisée aux enjeux, aux technologies ainsi qu'aux usages de la simulation appliquée à leur métier, spécialement pour la simulation numérique semble nécessaire.
- Il semble important de généraliser la simulation numérique à toutes les filières initiales : développer un programme de formations de formateurs.

Les questions à se poser

- Est-ce que les outils de simulation sont bien en adéquation avec les attentes des utilisateurs ?
- Comment maintenir techniquement et financièrement les outils de simulation développés ?
- Quel ROI pour une faculté ou pour une formation académique ?

FICHE 35

INTÉGRATION ET CHAÎNAGE NUMÉRIQUE DES PROCESSUS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le numérique et le digital submergent l'environnement industriel, individuellement et collectivement. Plus qu'une réalité, le numérique est désormais devenu une nécessité. Les entreprises notent très souvent un gain lors de l'introduction d'une nouvelle technologie mais soulignent les problèmes de compatibilité avec les technologies existantes, notamment ERP. C'est l'objectif du chaînage numérique des processus que d'assurer l'interopérabilité entre les différents outils et processus de gestion de l'entreprise afin de maximiser la valeur ajoutée de chaque système. Ce chaînage numérique se fait *via* plusieurs outils tels que le PLM (*Product Life Manufacturing*), l'EAI (*Enterprise Applications Integration*), EDI (Échange de Données Informatisé), ERP (*Enterprise Ressources Planning*)...

La diversité des besoins professionnels, souvent très spécialisés, conduit à segmenter les applications informatiques. Il n'existe donc pas de logiciel suffisamment intégré pour satisfaire l'ensemble des besoins, et la direction du système d'information (DSI) est contrainte de réaliser un assemblage cohérent à partir de solutions d'origines diverses.

Des applications modernes côtoient des logiciels plus anciens et la métaphore de la ville est utilisée pour les faire communiquer ensemble. On dit alors que l'on urbanise le système d'informations, comme on urbanise les villes en gérant des nouveaux quartiers avec des anciens.

L'enjeu fondamental est dès lors de mettre en place l'architecture permettant la communication et la collaboration de différentes entités et silos. Ceci ne peut se faire qu'au travers d'une plateforme, à savoir un système consolidant l'ensemble des données utilisées et produites, en temps réel, afin d'optimiser les processus de l'entreprise au travers de sa chaîne de valeur (stratégie, design, manufacturing, ventes & marketing, après-ventes) pour casser ces silos.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Les enjeux dépassent de loin les enjeux de systèmes d'information. Une plateforme démultiplie l'efficacité d'une entreprise en lien avec son écosystème externe (fournisseurs, clients, canaux de distribution...) en permettant :

- l'optimisation des processus métiers ;
- la collaboration inter et intra-entreprises ;
- le lien permanent avec le client et son expérience, clé d'un business model performant.

Sur le plan technologique

L'approche plateforme garantit :

- la cohérence des informations ;
- un modèle « unique » d'urbanisation ;
- la possibilité d'optimiser les processus, les modes de travail en tirant parti d'information de différentes sources (à la fois internes à l'entreprise et externes) – *in fine* en s'appuyant sur l'intelligence artificielle et le big data.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

La plateforme accompagne les entreprises dans leur quête d'agilité, d'efficacité, de proximité au marché.

Sur le plan environnemental, sociétal

La plateforme est l'outil social par excellence : permettant une fluidité de la communication inégalée et de manière plus sociétale, elle rend l'accès plus simple à des savoirs et savoir-faire auparavant réservés à une minorité.

FICHE 35

INTÉGRATION ET CHAÎNAGE NUMÉRIQUE DES PROCESSUS

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- L'empilement d'intégrations point à point doit être considéré avec circonspection.
- L'approche plateforme est un must qui doit constituer l'épine dorsale du système opératoire d'une entreprise.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Conscientiser les acteurs de la filière sur l'évolution de cet environnement de plus en plus numérique, de plus en plus digital.

- Diagnostiquer le chaînage numérique existant dans les entreprises afin de promouvoir les bénéfices de l'approche plateforme (processus, outils, compétences...).
- Proposer des dispositifs pour gagner en compétences et accompagner la conduite du changement des constructeurs, des équipementiers, jusqu'aux ETI-PME.

Les questions à se poser

- Quels sont mes enjeux business ?
- Quelle plateforme me permettra d'y répondre ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 37

LOGICIELS DE SIMULATION DES PROCÉDÉS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La mise sur le marché de produits ou procédés complexes avec des coûts et des délais de plus en plus courts est devenue un enjeu majeur. Ainsi, modéliser les phénomènes physiques et simuler les impacts des systèmes sont des axes d'optimisation et de réduction des incertitudes. Les outils logiciels de simulation ont donc pour but d'améliorer et d'optimiser l'utilisation des procédés, la maintenance des machines supports aux procédés, ainsi que les moyens de transfert inter-procédés et de transport.

Principales applications de ces technologies : plusieurs logiciels commerciaux permettent de concevoir, d'optimiser et de suivre les performances de la majorité des procédés industriels existants dans les secteurs suivants :

- chimie organique et minérale allant de la chimie lourde à la chimie fine ;
- pétrochimie et carbochimie ;
- liquéfaction / gazéification du charbon ;
- agro-alimentaire ;
- traitement des minéraux ;
- biotechnologie ;
- fonderie ;
- plasturgie.

Principaux segments technologiques concernés : logiciel de simulation de production et des systèmes logistiques, optimisation de procédés, PSO (simulation des processus et optimisation des procédés), FAO, simulation des procédés de fabrication.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La simulation de procédés permet aux industriels d'une part, d'améliorer l'efficacité et la rentabilité d'un procédé existant et d'autre part, de concevoir et de simuler une nouvelle unité de production.
- Détection au plus tôt (avant les essais prototypes) des erreurs de conception et des effets de couplage indésirables.
- Optimiser le coût de la maintenance préventive en estimant précisément l'usure et le remplacement des équipements de production.
- Réduire le coût et le temps des essais de qualification.

Sur le plan technologique

- Prise en compte des contraintes d'environnement de fonctionnement dès la conception.
- Optimisation topologique et meilleur recul sur la faisabilité de nouvelles formes complexes.
- L'allègement des structures, que ce soit pour des raisons économiques ou écologiques, est devenu un défi quotidien des concepteurs.
- Amélioration de la qualité et de la traçabilité des produits finis.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Transformation profonde des pratiques au sein des bureaux d'étude qui peuvent tester virtuellement le produit en futures conditions opérationnelles.
- Éducation et amélioration de l'apprentissage des opérateurs sur une base virtuelle et réaliste.

FICHE 37

LOGICIELS DE SIMULATION DES PROCÉDÉS

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduction du gaspillage grâce au prototypage virtuel.
- Un rôle de plus en plus prononcé dans la gestion du cycle de vie du produit.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Les logiciels ont encore une marge de progression pour être à la fois précis et simples d'utilisation pour s'adapter aux différents procédés de fabrication additive, qui n'ont pas fini d'évoluer et qui sont très demandeurs de solutions.
- Prise en compte des phénomènes multiphysiques mis en jeu à différentes échelles spatiales et temporelles.
- Détermination des optima vis-à-vis de nombreux paramètres indépendants (mécanique, coût, consommation énergétique...).

Au niveau numérique

- Garantir un accès à des ressources informatiques suffisantes.
- Développement d'outils et plateformes pour permettre le calcul intensif.
- Développement de nouvelles interfaces hommes/machines pour améliorer l'ergonomie et la simplicité des solutions logicielles de simulation.

► MATURITÉ DE L'OFFRE**Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation**

- Besoin d'une connaissance approfondie de la physique des phénomènes pour modéliser les comportements mis en jeu aux différentes échelles, et interpréter correctement les résultats.
- Une utilisation des outils encore complexe et souvent réservée aux spécialistes de la simulation numérique.
- La formation des concepteurs à la maîtrise de tels outils est longue.
- Difficulté expérimentale pour valider tous les aspects du modèle multiphysique.

Les questions à se poser

- Les logiciels de simulation des procédés vont-ils devenir une offre « à l'usage » ?
- Quelles offres sur le marché sont suffisamment développées pour être assorties aux besoins des entreprises ?
- Comment utiliser la simulation dans un contexte de contrôle non-destructif des opérations ?

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

FICHE 40

MAQUETTE NUMÉRIQUE DE L'USINE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La pierre angulaire de l'usine du futur est le modèle numérique. Un tel modèle permet de tester virtuellement tout ce qui peut se passer dans l'usine (introduction de nouvelles machines ou processus, changement de caractéristiques du produit, augmentation du volume des commandes clients, impact d'un changement de fournisseur...) afin d'anticiper au mieux tous les impacts avant la mise en production réelle. Le concept de jumeau numérique, ou *digital twin* qui représente à la fois l'usine et son environnement, est récent et consiste à relier cette maquette à des capteurs installés sur les équipements industriels afin de suivre la production en temps réel. Il s'agit d'une réplique virtuelle de l'usine utilisée pour détecter des problèmes, tester et simuler des scénarios sur son pendant physique du « monde réel ».

Principales applications de ces technologies : tous les acteurs lancés dans une démarche d'industrie 4.0 sont concernés par le concept de jumeau numérique de leurs sites de production.

Principaux segments technologiques concernés : ingénierie virtuelle et fusion des données (approche holistique), simulation des flux (produits, outils et outillages, instruments de mesure et de contrôle, consommables), numérisation 3D, scanning de scènes, numérisation d'objets volumineux par drone, surveillance et contrôle spatial par robot terrestre ou drone.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Découverte précoce des déficiences au niveau virtuel : les opérateurs procèdent à une simulation des résultats avant que les processus physiques et les produits ne soient développés.
- Évaluation des capacités actuelles et futures d'un système tout au long de son cycle de vie.
- Optimisation du fonctionnement, de la fabrication, des inspections des équipements ou du bâtiment.
- Amélioration continue des designs et des modèles grâce aux données collectées.
- Simulation virtuelle de scénarios (déplacement de machines, adaptation de la ligne pour produire une nouvelle gamme de produits) permettant une réduction des temps d'arrêt des lignes de production ou permettant de raccourcir la durée de la phase de montée en puissance de la production d'un nouveau produit.

Sur le plan technologique

- Récupération des maquettes numériques issues de la conception-construction (le DOE – *design of experiments numeric*) pour optimiser le maintien opérationnel du site ou de l'équipement.
- Interrogation et maintien à jour de la maquette numérique pour anticiper, budgétiser et planifier les travaux et adaptations nécessaires au bon fonctionnement de l'usine tout au long du cycle de vie.
- Intégration de la documentation (fiche technique des équipements, des matériaux...).
- Simulation des redistributions d'espace dont les usages pourraient être modifiés.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Travail collaboratif de construction et mise à jour de la maquette numérique : revue de projet à la fois plus rapide et plus efficace en vue de nouveaux investissements ou d'une adaptation du site.
- Modélisation et simulation tout au long du cycle de vie d'une infrastructure, rapprochement des acteurs, coproduction et mise à disposition des données pour les systèmes intelligents, objets connectés, interfaces et applications en mobilité, virtualisation sont autant de sujets qui dessinent les contours des nouveaux modèles économiques.

FICHE 40

MAQUETTE NUMÉRIQUE DE L'USINE

Sur le plan environnemental, sociétal

- Fluidification de la transmission d'informations et meilleure compréhension de l'environnement de travail à tous les niveaux de la chaîne de gestion de l'usine.
- Meilleures compréhensions des consommations énergétiques et prises de décisions en faveur d'une usine durable.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Le *machine learning*, l'intelligence artificielle, les simulations avancées à partir de données du monde réel et la modélisation 3D élargissent considérablement les avantages des jumeaux numériques d'usines notamment dans les industries disposant d'actifs à haute valeur ajoutée ou critiques.

Au niveau numérique

- Appropriation des logiciels d'usines numériques et implication de l'ensemble des différents services sur la compréhension et l'interprétation des données.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- La transformation digitale de la construction engendre de nouveaux modes de conception, de réalisation, d'exploitation puis d'expérience des ouvrages et infrastructures autour de l'usage partagé des maquettes numériques.
- Sensibilisation aux aspects « multiusage » ou « multiéchelle » (de l'ensemble des usines et de la chaîne d'approvisionnement à un outil d'une ligne de production) de la maquette numérique.

Les questions à se poser

- Horizon de déploiement des jumeaux numériques dans les entreprises manufacturières : le cabinet ABI Research estime que 54 % des acteurs auront implémenté cette technologie d'ici à 2026 pour des applications en maintenance prédictive.
- Démocratiser la maquette numérique à la fois au sein des PME et ETI du BTP et des donneurs d'ordre.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 48

OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE, MAINTENANCE PRÉDICTIVE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'avènement de l'Internet des objets et du big data permet aujourd'hui d'obtenir en temps réel les informations relatives au comportement des produits, ainsi que celles liées à leur utilisation (HUMS—*Health and Usage Monitoring System*).

Cette approche consiste à collecter et à analyser les données d'un équipement afin d'optimiser la maintenance de celui-ci (reconfiguration dynamique des calendriers de visites ou de remplacement d'organes). La maintenance prédictive va plus loin que la maintenance curative, qui consiste à réparer une fois la panne survenue, ou que la préventive, qui consiste à planifier des interventions de maintenance d'après des statistiques d'évènements.

- Les données récupérées se doivent d'être pertinentes et être le plus en accord avec les caractéristiques fondamentales de la donnée big data, les «5V» :
 - > **volume**: il faut tout d'abord atteindre une certaine masse de données pour pouvoir en déduire des résultats ;
 - > **vélocité**: il est aussi impératif de collecter et de traiter ces data en temps réel ;
 - > **variété**: la typologie des données récoltées peut être très hétérogène (textes, images...) ;
 - > **véracité**: la data doit aussi être fiable ;
 - > **valeur** : enfin, l'ère du big data va amener une quantité de plus en plus importante de données. Il est donc important d'être capable de se concentrer sur les données ayant une réelle valeur.

La maintenance prédictive devient un véritable outil de pilotage de la performance des produits, équipements productifs et organisations, rebouclant sur leur reconception ou leur redéfinition.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Une priorisation des opérations de maintenance facilitée grâce à l'analyse prédictive et aux solutions éditeurs.
- Une réduction des frais de maintenance permise par une planification des interventions en heures creuses.
- Anticiper une panne, maîtriser l'arrêt des machines, augmenter leur durée de vie, diminuer les stocks de pièces de rechange.
- Un ROI qui se situe entre deux et trois ans selon les industriels interrogés.

Sur le plan technologique

- Utilisation de l'Internet des Objets et des dernières avancées algorithmiques en temps réel, permettant de connaître parfaitement les conditions d'utilisation des produits. La maintenance, la conception et les choix de procédés de fabrication sont directement impactés.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Permet de maîtriser parfaitement la qualité d'un produit sur tout son cycle de vie et ainsi contribuer à disposer d'une excellente réputation.

Sur le plan environnemental, sociétal

- La maintenance prédictive permet d'augmenter la durée de vie des produits. Il s'agit ainsi d'un véritable enjeu en termes de RSE.

FICHE 48

OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE, MAINTENANCE PRÉDICTIVE

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- Disposer des compétences et des moyens mécatroniques et informatiques nécessaires à la mise en place de la maintenance prédictive.
- Maîtriser le changement important dans la vision du produit. C'est l'usage réel qui prévaut sur celui prévu.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

L'aboutissement d'une intégration du big data dans le but d'une maintenance prédictive se fait à l'issue d'une réflexion poussée et d'un processus complexe. Il s'agit de saisir les mécanismes survenant au moment des pannes, et ainsi d'établir une « signature » du phénomène. Pour cela, une

étroite collaboration est nécessaire entre les experts du terrain et les experts de la donnée :

- les *data scientists*, chargés de développer des algorithmes de prédiction des pannes doivent s'appuyer sur le savoir-faire des ingénieurs métiers et des techniciens de maintenance :
 - > un data scientist seul aura du mal à arriver à des résultats probants sans opérateur sur place pour l'orienter dans les phases exploratoires ;
- former des coordinateurs de travaux afin qu'ils communiquent avec les data scientists.

Les questions à se poser

- Il ne faut pas être trop ambitieux dès le départ, est-ce que notre maintenance est déjà d'un niveau acceptable ?
- Pour passer à la maintenance prédictive, il faut avant tout connecter ses machines à un système de collecte des données. Cela prend du temps. La difficulté tient au fait que le système n'est pas toujours à même de comprendre les langages des différentes machines.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE X07

LES DÉMARCHES ET OUTILS LEAN

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le lean est un levier d'innovation organisationnelle et managériale. À l'émergence du lean manufacturing, modélisé par le MIT dans les années 80, celui-ci est un levier d'innovation incrémentale avec l'élimination des gaspillages, l'application d'outils dits lean au sein des processus de l'entreprise en vue de leur optimisation en terme de délai, qualité, coût. Les apports du lean qui en découlent sont généralement une réduction des temps de traversée du produit ou de service ainsi qu'une meilleure qualité, une meilleure maîtrise des coûts et une plus grande réactivité. Le lean manufacturing peinant à pérenniser les résultats obtenus a évolué vers le lean management, un levier d'innovation organisationnelle et managériale qui change le regard sur la quête de performance : celle-ci s'active par une innovation en rupture avec le modèle managérial traditionnel. Le système lean déployé s'attache plus à la création et au développement de l'intelligence collective : le travail en équipe, la responsabilisation et l'autonomie de celles-ci en partageant la vision, le sens de l'entreprise. Et permet ainsi de libérer des potentiels dans la durée.

Le lean management s'avère être un véritable atout pour réaliser l'usine du futur :

- en favorisant la mise en œuvre de technologies process/ procédés sélectionnés avec raison (exemple : robotisation/ automatisation, management visuel digital) ;
- en maximisant la valeur ajoutée apportée (exemple : développement de nouveaux produits/services à *time to market* compétitif) ;
- en accompagnant l'homme, les équipes dans la transformation perpétuelle de l'entreprise.

Principales applications de ces technologies :

Le lean s'intéresse à la satisfaction totale du client par l'optimisation continue de l'offre que réalise l'entreprise. Donc, toute activité est concernée !

- Dynamique historique au sein de l'industrie : automobile

avec une approche lean manufacturing puis tout type d'activité industrielle. À souligner que des approches lean par filière deviennent fréquentes dans l'automobile et l'aéronautique.

- Puis, pour ne citer que quelques autres secteurs : finances, grande distribution, médical, BTP, artisanat, immobilier, agriculture, militaire, transports, administration...
- De la TPE au groupe, de la production unitaire à la grande série, de la production au service, du service commercial au service logistique. Du *make-to-order* au *make-to-stock* : toute typologie rencontrée a aujourd'hui une référence ayant franchi le cap lean.

Principaux segments technologiques concernés : management visuel, routines de management, résolution de problèmes, polyvalence, formation de formateurs, outils du lean (VSM, 5S, A3,..).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Créateur d'efficience globale pour l'entreprise.
- Soutien à la compétitivité et à la croissance de l'entreprise : captation de nouveaux marchés, amélioration des marges, excellence opérationnelle.
- Efficience de l'entreprise étendue dans le cas d'une supply chain lean.

Sur le plan technologique et méthodologique

- Management visuel : système d'alerte au plus proche de là où la décision peut se prendre.
- Amélioration de la capacité de l'entreprise à traiter ses problèmes (qualité, sécurité, coûts..).

Sur le plan environnemental, sociétal

- Définition d'une vision, de valeurs, d'une stratégie, d'objectifs déclinés simples et partagés de tous.

FICHE X07

LES DÉMARCHES ET OUTILS LEAN

- Amélioration des conditions de travail.
- Éco-efficience.
- Responsabilisation et autonomie.
- Management plus coopératif pour une implication de tous, vers le modèle du leader coach.
- Amélioration du fonctionnement global de l'entreprise/ amélioration de l'image de l'entreprise, de son attractivité client et aussi des talents.
- Mise en œuvre d'un système de résolution de problèmes performant : définition des niveaux de décision et les déclencheurs rapides de transfert au niveau supérieur en cas de blocage de la résolution de problème de type PDCA.
- L'appui d'experts externes en conseil et formation selon le besoin, ainsi que le benchmark d'entreprises (*via des Gemba Walk, visites industrielles, agent du changement en temps partagé...*).
- Transmission des compétences lean de l'agent du changement aux managers pour assurer la robustesse de la démarche dans le temps.

▶ LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique, méthodologique et des compétences à mobiliser

- Déclinaison de la stratégie en axes opérationnels que la démarche lean va soutenir.
- Pilotage de la démarche et engagement actif de l'encadrement.
- La nomination d'un agent du changement reconnu pour ses *soft skills*, capacité d'animation et de pédagogie notamment. La connaissance des *hard skills* lean étant bien sûr un atout.
- Mise en œuvre d'un organe de communication performant : système de routines managériales permettant la communication bidirectionnelle selon l'organisation considérée (matricielle, hiérarchique, processus...).

Les questions à se poser

- Le retard de déploiement du lean management en France.
- Le lean manufacturing et le rapport à la santé au travail.
- Modèles d'innovation organisationnelle émergents : après le lean, l'entreprise apprenante ?
- Le lean et l'entreprise étendue.
- L'avenir du lean dans l'ère de personnalisation de masse et du digital.

▶ MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

DIGITALISATION DE LA RELATION CLIENT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le digital transforme la relation de l'entreprise avec ses clients. Omniprésente, multi canal et de toujours plus en temps réel, cette relation est porteuse de valeur. La relation client s'enrichit et se complexifie à la fois : sa digitalisation doit permettre de répondre au mieux aux mutations (dématérialisation du parcours d'achat, partage d'informations sur les réseaux...), d'apporter une valeur ajoutée (développement de services...) et de se différencier sur le marché. Pour accompagner la relation client et mieux la comprendre, la digitalisation nécessite non seulement de capter de l'information mais surtout d'en fournir tout au long du processus qui mixe contacts physiques et virtuels.

La digitalisation offre de nombreuses opportunités pour mieux connaître la clientèle et interagir avec elle :

- Outils digitaux variés pour promouvoir ses produits, contribuer à l'émergence de nouveaux services tout en cherchant à développer des relations plus directes et personnalisées avec les clients : site Internet interactif, médias sociaux, forums, blogs... En partageant ses opinions et son engagement vis-à-vis du produit sur les réseaux sociaux et en commentant en direct ses achats en ligne, le client fait partie intégrante de la chaîne de production.
- Enrichissement de la connaissance client en intégrant l'historique de toutes les interactions online (outils interactifs, objets communicants...) et offline (CRM, cloud, *marketing automation*...) et le rendant accessible à tous les services de l'entreprise.

Le lien entre les entreprises et leurs clients connaît ainsi des transformations majeures :

- Devenir une marque relationnelle implique un niveau d'écoute, de service et de réactivité maximum sur tous les canaux d'interaction tout en valorisant la proximité relationnelle.
- Pour adapter leurs communications à ces attentes, les entreprises opèrent une mutation de leur organisation interne, qui touche aussi bien la qualification des métiers que la répartition des savoir-faire.

Mais la digitalisation de la relation client se heurte à une difficulté majeure : convaincre l'ensemble des métiers qu'ils doivent constamment mettre à jour et mutualiser en temps réel les informations. Cette dynamique implique une remise en cause profonde des modèles d'organisation traditionnels.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Augmenter la visibilité de l'entreprise sur son marché et donc l'accès aux nouveaux clients.
- Gagner en crédibilité vis-à-vis du client et donc renforcer l'engagement de celui-ci vis-à-vis de l'entreprise (moindre taux d'attrition).

Sur le plan technologique

- Transformer le big data en smart data en récoltant de grandes quantités de données sur le cycle de vie des clients, en donnant du sens aux données pour les utiliser à des fins stratégiques et en passant d'une logique de volume à une logique de ciblage (personnalisation).
- Intégrer un logiciel GRC (gestion relation client) ou une *data management platform* (DPM) pour :
 - > gérer de façon structurée, centralisée et harmonisée l'ensemble des informations ;
 - > structurer un catalogue produits et services ;
 - > organiser les différents métiers et enrichir la base de données à chaque nouvelle interaction avec le client.
- Synchroniser le logiciel de gestion de la relation client avec tous les canaux digitaux.
- Intégrer des systèmes d'analyse prédictive pour permettre d'anticiper les comportements d'achat (marketing automation).
- Utiliser l'intelligence artificielle pour générer des messages ciblés (chat, chatbots ...).

FICHE 18

DIGITALISATION DE LA RELATION CLIENT

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Intégrer la culture digitale au sein de tous les services de l'entreprise :
 - > s'affranchir de la segmentation traditionnelle entre services ;
 - > repenser l'ensemble de leurs process et modes de gestion ;
 - > mutualiser les informations des différents métiers.
- Développer une capacité d'exploitation de la connaissance du client, de communication sur les valeurs qu'incarnent leurs marques et de proposition d'une expérience client enrichie.
- Se focaliser sur les processus de gestion du client aux différents stades de son cycle de vie, de l'acquisition jusqu'à la fidélisation.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Renforcer les liens et les axes de communication entre l'entreprise, sa structure interne et son écosystème externe.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique et numérique**

- Protéger les données et informations personnelles des clients/consommateurs.
- Accepter l'implication du client dans l'entreprise : travail collaboratif.
- Intégrer les nouveaux métiers du big data : data scientists, data analytics...

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Mobiliser et fédérer l'ensemble des services et métiers de l'entreprise autour d'une vision unique au service des clients.
- Accorder davantage de temps à l'écoute des clients-consommateurs et aux réponses apportées.
- Développer les compétences digitales (collecte, traitement et analyse des données, IA...) et relationnelles des collaborateurs.

Les questions à se poser

- Comment construire une profonde culture du numérique et de la relation client au sein de l'entreprise, entre les différents services et expertises métiers, au bénéfice d'un renforcement du lien de proximité avec les clients et l'écosystème externe à l'entreprise ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 19

DIGITALISATION DE LA SUPPLY CHAIN

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Les enjeux de la digitalisation de la supply chain sont nombreux, le plus important étant de décloisonner les frontières entre les différents services de l'entreprise, afin de faciliter la construction d'un plan commun et de proposer de nouvelles expériences aux clients. Tous les acteurs (supply, production, logistique, marketing, finance) auront ainsi une visibilité améliorée de la chaîne logistique globale ce qui leur permettra d'optimiser leurs processus, réduire les coûts, gérer les stocks, servir l'omni-canalité et, finalement, améliorer les marges et augmenter les parts de marché. Cette digitalisation doit consentir d'orchestrer la supply chain en temps réel, ou tout du moins de tendre vers cette unité de mesure du temps d'approvisionnement.

S'il s'agit bien sûr d'une révolution numérique, la transformation digitale est d'abord culturelle. Au-delà des outils qui, de manière inéluctable, arrivent dans les usines, les entrepôts et chez les transporteurs, une transition technologique réussie semble passer par la prise en compte de projets menés conjointement et impliquant tous les acteurs concernés.

L'environnement collaboratif est décrit par les experts comme une des clés du succès. Il permet à chacun d'apporter sa pierre à l'édifice par l'apport d'informations en temps réel, par une meilleure lisibilité, mais aussi un gain de sécurité, ce que demandent aujourd'hui les équipes en place. L'évolution technologique consiste alors à mettre davantage en relation les parties prenantes avec la société (acteurs du transport, fournisseurs...), dans un objectif de normalisation des échanges pour qu'ils soient simplifiés et utilisables facilement et avec plus de pertinence au quotidien.

La démarche consiste également à mettre à profit la quantité phénoménale de données collectées par les outils des différentes parties prenantes (sociétés de transport, services des douanes...) en les restituant et en les analysant, car ces dernières constituent une excellente base pour faire évoluer les procédures logistiques et de transport. L'idée est de faire

en sorte que les différents acteurs renseignent l'ensemble de la chaîne de valeur avec les données disponibles, permettant ainsi de prendre les bonnes décisions d'investissement et de planification de toute la chaîne logistique.

De plus, avec la complexité des réglementations du commerce international, les outils informatiques apportent aux entreprises une traçabilité améliorée, une meilleure sécurité des écritures, ainsi qu'un moyen de communication simplifié avec les plateformes de gestion commerciale.

On peut résumer le processus de planification de la chaîne logistique globale en trois étapes.

- La première consiste à analyser le passé pour comprendre le présent et tenter de prévoir le futur en déduisant des scénarios pertinents de la demande.
- La seconde étape va planifier les ressources humaines et matérielles afin de satisfaire au mieux les différents scénarios de demande retenus.
- La troisième étape va appliquer ces plans en temps réel, en prodiguant des éléments pour éventuellement les revoir et/ou corriger les modèles de demande.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Amélioration des résultats de l'entreprise en réduisant le gap entre les plans planifiés, émanant de la stratégie de l'entreprise, et leur exécution.
- Détermination des meilleurs potentiels de vente, élimination des pénuries, optimisation et planification des flux logistiques, anticipation de l'activité humaine.

Sur le plan technologique

- Simulation de plusieurs scénarios afin d'anticiper la demande et de planifier d'une façon optimale et robuste les différentes ressources disponibles.
- Travail sur des volumes de données extraordinaires, prise

FICHE 19

DIGITALISATION DE LA SUPPLY CHAIN

en compte de données exogènes (météo, tendances des réseaux sociaux, etc.), et mesure d'impact de chaque caractéristique produit sur sa courbe de vente (prix, composition, niveau d'exposition, etc.).

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- La digitalisation permet de décloisonner les frontières entre les différents acteurs de l'entreprise et de faciliter leur interaction.
- La digitalisation stimule également l'automatisation des tâches et l'optimisation du flux documentaire pour, au final, accélérer le flux logistique global. Mais la digitalisation ne se limite pas à dématérialiser et automatiser des processus documentaires.
- Les entreprises qui s'équipent avec des systèmes d'information capables de collecter ces données, et de les traiter pour les rendre exploitables sous forme de tableau de bord, gagneront un avantage compétitif puissant en termes de business intelligence.

Sur le plan environnemental, sociétal

La combinaison des expertises métier et des outils d'optimisation et de prévision nouvelle génération améliore la performance globale, en facilitant l'anticipation et la décision, mais aussi en permettant de gérer plus facilement les cas particuliers ou exceptions du schéma logistique global. L'impact socio-environnemental est ainsi réel.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Des solutions permettant de centraliser les données facilement et rapidement en faisant évoluer régulièrement les cas d'usage associés.
- Un système de gestion de contenus d'entreprise.
- Une brique opérationnelle et transactionnelle fédérant toutes les données de tous les silos pour disposer non seulement d'une vue consolidée mais aussi d'une capacité d'action pour servir les applications existantes et celles à venir.
- Une plateforme de planification intégrée permettant d'aligner les objectifs stratégiques de l'entreprise et de réduire le gap entre les décisions de planification et les opérations.

Au niveau numérique

- Modélisation mathématique et optimisation (avec les outils de la recherche opérationnelle) de la chaîne logistique globale.
- Compilation et analyse des données générées par les produits, associées aux informations sur les clients et aux données agrégées stockées sur les systèmes pouvant être utilisés pour le support et les opérations, pour créer de nouveaux services, optimiser la compétitivité et renforcer la satisfaction des clients.

FICHE 19

DIGITALISATION DE LA SUPPLY CHAIN

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Équipes de spécialistes de l'analyse de la donnée, de la modélisation statistique, et de l'optimisation et la recherche opérationnelle.
- Profils de chief data officers ou encore de master data managers et data scientists pour organiser une meilleure gouvernance et exploitation de leurs données.
 - > Le *chief data officer* (CDO) assure la conciliation des données de référentiel, avec celles des ventes et celles des fournisseurs, tout en incluant les données relatives aux clients.
 - > Le CDO œuvre pour rendre la donnée interopérable à tous les services de l'enseigne et fait apparaître à chacun les opportunités masquées.

> Le CDO fait en sorte que les données soient mieux exploitées pour en tirer les meilleures décisions en lien avec la stratégie de l'entreprise.

- Intégrer les talents adéquats pour faire évoluer les missions traditionnelles tout en préservant l'expérience des équipes métiers.

Les questions à se poser

- Quels sont les cas d'usage ?
- Quelles expérimentations à périmètre raisonnable et forte valeur ajoutée puis-je mettre en place ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 26

FIN DE VIE DU PRODUIT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Chaque produit suit un cycle de vie, de l'extraction des matières premières, en passant par sa fabrication, jusqu'à sa destruction ou son recyclage. À chacune des étapes, il y a des impacts sur l'environnement (épuiement des ressources, pollution de l'air, de l'eau et des sols, émissions de gaz à effet de serre...). La gestion de la fin de vie du produit consiste en la planification et l'exécution des opérations de retrait du marché en optimisant l'impact environnemental et économique. Ceci peut passer par le désassemblage, le recyclage (déchets, matières premières...) ou la déconstruction.

Le modèle de production et de consommation linéaire (extraire, produire, consommer, jeter) est à l'origine de forts impacts environnementaux. L'allongement de la durée de vie des produits s'inscrit comme l'une des pistes visant à réduire leur impact sur l'environnement, tout comme la mise en place d'une gestion efficace de leur fin de vie.

En particulier, le recyclage constitue à la fois un mode de traitement de déchets et un mode de production de ressources. Il intervient en troisième position après la prévention et le réemploi dans la hiérarchie des modes de traitement.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Le fait de prévoir la fin de vie du produit lors de sa conception peut fournir un avantage certain lorsqu'il faut se départager de la concurrence.

La mise en place de filières de récupération peut amener à des économies importantes au niveau de l'approvisionnement des matières premières, notamment lorsqu'elles deviennent rares.

Le véritable coût de revient d'un produit doit tenir compte de toutes les charges directes et indirectes de toutes les phases du cycle de vie. C'est le coût global de possession ou le coût de cycle de vie.

Sur le plan technologique

Les produits doivent être conçus de manière à pouvoir être démontés facilement, pour la réutilisation, le recyclage, ou la possibilité de se transformer en énergie utilisable.

Sur le plan environnemental, sociétal

La gestion de fin de vie du produit est l'une des briques fondamentales de l'économie circulaire.

Deux types de recyclage peuvent être distingués :

- Le recyclage en boucle fermée
Utilisation des produits en fin de vie pour un usage et une destination identiques sans perte fonctionnelle de la matière. Ex : recyclage d'une bouteille PET en bouteille PET, recyclage du verre d'emballage en verre d'emballage, recyclage d'enrobés routiers dans la fabrication de nouveaux enrobés, etc.
- Le recyclage en boucle ouverte
Utilisation de la matière de recyclage pour une destination différente, mais en substitution d'une matière première vierge : recyclage d'une bouteille PET en fibre polaire, recyclage du papier en produit d'isolation, etc.

Dans tous les cas, le but est de réduire le prélèvement de matières dans la nature, certaines devenant en plus d'une grande rareté.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

Au sein du processus de fin de vie des produits, chaque étape du cycle peut influencer, de manière variable, les étapes de la collecte des déchets jusqu'à la production de biens. L'écoconception permet d'agir sur les paramètres suivants :

- l'incorporation de matières premières de recyclage (MPR), la conception en vue du désassemblage ou en vue du recyclage, le calcul du taux de recyclabilité ;

FICHE 26

FIN DE VIE DU PRODUIT

- la collecte, qui détermine le niveau de mobilisation des gisements de déchets et produits usagés destinés au recyclage ;
- le démantèlement (démontage et dépollution), le tri (identification, extraction, et/ou la séparation des matières) et la préparation (déchetage, broyage...) des déchets et des matières qui en sont issues, qui permet d'augmenter et régulariser les flux. À ce stade, l'enjeu est d'optimiser la qualité des MPR tout en diminuant la quantité des résidus ultimes non valorisés ;
- la transformation et la mise en œuvre des matières issues de déchets, qui permet l'augmentation de l'intégration des MPR dans des domaines d'application existants ou nouveaux.

Au niveau numérique

Les nouveaux outils du numérique permettent de digitaliser la collecte et le traitement des déchets, afin d'en optimiser la gestion et la traçabilité. Il est également possible de mettre en relation directe les producteurs de déchets et les acteurs à même d'accompagner la fin de vie des produits.

► MATURETÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

L'entreprise doit monter en compétences à plusieurs niveaux :

- connaissance du tissu industriel local et régional pour définir un partenariat possible dans l'objectif de l'économie circulaire (j'utilise les déchets des autres et je mets à disposition les miens) ;
- connaissance des procédés utilisables pour faciliter le démantèlement ou le démontage à des fins de triage/recyclage ;
- montée en compétences sur les matériaux et leurs traitements possibles en fin d'utilisation dans un produit ;
- connaissance des filières de retraitement existantes.

Les questions à se poser

- La prise en compte de la question de fin de vie des produits dès leur conception doit amener l'entreprise à questionner les schémas de production et d'approvisionnement établis afin de développer une économie circulaire autour de la valorisation de déchets.

FICHE 2

ADAPTATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

► DESCRIPTIF / DÉFINITION

L'industrie constate une baisse de sa consommation énergétique, résultant des actions significatives d'amélioration de leur performance énergétique au cours des dernières années. Si certaines offres concernent entièrement l'efficacité énergétique (comme les systèmes de management de l'énergie et les audits énergétiques), les investissements actuels émergent plutôt en tant que complément d'un investissement réalisé pour d'autres raisons (comme le renouvellement, la maintenance des équipements ou la mise aux normes, etc.) étant ainsi ponctuels et s'inscrivant autour d'un plan d'action déterminé. En revanche, le marché du carbone et la lutte contre les changements climatiques gagnant chaque jour plus de terrain, la réduction des émissions gaz à effet de serre et l'efficacité énergétique semblent être des vecteurs d'innovation. Le gaz et l'électricité y sont aujourd'hui les énergies les plus consommées (les 2/3 à elles deux).

Les cinq filières les plus consommatrices d'énergie en France sont les suivantes (85 % de la consommation totale) :

- l'industrie du papier et carton ;
- l'industrie agro-alimentaire ;
- l'industrie du caoutchouc, plastique, et autres produits minéraux non métalliques ;
- la métallurgie ;
- l'industrie chimique.

Parmi les usages d'électricité, ce sont les moteurs qui consomment les 2/3 de l'électricité totale du secteur (ventilation, air comprimé, pompage, etc.). Les principales technologies émergentes sont les suivantes :

- monitoring énergétique-capteurs ;
- logiciels-algorithmes d'analyse de la performance énergétique ;

- logiciels-algorithmes basés sur l'intelligence artificielle pour la régulation du fonctionnement des systèmes énergétiques ;
- capteurs et logiciels pour connecter les machines vieillissantes et/ou digitalement isolées ;
- systèmes de stockage et d'énergie – *Power to gas, power to pressure head...*

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Réduction des coûts d'approvisionnement en énergie.
- Économies liées à la réduction des charges et du gaspillage d'énergie.
- Augmentation des chances d'attirer des investisseurs/accès aux financements.

Sur le plan technologique

- Autonomie augmentée des processus consommateurs d'énergies fossiles.
- Gain par l'utilisation intelligente d'un mix énergétique, dont les renouvelables, grâce aux smartgrids intégrés couplés à des technologies de stockage performantes.
- Récupération de l'énergie fatale par des système de type ORC.
- Détection automatique et prévention des fuites de fluide et d'électricité.
- Gain par récupération d'énergie (chaleur, cinétique..) et stockage ou réinjection dans le réseau.
- Optimisation du dimensionnement des équipements et des besoins énergétiques en amont (par exemple, éviter le surdimensionnement des systèmes consommateurs d'énergie, adapter le besoin en énergie à la demande utile).
- Raisonner système plutôt que composant.

FICHE 2

ADAPTATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Sur le plan numérique

- Surveillance par la mise au point d'algorithmes de suivi du comportement des procédés et analyse comparative des données entre sites (approche du big data).
- Connectivité totale des processus dans le réseau informatique de l'entreprise pour la surveillance et l'intervention à distance et la constitution d'un profil énergétique.
- Compatibilité de fonctionnement des smartgrids locaux avec la gestion centrale de l'entreprise, permettant de consolider toutes les consommations et productions d'énergie.
- Mesure de la performance énergétique et management et contrôle en temps réel de l'énergie.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Amélioration de la compétitivité de l'entreprise.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Amélioration de l'image de l'entreprise – lutte contre les changements climatiques, réduction de l'empreinte carbone.

▶ LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Des technologies digitales plus efficaces et moins énergivores.
- Insérer de l'intelligence dans les réseaux de distribution pour piloter les équilibres offre-demande en temps réel.
- Créer des systèmes autonomes pour la collecte et l'analyse du big data.

Au niveau numérique

- Se baser sur les logiciels dédiés à la mesure de l'énergie consommée, optimiser les consommations, gérer les alertes.
- Utiliser la base big data pour mettre en place des outils numériques de régulation et d'anticipation de la consommation énergétique basés sur du *machine learning* et du *deep learning*.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Sensibiliser les collaborateurs à tous les niveaux.
- Capacités analytiques – big data.
- Adapter la démarche d'efficacité énergétique selon la source d'énergie considérée.

Les questions à se poser

- Consolidation d'un marché de carbone et taxation des émissions par les industriels.
- Évolution de l'offre EnR pour envisager des investissements dans une solution de stockage.

▶ MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 20

ÉCOCONCEPTION

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Démarche créative, source d'innovation et de différenciation, l'écoconception constitue une approche positive de l'environnement et un levier de création de valeur. C'est à la fois une approche préventive des problèmes d'environnement et une démarche centrée sur le produit qui peut être appliquée dans tous les secteurs de l'économie. Elle est aujourd'hui mise en œuvre à des degrés divers et avec une grande variété d'outils dans de très nombreux secteurs comme l'électronique, l'automobile, l'aéronautique, les produits d'équipement et la plupart des produits de grande consommation.

Elle se caractérise par une vision globale de ces impacts environnementaux : c'est une approche multiétape (prenant en compte les diverses étapes du cycle de vie) et multicritère (prenant en compte les consommations de matière et d'énergie, les rejets dans les milieux naturels, les effets sur le climat et la biodiversité).

L'écoconception est pilotée par une entreprise ou un organisme public, mais elle implique un grand nombre d'acteurs tout au long de la chaîne de valeur du produit et même au-delà, en incluant les consommateurs ou utilisateurs et jusqu'aux récupérateurs et recycleurs. Sa richesse tient dans l'examen des relations qui existent entre les choix de conception relatifs à un produit et les flux de matière et d'énergie qui en résultent tout au long de son cycle de vie.

La démarche se décompose en :

- une évaluation environnementale multicritère sur le cycle de vie du produit ;
- une identification des principaux impacts environnementaux pertinents dans le contexte d'étude ;
- une identification des leviers d'actions techniques et/ou organisationnelles, pour améliorer un produit à plus haute performance environnementale, en maintenant

les fonctions-services et performances du produit. Cette démarche aborde des composantes de business, d'innovation, de réglementation et de communication.

L'écoconception est pratiquée par des grandes entreprises, des PME et des TPE, des organisations professionnelles ou des centres techniques, qui la déploient seuls ou avec l'aide de consultants spécialisés. Cette pratique est très liée à l'évaluation environnementale de type analyse de cycle de vie. Elle nécessite au préalable une bonne compréhension des concepts. Il est cependant possible de faire de l'écoconception sans réaliser une étude d'analyse de cycle de vie avec des approches d'analyse entrant-sortant ou des analyses des flux de matières ou d'énergie. L'écoconception se trouve également à la base de divers outils publics ou privés, comme les écolabels et les politiques de verdissement des achats.

L'écoconception s'inscrit comme un des outils du management environnemental (ISO 14000). Elle est guidée par un standard normatif, l'ISO 14062 (théorie et pratique de l'écoconception) qui est un guide de mise en œuvre de la démarche. L'évaluation environnementale, au sens de l'analyse du cycle de vie, relève d'un standard strict (ISO 14040) bien que les méthodes de calculs, les règles d'allocations ou les données élémentaires soient encore l'objet de questionnements scientifiques et techniques.

Les réglementations sont des leviers pour faire évoluer les produits, leurs usages, voire leur traitement en fin de vie. Par exemple, la réglementation sur l'efficacité énergétique des produits et équipements s'établit au niveau européen en application de deux directives-cadres. La première est relative à l'écoconception des produits et permet de fixer par règlement des exigences de performances minimales pour les produits mis sur le marché, et ainsi d'interdire les produits les moins efficaces. La seconde est relative à l'étiquetage énergétique des produits. Des réglementations sur la responsabilité étendue des producteurs (REP), ou sur les interdictions d'utilisations de substances (REACH ou ROHS), s'inscrivent dans les approches d'économies circulaires.

FICHE 20

ÉCOCONCEPTION

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- L'écoconception est avant tout une démarche d'arbitrage entre des objectifs parfois contradictoires avec une vision sur l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits : qualité, coûts, délais, sécurité, environnement.
- Les premiers pas de l'écoconception sont souvent faciles et peu coûteux à mettre en œuvre. Ils peuvent coïncider avec des options de bon sens qui amènent une réduction des coûts : économies de matière (par allègement) ou d'énergie consommée, optimisation de la chaîne logistique (taux de remplissage des camions, chaîne du froid), moindres quantités de déchets à traiter.
- L'écoconception permet d'identifier de nouveaux axes de création de valeur pour ses produits et offre un triple bénéfice au dirigeant d'une entreprise :
 - > (patrimoine) en augmentant la valeur de sa société (résultats, images) ;
 - > (client) en répondant davantage à ses attentes et en proposant des produits innovants ;
 - > (valeur éthique) en intégrant les notions de responsabilité sociétale de l'entreprise.
- La recherche avec ses clients et ses fournisseurs de solutions communes répondant aux problématiques d'élimination des déchets de la filière est source d'innovation au service de l'économie circulaire. De nouvelles solutions émergent, ainsi que des business models.
- L'écoconception s'inscrit dans une démarche de réduction de la consommation de matériaux ou d'énergie (avec un gain économique direct) produits dans son usage, mais aussi des étapes de fabrication, supply chain ou fin de vie.
- L'écoconception peut amener à des propositions de services ou de systèmes produits services qui modifient les organisations, les parties prenantes et les chaînes de valeurs.

Sur le plan technologique

- La veille réglementaire et l'anticipation des restrictions d'utilisation de certaines substances stimule un programme de substitution par la recherche et le développement de nouveaux matériaux (recyclés, biosourcés) ou de nouvelles technologies (moins énergivores, de maintenance plus facile, plus facile à démonter, etc.).
- La recherche de réductions d'impacts environnementaux en phase de fabrication peut, par exemple, conduire à la mutualisation de chaînes de production, à l'utilisation de broyats ou de produits recyclés, apportant ainsi des gains de productivité, etc.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

L'écoconception mobilise la participation de nombreux métiers au sein de l'entreprise : conception, marketing, achats, production, qualité, responsable du développement durable. Elle s'inscrit dans la stratégie d'entreprise en impliquant tous les acteurs, des réflexions stratégiques jusqu'aux solutions et aux implications opérationnelles. Le caractère intéressant et motivant de l'écoconception renforce la synergie entre les équipes au sein de l'entreprise. Une collaboration étroite avec les clients, les fournisseurs et les prestataires permet de recenser les attentes, les tendances et les techniques disponibles.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduire les impacts environnementaux des produits tout au long de leur cycle de vie : extraction des matières premières, production, distribution, utilisation et fin de vie.
- Apport de gains environnementaux qui peuvent concerner la préservation des ressources et de la biodiversité, la prévention des pollutions et des nuisances, l'équilibre du climat, la destination des sols.
- Levier du développement de l'économie circulaire.

FICHE 20

ÉCOCONCEPTION

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Vivre les principales étapes d'un projet technologique justifié par la modification d'un système existant, imaginer et représenter un principe de solution technique à partir d'une démarche de créativité.
- Définir tout ou partie d'un mécanisme, une ou plusieurs pièces associées et anticiper leurs comportements par simulation.
- Découvrir par l'expérimentation les principes des principaux procédés de transformation de la matière, réaliser une pièce par un procédé de prototypage rapide et valider sa définition par son intégration dans un mécanisme.
- Développer des solutions sobres en consommations d'énergies.
- Proposer des produits plus robustes pour des usages plus intenses, ou plus longs, avec des architectures capables d'envisager de la modularité voire de la récupération des composants ou des matériaux en fin de vie.

Au niveau numérique

- Développer des outils numériques plus fonctionnels, plus rapides, consommant moins de ressources, des objets connectés plus robustes, réparables, générant moins de déchets.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

Les compétences requises sont celles d'un personnel de bureau d'études formé à la méthodologie d'écoconception :

- écoconcepteur ou ingénieur écoconception : pour l'heure, ces métiers ne sont pas encore démocratisés. Il en existe pourtant dans tous les secteurs d'activité. Leurs missions : réaliser des études d'impact, analyser les caractéristiques humaines et environnementales du territoire, définir le choix de matériaux et de technologie et élaborer les plans d'exécution du produit;
- écoconcepteur est un métier qui demande une certaine polyvalence et que l'on devrait voir émerger lors des prochaines années. Preuve en est avec les nouvelles formations qui voient le jour;
- l'écoconcepteur peut avoir un lien fort avec les services HSE d'une entreprise et peut avoir une formation initiale relativement variée et ouverte : formations scientifiques de type ingénieur, formations issues des sciences du vivant ou des géosciences.

Les questions à se poser

- Tenir compte de l'ensemble des risques et opportunités liés à la conception d'un produit.
- Se questionner sur sa maturité vis-à-vis des démarches d'écoconception, d'évaluations environnementales, de positionnement vis-à-vis des réglementations ou labels existants.

FICHE 21

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Le contexte mondial d'augmentation de la population et de diminution des ressources et matières premières impose de réfléchir au passage d'une économie linéaire vers une économie circulaire. L'aménagement des territoires doit y contribuer en limitant les approches en silo et en agissant de manière intégrée pour que toutes les ressources du territoire soient mobilisées dans un seul et même objectif : faire de nos territoires et de nos villes des espaces sobres et résolument circulaires.

Dans ce contexte, de nombreux modèles économiques se distinguent par leurs qualités dans la gestion des ressources et se positionnent comme vecteurs d'innovation et facteurs de compétitivité. L'économie circulaire doit valoriser les initiatives émergentes des territoires pour avancer dans une société de moindre impact et ouvrir la voie à une création de valeur qui ne soit pas basée sur la consommation de ressources finies.

En France, l'économie circulaire s'articule autour de sept axes principaux :

- (1) l'écoconception & management environnemental ;
- (2) l'échange de ressources secondaires entre entreprises (l'écologie ou la symbiose industrielle) ;
- (3) l'économie de fonctionnalité peu génératrice de déchets, et plus largement les business modèles innovants ;
- (4) le réemploi ;
- (5) la réparation ;
- (6) la réutilisation ;
- (7) le recyclage.

L'usine est un acteur clé des problématiques environnementales de notre époque. Grâce à l'économie circulaire, elle contribue fortement à la résolution de ces problématiques et s'insère harmonieusement dans la communauté en optimisant l'utilisation des ressources communes ou en créant de l'énergie.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Pour les entreprises, l'économie circulaire constitue indéniablement un levier de compétitivité et une opportunité de développement de nouveaux marchés, notamment dans un contexte de tension sur les approvisionnements en matières premières. La transition vers une économie circulaire peut permettre :

- de réduire les coûts, la réutilisation et le remanufacturing étant des leviers importants de l'économie circulaire.
- de bénéficier d'un approvisionnement durable en réduisant l'impact de l'approvisionnement en matière première et en offrant la possibilité de les remplacer par des matières premières renouvelables ou recyclées.
- de générer de la valeur : le passage de la possession à l'usage est également une opportunité. Elle offre la possibilité de renforcer la relation clients et de les fidéliser.
- d'anticiper des contraintes réglementaires ou économiques futures : de tels enjeux, à la fois économiques et écologiques, ne manqueront pas d'attirer l'attention des régulateurs, ce que les entreprises ont intérêt à anticiper.
- de symboliser l'excellence environnementale : les risques d'images sont suffisamment importants pour le justifier.

Sur le plan technologique

Un modèle ouvert permet d'accélérer cette transformation naissante et de valoriser les boucles les plus intéressantes en les rendant lisibles et intelligibles. Un tel modèle s'appuie sur :

- l'ouverture des données sur le cycle de vie des produits et services ;
- l'accessibilité des codes et plans des produits et services ;
- la documentation des pratiques et des expériences ;
- la publication des résultats.

FICHE 21

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

À terme, l'objectif est de créer des réseaux entre les entreprises pour mutualiser ce qui peut l'être en termes de ressources humaines, de matériel, de mobilité et d'étudier les flux pour que le déchet de l'un devienne ressource pour l'autre. Les industriels créent déjà des business models durables, grâce au remanufacturation, au recyclage et, plus récemment, à l'émergence de pratiques collaboratives. Mais une vision plus globale de la lutte contre le gaspillage démontre que l'économie circulaire a encore un fort potentiel de développement. Parallèlement au partage et au recyclage, d'autres approches liées au produit en tant que service, à l'extension de la durée de vie des produits et à la supply chain circulaire vont transformer les business models de l'industrie. L'enjeu est d'étendre leurs activités au-delà de l'univers de la fabrication aux marges réduites.

Sur le plan environnemental, sociétal

Par les liens qu'elles tissent entre les acteurs des chaînes de valeur, les symbioses visent à optimiser la gestion des ressources sur les territoires. Leur succès repose d'ailleurs sur l'engagement des participants, lequel est fortement influencé par les retombées et leurs bénéfices potentiels ainsi qu'à leur mesure.

Pour les entreprises et les territoires, la quantification des gains aide à la prise de décision. Les mesures de performance sont essentielles, tant pour la reddition de compte aux bailleurs de fonds que pour définir les avenues à privilégier pour assurer la pérennité des symbioses. L'expérience montre

toutefois que cet exercice rencontre plusieurs freins : variété d'acteurs aux intérêts divergents, enjeux de confidentialité, absence de données fiables et d'indicateurs communs, méthodes de calcul non développées, etc.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Un partage des bonnes pratiques technologiques entre les acteurs d'une même filière.
- Le développement de plateformes mutualisées entre les acteurs pour favoriser la coopération inter-entreprises.

Au niveau numérique

- La diffusion d'une culture numérique commune autour de la synchronisation des enjeux et ambitions des entreprises d'une même filière pour l'établissement d'une véritable stratégie de filière.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Développer une sensibilité environnementale et une réelle stratégie commune avec l'ensemble des collaborateurs et des parties prenantes de l'activité.

Les questions à se poser

- Quels moyens mobiliser pour infuser et diffuser une ambition commune autour des problématiques d'économie circulaire ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 22

ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'économie de la fonctionnalité consiste à vendre un usage sous forme de services plutôt que des produits.

C'est une forme de dématérialisation des échanges pour proposer une fonction ou un service, souvent facturé au pro rata de son utilisation, au lieu de vendre un produit ou un équipement.

L'économie de la fonctionnalité permet aux fabricants de se différencier par une offre innovante, d'imposer plus rapidement leurs innovations et de nouvelles fonctionnalités, et de remonter la chaîne de valeur en proposant davantage de services. Par ailleurs, la proximité avec le client est renforcée, entraînant de fait une fidélisation plus grande, dans le cadre d'une démarche qui reste vertueuse d'un point de vue environnemental.

L'économie de la fonctionnalité peut s'appliquer à des domaines extrêmement variés, tant dans l'industrie que dans les biens de consommation. Les industriels sont donc concernés à la fois dans la définition de leur offre (mise au point de nouveaux modèles économiques pour vendre l'usage et non plus l'équipement), mais également en tant que centre de production (recherche auprès de leurs fournisseurs de solutions permettant d'être facturés à l'usage et non plus à la machine).

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Les contrats mis en place doivent être incitatifs pour que l'utilisateur ait un intérêt financier à limiter son usage et donc au final une économie et un bénéfice environnemental.

Sur le plan technologique

- Les innovations portant sur la performance seront également susceptibles d'être plus rapidement intégrées si le coût global de possession est réduit pour un nouvel équipement comparativement à un modèle antérieur moins performant.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Les avantages pour le client :

- Transfert des dépenses Capex en Opex ce qui limite l'endettement et les engagements à long terme.
- Consommation adaptée à son besoin.
- Garantie de résultats et non de moyens, le fabricant reste garant de la qualité de l'offre.
- Meilleure visibilité sur le coût.

Sur le plan environnemental, sociétal

L'un des principaux avantages de l'économie de la fonctionnalité est de réduire l'empreinte environnementale du produit : le concepteur de l'équipement aura intérêt à optimiser à la fois la conception et la maintenance de son équipement pour le faire durer et le rentabiliser sur une plus longue période.

FICHE 22

ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

La digitalisation des processus économiques favorise la transformation des modèles économiques de la possession à l'usage. Cela représente ainsi un véritable catalyseur de l'économie de la fonctionnalité.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Le cadre juridique et financier doit être revu pour s'adapter à l'économie de fonctionnalité, une réforme du droit de la location peut être à envisager. Le mode de financement spécifique doit également être adapté.
- Des mesures économiques et fiscales pourraient être mises en place pour favoriser le développement de l'économie de fonctionnalité.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

► LIENS UTILES

Organisations professionnelles
FIM, PROFLUID

Organisation d'accompagnement

<http://economiedefonctionnalite.fr/>

<http://www.club-economie-fonctionnalite.fr/>

<http://www.inspire-institut.org/category/economie-de-fonctionnalite>

Les questions à se poser

Les éléments de calcul d'une offre doivent prendre en compte les éléments suivants :

- amortissement du prix sur une durée raisonnable ;
- formation de l'utilisateur, responsabilisation de l'utilisateur ;
- service d'assistance téléphonique, coût de remise en état, nettoyage, avant transfert chez un nouveau client.

NOUVELLES RELATIONS ÉCONOMIQUES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Dans un système économique basé essentiellement sur les marges opérationnelles, l'entreprise doit sans cesse renouveler son offre et assurer le financement des investissements technologiques, moteurs indispensables à sa pérennité. Afin de concilier création de valeur et préservation de l'environnement, les modèles d'affaires peuvent être réinterrogés et intégrer des notions telles que :

- l'économie de la fonctionnalité, basée sur l'utilisation du produit plutôt que sur le produit lui-même, en travaillant notamment sur le coût global des biens utilisés :
 - > travailler notamment sur le passage de la production d'un bien à la fourniture d'un service (système de location-maintenance, organisation des étapes de réparation, partage en libre-service...);
- l'innovation dans la stratégie commerciale et le marketing relationnel, centrée sur la qualité de la relation avec le client (marque, réputation, communauté d'utilisateurs) :
 - > tendances de marketing orientées produit avec la fourniture d'un service additionnel au produit (financement, maintenance, reprise en fin de vie), orientées usage au travers de la vente de l'usage et non du produit lui-même (location, leasing, mutualisation et partage) ou encore orientées résultat *via* la garantie par le producteur de la satisfaction des besoins du consommateur sans tenir compte des produits.

Les exemples de réinvention des circuits au détriment des distributeurs se multiplient à l'envie. La logique est à la base de certains modèles économiques à succès. Un mouvement stratégique d'ensemble se dessine à la fois au niveau du marché B2B et du B2C. L'objectif est de préserver un mix entre circuits classiques et nouveaux circuits directs. Elle se nourrit d'une combinaison d'intérêts stratégiques et de la révolution digitale.

Ces nouveaux modèles économiques partagent une grande rapidité dans leur mise en place, une désintermédiation, une déssectorisation, et une bonne e-reputation. Pour la

désintermédiation, le producteur ou le distributeur ne maîtrisent plus le canal de vente aujourd'hui numérique. Désormais, la construction de la confiance s'effectue sur les réseaux sociaux. Ce sont les internautes qui évaluent la qualité des entreprises et leur respect de l'éthique *via* leurs échanges de messages. Une bonne e-réputation est un actif pour l'entreprise quand une campagne de dénigrement peut lui être fatale.

On remarque aussi de nouveaux comportements sociologiques où la satisfaction de l'usage remplace le désir de propriété et où les modes collaboratifs se développent.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Renforcer l'exclusivité de sa proposition de valeur :
 - > acter le fait que les propositions de valeur puissantes et pérennes dépassent le seul produit ;
 - > intégrer les vecteurs de la marque, de la solution d'usage, de l'expérience client dont les codes se délèguent de moins en moins.

Sur le plan technologique

- Maîtriser la connaissance et la donnée client :
 - > les nouvelles techniques d'analyse de la data constituent le levier par excellence du marketing direct pour agir sur la fidélisation, la personnalisation, la promotion de nouveaux produits, l'animation de communautés, etc.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Simplifier la chaîne de valeur pour des filières plus simples et efficaces :
 - > réduction des niveaux d'intermédiation, par des pratiques fluides et par la mise à plat des rôles respectifs des acteurs (fonctions logistiques, de négociation, d'administration des ventes, de services, d'intégration finale...).

FICHE 47

NOUVELLES RELATIONS ÉCONOMIQUES

- Saisir l'opportunité de nouveaux circuits pour permettre une visualisation et une relation plus directes entre le vendeur et l'acheteur.

Sur le plan environnemental, sociétal

Tout projet d'entreprise qui vise à changer son modèle d'affaires vers une économie de la fonctionnalité ou une stratégie commerciale innovante devra être performant d'un point de vue économique et bénéfique d'un point de vue environnemental (pas d'effet rebond ou de transfert de pollution).

- Agir sur le cycle de vie complet :
 - > l'internet des objets bouleverse la gestion du cycle de vie des produits. La vente d'un usage passera de plus en plus par un pilotage à distance, la télémaintenance, la gestion du recyclage, etc. ;
 - > la logique des industriels gagnants passera de plus en plus par la maîtrise directe d'un écosystème sans besoin d'intermédiation.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique et numérique**

- Investir massivement dans la donnée :
 - > la maîtrise de la donnée entre industriels et distributeurs est une course de vitesse. Par la maîtrise de la transaction et des opérations de paiement avec les clients finaux, les distributeurs ont encore une position privilégiée pour analyser et créer de la valeur avec la data.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

Le processus nécessite également de réinterroger les différents métiers et compétences de l'entreprise. Plus la mutation de l'offre de l'entreprise en faveur de l'environnement sera importante, plus l'accompagnement au changement sera nécessaire.

Les questions à se poser

- Réinterroger vos propositions de valeur pour une évolution et une clarification de ces dernières.
- Remonter la chaîne de valeur pour une activité de conception et de maîtrise de l'offre :
 - > assurer une coordination la plus courte possible entre la conception de l'offre et sa commercialisation.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE 61

VALORISATION DES DÉCHETS

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

La valorisation des déchets consiste à réutiliser les déchets (organiques ou matériels) en vue d'en faire une valorisation énergétique (exploitation du gisement d'énergie contenu par les déchets *via* la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur) ou matière (utilisation de tout ou partie d'un déchet en remplacement d'un élément ou d'un matériau). Cette valorisation peut s'effectuer en cours de production, en phase d'exploitation ou en fin de vie. L'ADEME la définit comme suit : « *le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie* » (loi du 13 juillet 1992). Cette valorisation est poussée par de nombreux facteurs, notamment :

- la montée des préoccupations environnementales ;
- l'augmentation du prix et la raréfaction des matières premières vierges ;
- l'instabilité des prix plus importante des matières premières secondaires/vierges.

Dans ce contexte, on observe une multiplication des outils incitatifs et réglementaires qui structurent la collecte et le tri des déchets (taux de recyclage, normes, filières responsabilité élargie du producteur). Il est également à noter le poids important au niveau mondial de grands groupes français pour la collecte et le traitement des déchets.

Finalement, l'écologie industrielle et territoriale constitue un levier important de compétitivité et de ré-industrialisation.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Récupération de ressources devenues rares (eldorado de la mine urbaine).

Sur le plan technologique

- Le tri téléopéré permet aux opérateurs de ne plus saisir manuellement les déchets, mais pointe sur un écran tactile les éléments à extraire de la chaîne de tri.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Le traitement des déchets directement sur site autorise une diminution des coûts de transport.

Sur le plan environnemental, sociétal

- Réduction de l'impact environnemental des déchets.
- Passage du statut de déchet au statut de matière première secondaire.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique

- Expérimenter de nouveaux procédés de recyclage et de valorisation.
- Développer de nouvelles techniques de tri (par forme, couleur ou matériau), potentiellement basées sur l'apprentissage machine.
- Développer des capteurs dédiés à la gestion intelligente des déchets (capteurs à ultrasons permettant d'indiquer le taux de remplissage d'un container par exemple).
- Étendre la collecte sélective aux plastiques souples (2022).
- Faire avancer les techniques de recyclage des composites.

FICHE 61

VALORISATION DES DÉCHETS

Au niveau numérique

- Développer des plateformes logicielles dédiées à la gestion des déchets comme Enevo, Compology ou BigBelly.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Développer les filières de valorisation encore peu développées, notamment les métaux stratégiques, matériaux plastiques, VHU, etc.
- Faire émerger des filières de déconstruction et/ou de revalorisation des moyens de transport : trains (Culoz, Chalindrey, Le Mans, etc.), avions (Tarbes et Châteauroux), engins lourds civils et militaires (Roanne...), navires (Bassens-Gironde), bateaux de plaisance (Projet APV), etc.
- Innover en matière d'organisation des acteurs.
- S'appuyer sur les expériences d'écologie industrielle et territoriale (EIT) comme le projet Acteis sur le territoire de Dunkerque, qui vise à accompagner les entreprises dans la mise en œuvre de synergies d'écologie industrielle (réemploi d'énergies & de matières, mutualisation de la gestion des déchets).
- Développer la filière française de valorisation des métaux stratégiques et technologies associées : *fuming* (phase solide et liquide), oxydation supercritique et utilisation de liquides ioniques notamment.

- Soutenir la filière de valorisation énergétique dans le domaine agricole (méthanisation, plan Emaa).
- Aller au-delà de l'économie circulaire vers l'écologie industrielle.
- Prendre en compte le recyclage dès la conception d'un produit, pour que la réutilisation de la matière soit considérablement simplifiée et sa qualité améliorée.
- Rechercher des débouchés à l'export.

Les questions à se poser

- Quelle est l'influence de la substitution des matériaux traditionnels par d'autres matériaux plus complexes (plastiques multicouches par exemple) sur le recyclage des produits ?
- Quelles sont les solutions de séparation et de traitement pour les nouveaux gisements ?
- Comment éviter le downcycling, c'est-à-dire la perte de la valeur intrinsèque d'une matière à travers un cycle ne permettant plus la réalisation d'un même type de produits ?
- Comment monétiser les bénéfices environnementaux du recyclage ?
- Comment harmoniser le principe de la responsabilité élargie du producteur à toutes les filières de recyclage ?

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE X01

VEILLE, PROSPECTIVE ET INTELLIGENCE ÉCONOMIQUE

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Avec la globalisation et l'avènement du numérique, la maîtrise de l'information est un impératif. La mondialisation de l'économie justifie une veille d'information constante à l'échelle internationale pour le maintien des avantages compétitifs des entreprises industrielles. Les données disponibles sont de plus en plus nombreuses, sur des formats de plus en plus variés, et les technologies associées à la collecte d'information et à leur exploitation évoluent également fortement. Transformer cette information en avantage stratégique, en utilisant les techniques de renseignement, mais aussi les dispositifs de protection économique et les démarches d'influence devient aujourd'hui indispensable.

L'activité de veille en entreprise consiste à collecter des informations technologiques et stratégiques pour permettre d'anticiper les évolutions et les innovations. Elle peut toucher énormément de domaines et l'entreprise doit bien définir le périmètre de recherche (commercial, concurrentiel, environnemental, financier, juridique, marketing, médiatique, politique, réglementaire, sectoriel, sociétal, stratégique, technologique, etc.).

La prospective est une démarche qui consiste à étudier des facteurs techniques, scientifiques, économiques ou sociétaux, de façon à prédire des situations qui pourraient découler de leurs influences conjuguées. Il en résulte des scénarios des évolutions possibles à moyen terme.

L'intelligence économique consiste à recueillir les informations nécessaires à la compréhension des interrelations de l'écosystème et à les analyser, pour anticiper l'action et bénéficier ainsi d'un avantage compétitif ou concurrentiel si possible stratégique. L'intelligence économique peut être définie comme l'ensemble des actions coordonnées de recherche, de traitement et de diffusion, en vue de son

exploitation, de l'information utile aux acteurs économiques. Le renseignement est l'outil de l'anticipation de l'action. Ces diverses actions sont menées légalement avec toutes les garanties de protection nécessaires à la préservation du patrimoine de l'entreprise, dans les meilleures conditions de délais et de coûts.

L'information utile est celle dont ont besoin les différents niveaux de décision de l'entreprise ou de la collectivité, pour élaborer et mettre en œuvre de façon cohérente la stratégie et les tactiques nécessaires à l'atteinte des objectifs définis par l'entreprise dans le but d'améliorer sa position dans son environnement concurrentiel. Ces actions, au sein de l'entreprise, s'ordonnent autour d'un cycle ininterrompu, générateur d'une vision partagée des objectifs de l'entreprise.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- La veille stratégique permet d'innover, d'anticiper et de limiter les risques (impact d'une réglementation, détection de contrefaçon...).
- Le partage des informations et connaissances au sein de l'entreprise permet aux salariés une meilleure efficacité dans leur quotidien, avec un pouvoir de fédération des salariés de l'entreprise autour de projets collectifs.
- La veille permet de gagner du temps, en exploitant ce qui existe déjà.

Sur le plan technologique

- Les activités de veille, de prospective et d'intelligence économique doivent permettre d'orienter la stratégie de développement et d'innovation technologique d'une entreprise, au regard des signaux faibles et forts en provenance du marché et de l'environnement économique de l'activité.

FICHE X01

VEILLE, PROSPECTIVE ET INTELLIGENCE ÉCONOMIQUE

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

- Toute évolution d'organisation doit se faire en anticipant les évolutions du marché et des technologies, d'où l'importance de l'intelligence économique. Il est essentiel que chaque salarié d'une entreprise puisse bénéficier d'outils et d'actions de veille en adéquation avec ses objectifs professionnels, afin de lui conférer une vision stratégique à moyen-long terme.
- De même, il est essentiel de pouvoir pousser de l'information vers l'extérieur afin d'influencer l'environnement économique d'une entreprise.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE**Au niveau technologique**

- Porter une réflexion sur la méthodologie de veille avant de se concentrer sur l'utilisation d'outils.
- Se garder du temps pour l'analyse et la synthèse d'informations.
- À moyen terme, mettre en œuvre une approche big data pour le traitement de données structurées, voire non structurées, et l'utilisation d'approche sémantique pour la recherche d'informations.

Au niveau numérique

- Valoriser l'information existante en interne des entreprises.
 - > Le management des connaissances ou *knowledge management* est aussi en partie l'un des métiers de l'intelligence économique qui permet d'optimiser les interactions entre les acteurs, afin que s'effectue non seulement la bonne diffusion, mais encore l'échange optimum d'informations.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

- Favoriser une utilisation efficace des outils du numérique et d'Internet pour en extraire toute la valeur ajoutée sans perte de productivité pour les salariés.
 - > Cérer la multiplicité des sources d'information disponibles.
 - > Utiliser les réseaux sociaux et les agrégateurs de flux afin d'optimiser les canaux de récupération de l'information.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- L'intelligence économique est une compétence généraliste qui doit être infusée de manière transverse à l'ensemble des collaborateurs d'une entreprise. Il s'agit avant tout de mettre en place des méthodologies et des outils partagés.
- Chaque étape du cycle de la veille nécessite des compétences spécifiques : recherche sur Internet, analyse d'un document, visite d'un salon...

Les questions à se poser

- La sécurité des systèmes d'information et des données qu'ils traitent est un défi majeur pour les entreprises. Quelles mesures techniques faut-il prendre pour protéger ses actifs stratégiques, tout en se mettant en conformité avec le droit ? Comment se préparer par ailleurs à l'entrée en vigueur du règlement général sur la protection des données (RGPD) en mai 2018 ?
- Le digital décuple la puissance des moyens d'influence pour les entreprises dans une relation directe avec l'opinion qui contourne les relais traditionnels (politiques, médiatiques...). Quelles sont les mécaniques d'influence ? Comment s'y préparer et les utiliser à son profit ? Comment organiser la riposte en cas d'attaque ?
- Il y a de plus en plus d'informations ; comment faire face à l'infobésité ?

Émergent

Laboratoire

Prouvé

Mature

Fréquent

Pervasif

FICHE X02

RUPTURES MARKETING ET RUPTURES STRATÉGIQUES

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

Pour se différencier sur leurs marchés les entreprises se doivent d'être innovantes. L'idée maîtresse est de dépasser leurs concurrents en offrant un produit ou un service perçu comme unique par les clients potentiels. Alors que la transformation digitale s'opère un peu partout, le marketing qui était déjà impacté le sera d'autant plus :

- que ce soit dans la quantité des données, leur qualité et leur traitement en temps réel ainsi que dans leur visualisation pour en extraire la substantifique moelle;
- ainsi, les marketeurs devront mieux identifier leurs données (internes et externes), les faire communiquer entre elles pour leur donner plus de sens, dans un contexte orienté client, pour ainsi pouvoir en extraire les besoins inhérents à chacun. Cela implique aussi de mettre les bons KPI en face pour être certain que les opérations marketing sont en ligne avec les objectifs définis.

La communication requiert de plus en plus d'interactivité, cependant les équipes n'augmentent pas pour autant. Ainsi pour apporter une qualité de service et de réponse aux différents interlocuteurs (ou objets connectés), le marketing utilisera des moyens technologiques pour le soutenir. De l'intelligence artificielle, aux chatbots ou tout simplement à de l'analyse de sentiment pour anticiper les requêtes des interlocuteurs, la liste n'est pas exhaustive.

D'un point de vue de la relation client, l'intelligence artificielle va inévitablement nourrir l'hypermersonnalisation de l'expérience client grâce à l'utilisation d'objets qui prolongeront l'utilité pour son détenteur. La fonction apprenante du *machine learning* devient ainsi un levier clé de la conversation et du dialogue entre marque & consommateurs. Il nourrira les outils tels que les chatbots au fil de l'eau et des interactions.

De nouveaux formats de communication apparaissent également avec les réseaux sociaux et les formats instantanés. Le public préfère des formats courts, simples mais originaux, mettant en scène l'utilisateur. On ne met plus

en avant un produit ou une solution mais on met l'utilisateur et son usage au cœur du message, l'idéal étant bien sûr quand le client lui-même réalise ce contenu. Et comme il peut y avoir plusieurs usages pour un produit, il faudra pour chaque type de client un contenu spécifique, une histoire à raconter : le fameux storytelling. De fait l'investissement marketing va invariablement croître pour concevoir un contenu innovant, percutant et différenciant.

À ce titre, le *real time marketing* (RTM) s'appuie sur la détection des signaux engageants permettant de les associer à un profil et de les utiliser ensuite dans une communication plus personnelle. Mais pas de RTM sans data disponibles. L'open data offre cette richesse nécessaire pour atteindre cet objectif d'individualisation de la communication et pousse tous les acteurs de la communication à réinterpréter le marketing relationnel classique.

Les marketeurs amorcent ainsi un changement profond d'état d'esprit pour passer d'une possession statique et volumétrique de la data à une utilisation dynamique et croisée de celle-ci. L'accès aux données plus que leur détention sera un levier essentiel dans les stratégies relationnelles des entreprises.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

- Rester en phase avec les dernières tendances marketing et stratégiques, en lien avec une convergence technologique toujours plus impactante.
- Bénéficier de relais de croissance par l'adoption de nouveaux vecteurs de communication permettant d'adresser un public différent.
- Assurer la pérennité de l'entreprise par un renouvellement des méthodes et processus marketing-stratégique pour toucher une cible marché dynamique et évolutive.

FICHE X02

RUPTURES MARKETING ET RUPTURES STRATÉGIQUES

Sur le plan technologique

- Les *deep tech* (intelligence artificielle, robotique, Internet des objets) représentent un relais d'innovation et de croissance pour une ère post-uberisation, avec des solutions qui visent vraiment à changer le monde et les modes de production et non seulement les business models.
- > Analyser l'engagement du client avant, pendant, et après l'achat, quasiment en temps réel, voire d'anticiper ses besoins.
 - Les capteurs et l'IoT ont aussi une place importante dans ce système de création et d'analyse de données, en suivant le parcours des consommateurs par exemple.
- > Impact important des technologies de réalité virtuelle sur l'identité et le marketing de nombreuses entreprises dans de nombreux secteurs industriels.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

Les ruptures marketing et stratégiques en émergence vont conditionner très fortement la capacité d'adaptation et d'évolution d'une entreprise. L'adoption de ces nouvelles pratiques technologiques représente un véritable enjeu de pérennité pour l'activité et influe fortement sur sa capacité à saisir les opportunités associées à la période de transition actuelle, au carrefour d'une convergence technologique et de défis environnementaux et sociétaux d'envergure.

▶ LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau technologique et numérique

- Une appropriation large des concepts technologiques émergents pour la diffusion d'une culture technologique transverse à même de repositionner le besoin du client en tant qu'élément central de la stratégie de développement de l'entreprise.
- Une transition digitale réussie afin de favoriser l'établissement de nombreuses synergies entre les services et entre les différents collaborateurs, au service des objectifs d'évolution de la stratégie.

Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation

- Un panel de compétences large pour bien appréhender le potentiel des *deep tech*, notamment pour les marketeurs (formation permanente aux numérique).
- Une vision de l'évolution de besoins actuels et une anticipation des comportements des générations futures pour adapter la stratégie actuelle au regard des besoins émergents.

Les questions à se poser

- Quelle orientation client pour mon entreprise ? Quelles cibles ? (client final, distributeur, intégrateur...)?
- Vision prospective de l'évolution du client type et de son besoin.
- Analyse objectif des canaux d'accès à la clientèle cible et identification de nouvelles opportunités marketing et stratégiques.

▶ MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

FICHE X04

INTERNATIONALISATION ET EXPORT

► DESCRIPTIF/DÉFINITION

L'export ne doit pas être vécu comme une simple recherche de débouchés, mais comme une véritable ambition de l'entreprise de devenir internationale. Tous les salariés doivent se sentir investis. C'est une démarche globale. L'exportation doit être intégrée dans la stratégie de l'entreprise. La réussite à l'export est souvent le résultat d'un savant mélange de stratégie internationale bien structurée, d'opportunités saisies et d'audace.

Sur le papier, beaucoup de pays paraissent alléchants mais leur accessibilité peut être problématique. Le temps moyen pour avoir un business pérenne avec des flux réguliers est de deux ans. Il faut prendre le temps de nouer des relations personnelles avec des partenaires locaux. Bien s'entourer, prioriser ses marchés cibles, et séquencer son approche du développement à l'international sont autant de facteurs clés de réussite d'un projet à l'export.

Il est nécessaire de bien appréhender le développement, les caractéristiques culturelles et de business, le réseau de distribution, la réglementation en vigueur, etc., et d'actualiser en permanence ses différents business plans en fonction des opportunités à saisir, des évolutions des marchés, de la rapidité du développement.

Il existe différents modes d'entrée pour aborder un marché étranger, et ce choix est déterminant pour les chances de succès d'un projet international. Dans certains cas, il peut être avisé de travailler avec un partenaire commercial français (agent, société de commerce, grande entreprise, pair exportateur) ; dans d'autres, c'est la collaboration avec un agent ou un distributeur local qui sera la bonne solution.

► ENJEUX (AVANTAGES)

Sur le plan économique

Les entreprises exportatrices se distinguent par une productivité, des effectifs, des salaires et une rentabilité plus élevés. Ces entreprises sont généralement déjà dans une dynamique d'investissement et d'embauche avant d'exporter : l'exportation apparaît donc comme une étape qui vient couronner une stratégie de développement performante.

Le choix de l'internationalisation est fondamental pour plusieurs raisons :

- parce qu'elle confère une visibilité étendue à une marque ou un produit, visibilité qui aura un impact positif sur les clients et les financeurs ;
- l'internationalisation permet également aux PME et ETI de conquérir de nouveaux marchés, sources de relais de croissance, de nouveaux clients et donc, *in fine*, d'une meilleure rentabilité abaissant les charges fixes ;
- enfin, l'internationalisation permet aux entreprises en croissance de se confronter à une concurrence nouvelle, ce qui les pousse à accélérer d'autant plus leurs processus d'innovation.

Sur le plan méthodologique

Le dirigeant doit être clair sur sa stratégie.

- S'agit-il pour lui d'élargir son marché, de développer l'offre client, d'accéder à une technologie ? Quelle que soit la valeur ajoutée attendue, les objectifs doivent être formalisés, validés par la gouvernance et discutés avec le management.
- Il doit ensuite définir ses zones de développement et ses marchés cibles. Le business model doit avoir un sens au regard du produit, des clients et des fournisseurs.
- Enfin, le chef d'entreprise doit lancer une étude préparatoire. Une étape parfois longue et laborieuse, mais nécessaire à la maîtrise du marché cible mais qui représente un véritable gain de temps lors du lancement produit.

FICHE X04

INTERNATIONALISATION ET EXPORT

C'est dans ces conditions qu'une entreprise pourra préciser l'adéquation de son offre ou de son produit au regard du marché et du positionnement de ses concurrents. Elle pourra également identifier les contraintes et les opportunités logistiques, technologiques ainsi que les différentes aides à l'export. Enfin, l'entreprise pourra construire un business plan spécifique à chacun des marchés et définir un plan de marketing et de communication adapté.

Ces étapes sont une suite logique de réflexions qui permet de structurer la démarche d'internationalisation afin de déterminer la meilleure manière de s'implanter : exportation, appui d'un distributeur local, implantation *via* une franchise, une filiale ou l'acquisition d'une structure locale.

Sur le plan de la transformation de l'entreprise

L'internationalisation, exportation ou non, doit être intégrée à la stratégie globale de l'entreprise et être un élément de sa performance. Plus que la dimension purement commerciale, la dimension technologique (participer à la dynamique du système industriel mondial grâce à la maîtrise des technologies) et la dimension organisationnelle (modifier l'organisation de son entreprise pour s'adapter à l'environnement mondial) sont essentielles.

► LES CLÉS DE LA RÉUSSITE

Au niveau méthodologique

- Faire une cartographie des marchés potentiels et les envisager à l'aune de plusieurs critères : barrières tarifaires à l'entrée, proximité géographique, environnement concurrentiel, normes et réglementations, etc.
- Être attentif au *place to market* comme il peut y avoir un *time to market*.
- Tester le produit ou service auprès d'un panel de consommateurs ou auprès d'experts pays.
- Lister toutes les dépenses nécessaires pour approcher, puis pénétrer le marché cible : participation à des salons, adaptation de l'offre, traduction de son site internet, recrutement de partenaires ou de salariés, frais juridiques...
- Entraîner toute l'entreprise : du BE en passant par la production et les services supports.

► MATURITÉ DE L'OFFRE

Émergent	Laboratoire	Prouvé	Mature	Fréquent	Pervasif
----------	-------------	--------	--------	----------	----------

REMERCIEMENTS

Outre la base de référence du Guide de l'Usine du Futur, édité par la FIM en 2015, le présent ouvrage n'aurait pu être publié sans la contribution et les efforts des organisations et personnes suivantes.

Tout d'abord, le CETIM et Hélène Determe et Dominique Rouckhaut ainsi que :

COLLÈGE DES ACADÉMIQUES

Arts et Métiers ParisTech : Eleanor Fontaine et les équipes relectrices
IMT : Patrick Duvaut et ses experts

COLLÈGE DES CENTRES DE RECHERCHE ET TECHNIQUES

CEA puis TECH IN France : Jean Sreng

COLLÈGE DES ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES

FIEEC : Eric Bourreli et ses équipes
FIM et ses syndicats (notamment ARTEMA et Laurence Cherillat)
Gimélec : Laurent Siegfried
IS : Fabrice Scandella et ses équipes
SYMOP : Sébastien Devroe (Fives)
Syntec Ingénierie : Rémy Bourges (Assystem)
TECH IN France (l'ensemble des équipes de Dassault Système ainsi qu'ESI Group)

COLLÈGE DES ORGANISATIONS DE FINANCEMENTS DES ENTREPRISES

AFIC : Philippe Herbert (KREAXIO)



**MEMBRE FONDATEUR
DE LA FRENCH FAB**

www.industrie-dufutur.org
[@industrie_futur](https://twitter.com/industrie_futur)