

IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET
SCIENTIFIQUES DE FRANCE

**LES
CAHIERS**

AVRIL 2022



MECANIQUE & USINE DU FUTUR

www.iesf.fr

Reproduction autorisée sans droit avec mention d'origine obligatoire



INGENIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE (IESF)

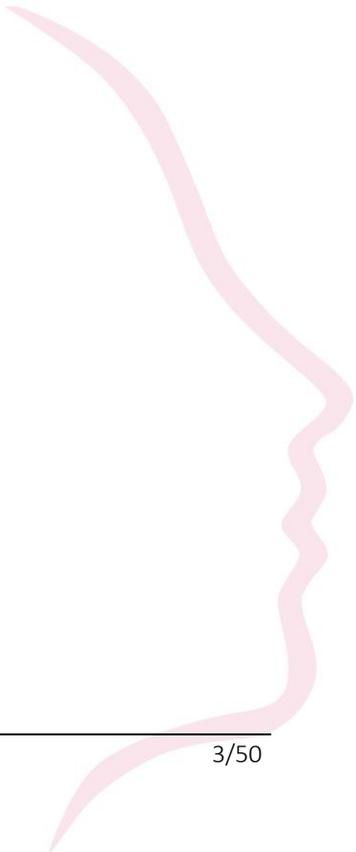
La France compte aujourd'hui plus d'un million d'ingénieurs et quelque deux cent mille chercheurs en sciences. Par les associations d'ingénieurs et de diplômés scientifiques qu'il fédère, IESF est l'organe représentatif, reconnu d'utilité publique depuis 1860, de ce corps professionnel qui constitue 4% de la population active de notre pays.

Parmi les missions d'Ingénieurs et Scientifiques de France figurent notamment la promotion d'études scientifiques et techniques, le souci de leur qualité et de leur adéquation au marché de l'emploi ainsi que la valorisation des métiers et des activités qui en sont issus.

A travers ses comités sectoriels, IESF s'attache ainsi à défendre le progrès, à mettre en relief l'innovation et à proposer des solutions pour l'industrie et pour l'entreprise. Notre profession s'inscrit pleinement dans le paysage économique et prend toute sa part dans le redressement national.

Ce document est établi par l'ensemble du **Comité Mécanique** d'Ingénieurs et Scientifiques de France (IESF) sous l'égide d'Yvon Chevalier président de ce Comité.

Nous remercions particulièrement Mansour Afzali, Denis Eymard, Henri-Paul Lieurade, Saïd Ferri, membres du comité mécanique, ainsi que Mohamed Cherfaoui pour leur participation à la réalisation de ce document,





SOMMAIRE

SOMMAIRE	4
SIGLES ET ACRONYMES	7
SYNTHESE	8
1 INTRODUCTION	9
2 EVOLUTION DES INDUSTRIES MECANIQUES	10
2.1 Nouveau paradigme.....	10
2.2 Un système industriel Intégré.....	10
2.3 Aspects techniques, humains et sociétaux.....	11
2.4 Impact au niveau des PME-PMI.....	11
2.5 Evolution des industries mécaniques : enjeux.....	12
2.6 Réseaux d’acteurs industriels.....	12
2.7 La place de la normalisation dans l’Usine du Futur.....	13
2.7.1 La norme est un document de référence international.....	13
2.7.2 La norme est une arme commerciale.....	13
2.7.3 Innovation et normalisation.....	14
2.7.4 Industrie du futur et normalisation.....	14
3 MUTATIONS TECHNOLOGIQUES	15
3.1 Simulation numérique ou prototypage virtuel.....	15
3.2 Jumeau numérique : du prototypage virtuel au prototypage physique.....	17
3.3 Réalité virtuelle, réalité augmentée, assistance aux opérateurs.....	20
3.3.1 Réalité virtuelle.....	20
3.3.2 Réalité augmentée.....	21
3.4 Technologie avancée de production.....	22
3.4.1 Fabrication additive.....	22
3.4.2 Production automatisée et robotique.....	25
3.4.3 Simulation des flux, organisation de l’atelier de production.....	28
3.5 Les matériaux du futur.....	31
3.5.1 Les matériaux et innovations.....	31
3.5.2 Les matériaux restent une clef pour le futur de l’industrie et de la société.....	31
3.5.3 Les matériaux et la transition écologique.....	33
3.5.4 Les besoins en matériaux de la société du futur.....	33



3.5.5	La conception des futurs matériaux passe par le numérique	34
3.6	Les assemblages par procédés innovants.....	34
3.6.1	Contexte	34
3.6.2	Position du problème.....	35
3.6.3	Les marchés impactés.....	35
3.6.4	Défis des assemblages liés aux composites.....	35
3.6.5	Verrous technologiques.....	36
3.6.6	Les axes de recherche.....	36
3.6.7	Assemblages et contrôle.....	37
3.7	Choix des capteurs dans l'industrie	37
3.7.1	Les différents types de capteurs.....	37
3.7.2	Les tendances technologiques.....	37
4	L'HOMME CATALYSEUR DE L'INDUSTRIE	40
4.1	L'organisation du travail	41
4.2	La formation.....	41
4.3	Qualité de vie au travail	42
5	EXEMPLES ET PERSPECTIVES	42
5.1	KALISTRUT AEROSPACE: robotisation du procédé de production	43
5.2	FONDERIE DE SOUGLAND: organisation de l'atelier de production.....	43
5.3	ARMOR : robotisation de procédés	44
5.4	BAUD INDUSTRIES: Jumeau numérique, réalité virtuelle.....	45
5.5	CLASS: réalité virtuelle	45
5.6	VENTANA: fonderie, fabrication additive, intelligence artificielle	46
6	CONCLUSION.....	47
7	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48





SIGLES ET ACRONYMES

AMR : Autonomous Mobile Robot

AGV : Autonomous Guided Véhicules

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives

Cetim : Centre technique de l'industrie mécanique

Cloud : serveurs distants interconnectés,

CND : Contrôle Non Destructif

CTIF : Centre technique de la fonderie

CVD : Chemical Vapor Deposition (Dépôt chimique par phase vapeur)

DGE : Direction Générale des Entreprises

EMAT : Electro-Magnetic-Acoustic-Transducer

ERP : Enterprise Resource Planning (logiciel de gestion intégré d'une entreprise)

ESP : Equipement Sous Pression

FA : Fabrication Additive

FIM : Fédération des industries Mécaniques

GPAO : Gestion de Production Assistée par Ordinateur

HCM : Haut Comité Mécanique

IIo : Internet Industriel des Objets (voir aussi IoT)

IIoT : Industrial Internet of Things (voir aussi IIo)

PoD : Probability of Detection

PVD : Physical Vapor Deposition (Dépôt Physique par phase vapeur)

QVT : Qualité de Vie au Travail

RA : Réalité Augmentée

RV : Réalité Virtuelle

SHM : Structure Health Monitoring

STL : STereo-Lithography (format d'échange de modèles CAO)

USD : US Dollar

UTC : Université de Technologie de Compiègne

VDI : Virtual Desktop Infrastructure (Infrastructure de bureau virtuel ou machine virtuelle)



SYNTHESE

Durant la dernière décennie, la France a poursuivi une réflexion stratégique destinée à déterminer les priorités de la politique industrielle du pays. Durant ces années 34 plans de la Nouvelle France Industrielle ont été regroupés autour de 10 axes répondant à des défis sociétaux et économiques prioritaires. Parmi ceux-ci l'axe « Industrie du Futur » qui alimente toutes les filières industrielles. L'objectif était clair : Rentrer de plein pied dans cette 4ème révolution industrielle (Industrie 4.0) et inciter les entreprises à exploiter la puissance du numérique pour mieux répondre aux besoins du marché où le client définit lui-même l'offre et exige une réactivité toujours plus grande.

Dans cet environnement numérique, c'est l'ensemble de l'écosystème industriel qui est concerné : nouveaux modèles d'affaires, nouvelle organisation, nouveaux produits intégrant l'offre numérique et les services. Ce dossier aborde différents thèmes de l'industrie 4.0 en se focalisant sur le secteur mécanique dans l'usine du futur dont toutes les spécificités exploitent la puissance du numérique afin de mieux répondre aux besoins du marché qui exige toujours une réactivité plus grande.

Trois points sont mis en lumière.

- *l'évolution des industries mécaniques.* Depuis le début des années 60 les outils numériques sont de plus en plus portables répartis sur des serveurs distants interconnectés (le « cloud »), les procédés de fabrication ont évolué et les matériaux sont plus performants. Tout ceci assure une meilleure flexibilité pour répondre à des besoins variés et évoluant rapidement. L'accent est mis sur le positionnement des PME-PMI en mécanique, premier employeur industriel en France, dont le positionnement et la coordination sont des points essentiels dans le défi de l'industrie du futur.

- *Les mutations technologiques* qui s'articulent globalement autour de 3 thématiques : Les outils de conception (simulation, jumeau numérique, réalité virtuelle ou augmentée), les outils de fabrication (fabrication additive, production automatisée et robotique, organisation de l'atelier), et les matériaux (matériaux composites et multi-matériaux, alliages nouveaux, assemblages innovants). Enfin il ne faut pas sous-estimer l'importance de l'aspect normatif: les normes ne sont pas seulement des règles et des recommandations industrielles mais surtout des leviers économiques.

- *Les aspects sociaux et humains* qui sont centrés autour de la formation (formations professionnelles et continue) et la qualité de vie au travail. Ces deux aspects, qui facilitent à la fois l'industrialisation et la personnalisation, sont adaptés aux aspirations de réactivité des entreprises.

Le développement inéluctable de l'industrie du futur doit être mené, comme le soulignent bon nombre d'employeurs, en veillant à ne pas perdre le sens physique et la réalité au niveau des acteurs. La technologie, même performante, ne doit pas remplacer peu à peu les qualités humaines et le savoir-faire: toute conception doit pouvoir déboucher sur des réalisations et sur de la production répondant aux besoins du marché où l'homme garde toute sa place dans la chaîne de valeur industrielle.

Mots clés: Assemblages, jumeau numérique, fabrication additive, formation, organisation de l'atelier, production automatisée, réalité virtuelle, simulation numérique

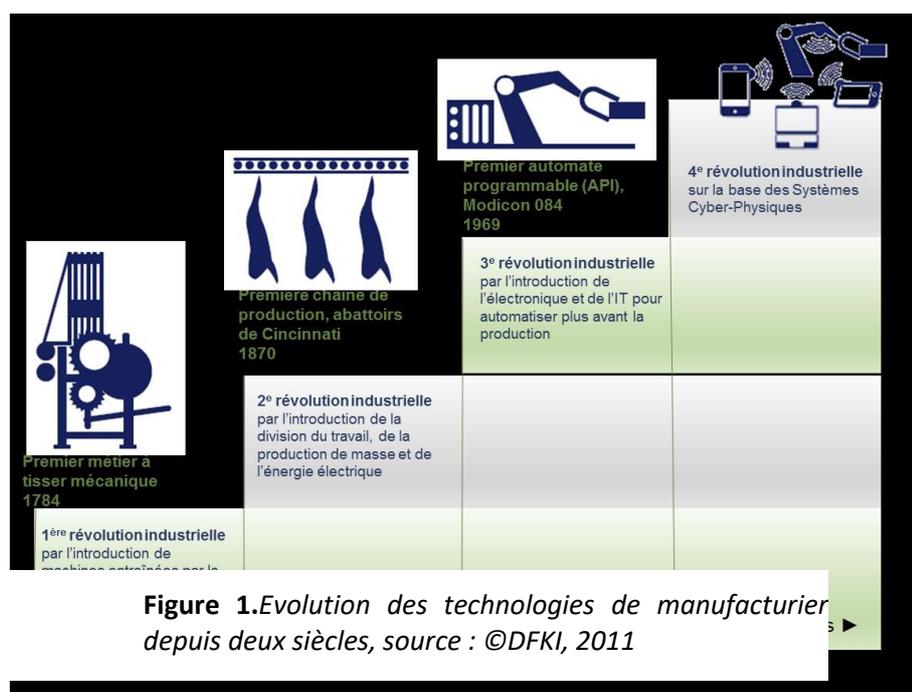


1 INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'année, la France a poursuivi une réflexion stratégique destinée à déterminer les priorités de la politique industrielle de la France.

En 2013, le **ministre du Redressement productif** a traduit cette réflexion menée en concertation avec les différents acteurs publics, industriels, et partenaires économiques en 34 plans de reconquête industrielles qui devaient représenter comme le Président de la République le précisait lui-même « les contours de la société de demain, de nouvelles manières de nous déplacer, de nouvelles manières de nous loger, de nous soigner, de nous transporter, de nouvelles manières de produire, de consommer, de nous nourrir, de nous habiller et même de fabriquer ».

Il s'agissait de favoriser le développement de produit « made in France » se positionnant sur des marchés en croissance et s'appuyant sur des technologies maîtrisées par la France ou pouvant l'être. Un écosystème technico-économique et universitaire était développé en cohérence avec ces axes de développement.



En 2015, le **ministre de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique** a regroupé ces 34 plans de la Nouvelle France Industrielle autour de 10 axes répondant à des défis sociétaux et économiques prioritaires. Parmi ceux-ci l'axe « Industrie du Futur » alimente toutes les filières industrielles.

L'objectif était clair : Rentrer de plein pied dans cette 4^{ème} révolution industrielle et inciter les entreprises à exploiter la puissance du numérique.

Pour mieux répondre aux besoins du marché où le client définit lui-même l'offre et exige une réactivité toujours plus grande.

L'évolution technologique et en particulier numérique permettant la réalisation de cet objectif

Source : ©DFKI, 2011



Après l'introduction de machines à vapeur au 18^{ème} siècle, la production de masse grâce aux machines électriques au 19^{ème} siècle, l'informatique et les automates dans les années 70, l'industrie 4.0 s'appuie sur les systèmes physiques connectés, la numérique et les nouvelles technologies de production. Une nouvelle ère industrielle est en marche !

Dans cet environnement numérique, c'est l'ensemble de l'écosystème industriel qui est concerné : nouveaux modèles d'affaires, nouvelle organisation, nouveaux produits intégrant l'offre numérique et les services.

Ce dossier aborde différents thèmes de l'Usine du Futur en se focalisant sur l'industrie mécanique.

2 EVOLUTION DES INDUSTRIES MECANIQUES

2.1 Nouveau paradigme

Ainsi, nous sommes loin du début de l'arrivée du numérique dans les usines dans les années 60 avec l'apparition de machines-outils enchaînant et exécutant des consignes d'usinage enregistrées sur rubans perforés. Au cours des années 70 les premiers logiciels de conception et la programmation des machines-outils ont été associés puis un pas important a été franchi par modélisation des surfaces 3-D imaginée par des ingénieurs mécaniciens.

Aujourd'hui, les outils numériques sont de plus en plus portables, les applications et données sont répartis sur des serveurs distant interconnectés (le "cloud"). La fabrication est additive, les matériaux sont composites, la réalité est augmentée, les produits sont connectés, l'intelligence est artificielle.

Notre modèle d'usine est impacté de fond en comble.

2.2 Un système industriel Intégré

L'Usine du Futur peut être identifiée comme un élément du « système industriel intégré », où l'outil de production est réalisé pour s'adapter aux produits à différentes étapes de leurs cycles respectifs, depuis la conception jusqu'au recyclage, afin d'assurer une meilleure flexibilité pour répondre à des besoins variés et évoluant rapidement.

Elle participe à plusieurs transitions simultanées: énergétique, écologique, numérique, organisationnelle et sociétale. Chacune de ces transitions fait appel à de nombreuses nouvelles technologies et à des modes d'organisation arrivant à maturité, en cours de développement ou à concevoir.

L'objectif est de moderniser l'outil de production et d'accompagner les entreprises dans la transformation de leur modèle d'affaire, de leur organisation, de leurs modes de conception, de production et de commercialisation. Ces modifications doivent se faire dans un monde où les outils numériques font tomber les cloisons entre industrie et services.

Nota : Ce sujet est largement développé par l'Académie des Sciences et le Haut Comité de Mécanique dans leur rapport « La mécanique du futur et la recherche en sciences mécaniques » du 16 novembre 2019 [HCM 19].



2.3 Aspects techniques, humains et sociétaux

Ce nouveau modèle d'usine associe des aspects habituellement dissociés : technique, humain et sociétal.

- L'aspect technique qui concerne les évolutions et les mutations des industries mécaniques conduisant non seulement à la reconfiguration des ateliers de production mais aussi à l'utilisation des données en vue d'améliorer la conception des produits et le génie des procédés.
- L'aspect humain car ces évolutions techniques entraînent la modification des chaînes de compétences alors qu'en même temps, la pérennité du savoir-faire doit être assurée.
- Cette révolution digitale rapide nécessite donc une formation professionnelle continue qui devient un élément incontournable de la rétention des talents en développant leur employabilité.
- L'intégration de l'homme dans la chaîne de valeur est ainsi primordiale.
- L'aspect sociétal qui mérite une attention particulière. En effet les impacts de l'activité des entreprises, notamment des entreprises mécaniques grandes pourvoyeuses d'emplois, 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 qui se manifestent dans de multiples domaines comme la santé, l'environnement, la solidarité, etc.

Le développement de la responsabilité sociétale des entreprises ne relève ni d'un vœu-pieux ni d'une obligation mais davantage de la mutation d'un système technico-économique sous tendu par des craintes au niveau de l'emploi et au niveau environnemental.

2.4 Impact au niveau des PME-PMI

L'union et la coordination des actions des différents acteurs industriels feront la force de l'industrie du futur. Le positionnement des PME-PMI est un point essentiel en termes de performance, d'efficacité et de la compétitivité dans ce modèle industriel.

Il est bon de rappeler ici la place des PME-PMI du secteur mécanique en France.

La mécanique est au cœur de l'industrie, elle représente environ 19 % de l'activité industrielle en France avec près de 30 000 entreprises essentiellement PME-PMI. C'est le premier employeur industriel français avec environ 620 000 salariés et 128 Milliards d'euros de chiffre d'affaire avec 40% à l'export.

De plus, depuis les années 80, les industriels ont transféré beaucoup d'activités au secteur des services industriels qui a ainsi gagné près de 2 millions d'emplois.

Aujourd'hui, le secteur doit relever le défi de l'Industrie du futur.

L'automatisation de l'outil de production peut répondre au besoin économique de productivité. Cependant, elle doit être intégrée dans une démarche globale permettant la mise en œuvre de l'organisation et des moyens techniques et humains adaptés.

L'usine du futur offre de nombreux avantages qui peuvent inciter les PME-PMI concernées par la mécanique à investir dans le domaine numérique.

Elle possède un outil de production flexible capable de s'adapter rapidement aux besoins de ses clients aussi bien en quantité qu'en qualité. Elle assure la traçabilité des produits de leur conception à leur fin de vie tout en les associant à des services adaptés aux nouveaux besoins sociétaux.

Avec ce modèle d'Usine, on passe du « marketing produit » traditionnel au « marketing client » qui exige plus d'informations sur ce dernier et plus d'anticipation et de réactivité à ses demandes. En plus ce modèle permet de répondre aux exigences de ses collaborateurs et aux défis environnementaux : durabilité, recyclabilité, maîtrise de l'énergie, protection de l'environnement.



Dans ce contexte, le numérique joue un rôle majeur car il permet une communication instantanée et intégrée, mais aussi de modéliser et simuler un produit, un procédé, voire l'usine et, de fait, d'anticiper et de contrôler.

« Big Data » (Données massives), « cloud » (serveurs distants interconnectés), réseaux sociaux, IIdO ou IIoT (Internet Industriel des Objets ou « Industrial Internet of Things »), sont dès à présent les outils d'aujourd'hui. Plus que jamais, le digital répond aux exigences de l'Usine du Futur en faisant le lien entre production, produits et services.

Nota : Deux rapports, *Guide pratique de l'usine du futur et panorama de solutions* et *Guide de technologie de l'industrie* détaillent largement ces notions, voir [FIM 16].

2.5 Evolution des industries mécaniques: enjeux

L'enjeu principal de cette évolution est de moderniser notre industrie qui doit retrouver une part importante du PIB. **Ainsi, nous pourrions nous rapprocher des 26,2% du PIB que représentait en 2020 la part de l'industrie en Allemagne en passant de 16,3% à 20% ou plus.**

Comme toute évolution, ce modèle, qui s'appuie sur une vision globale de l'entreprise et utilise l'automatisation et le digital, risque de créer des pertes d'emplois peu qualifiés. Certes il en créera d'autres, mais il est important d'anticiper la nécessaire formation des talents. Cela est d'autant plus vital pour les PME qui ne disposent pas des moyens des grands groupes industriels pour s'adapter et gagner en attractivité.

Cependant, l'Industrie du Futur va octroyer davantage de pouvoir aux hommes pour agir sur les conditions économiques, sociales, écologiques. Elle doit être une opportunité plus qu'une menace.

2.6 Réseaux d'acteurs industriels

Les pôles de compétitivité, créés en 2005, ont montré leur efficacité dans le soutien aux projets d'innovation. Aujourd'hui, l'urgence à réagir devant la mutation technologique a conduit ces acteurs à s'unir pour démultiplier leur effort dans une vision plus large d'Usine du Futur.

Cette « Alliance Industrie du Futur », voir[AIF 15], permet d'optimiser l'aide que les PME peuvent attendre. C'est une réflexion commune qui est entreprise à travers des audits et conseils en région auprès des PME volontaires avec l'appui notable du Cetim pour établir un schéma directeur argumenté et des améliorations pérennes. Avec l'aide de la BPI (Banque Publique d'Investissement), des aides au financement de ces actions sont possibles. Il existe aussi de nombreuses plateformes régionales ou nationales telles que le Factory Lab au sein du CEA, permettant aux PME de tester leurs technologies et leur efficacité en collaboration avec les laboratoires et industriels partenaires, voir[EYM 17].

Ces actions sont complétées au niveau national de l'Alliance par une capitalisation des bonnes pratiques et « success stories » incitant les PME à initier cette démarche.

Les régions sont également actives dans ce domaine pour inciter les industriels de la région à revoir leur stratégie industrielle et à initier leur transformation numérique avec comme objectif d'augmenter la compétitivité de leurs entreprises. Parmi les différents programmes, nous pouvons citer celui de la région de l'Île de France avec « Accompagnement Smart Industrie (ASI) », le programme de « StratIPerf » (Stratégie, Innovation, Performance) de la région des Hauts de France et le programme « Ambition Région Innovation – Être Accompagné dans mon Projet Industrie du Futur » lancé par la région Bourgogne Franche Comté.

Les thématiques de ces programmes couvrent la numérisation des activités de gestion et de production comme ERP, GPAO, et celles du guide d'AIF, des technologies de l'Industrie du Futur :



- Objets connectés.
- Technologies de production avancées.
- Nouvelle approche de l'Homme au travail, organisation et managements innovants.
- Usines et lignes/îlots connectés et internet industriel.
- Relations clients/ fournisseurs intégrées.
- Nouveaux modèles économiques et sociétaux/stratégies et alliances.

Dans un environnement technologique et économique en pleine effervescence, l'union et la coordination des actions des différents acteurs industriels fera la force de l'Usine du Futur.

Mais n'oublions pas également les actions de ces acteurs dans l'étude des technologies du futur, leur rôle dans le soutien à l'innovation et aussi dans les instances de normalisation.

2.7 La place de la normalisation dans l'Usine du Futur

Depuis le début de l'ère industrielle, la normalisation est pour les industriels de la mécanique un outil stratégique majeur quant à l'évolution des modes de production et l'amélioration des produits, tant pour leur qualité intrinsèque que pour leur adéquation aux besoins des clients, voir [CON 20]. C'est de plus un vecteur essentiel de la compétitivité de toute entreprise qui veut figurer parmi les acteurs majeurs du marché mondial.

2.7.1 La norme est un document de référence international

La norme est un langage commun, une référence qui facilite la communication et les échanges économiques, voir [AIF 16].

Elle est mise au point par les experts représentant les différents intérêts socio-économiques concernés et approuvée par un organisme de normalisation officiel. C'est un document de référence comportant des solutions à des questions techniques et commerciales concernant des produits, des biens d'équipements ou des services.

La norme est élaborée par consensus par l'ensemble des acteurs d'un marché fabricants, intermédiaires, utilisateurs, autorités réglementaires, supports techniques, évaluateurs, bénéficiaires finals... Elle établit une adéquation à un moment donné entre état de la technique et contraintes économiques.

2.7.2 La norme est une arme commerciale

De nombreux industriels ont bien compris que la normalisation constitue une arme économique.

En particulier, pour un projet à l'export, une norme sert de référence au futur client qui n'est pas toujours armé pour définir le contour de son futur investissement. Les normes servent à tous, mais ceux qui prennent l'initiative de participer à leur élaboration, bénéficient « d'un plus » à intégrer dans leur savoir-faire et leur politique d'entreprise. La participation aux travaux de normalisation permet au fabricant de faciliter l'insertion des innovations sur le marché, d'anticiper donc de faire évoluer ses produits, d'introduire des solutions adaptées à la compétence de son entreprise, lui permettant de se donner de nouvelles armes dans la concurrence économique.

Dans un secteur fortement concurrentiel, l'entreprise a même intérêt à être à l'origine de la norme et à en prendre le leadership, lors de sa rédaction ; en effet, faute de prendre l'initiative de la démarche, l'entreprise



sera contrainte in fine de modifier son savoir-faire (méthodologies de conception, procédés de fabrication), et à devoir appliquer le savoir-faire d'entreprises concurrentes.

Afin de rédiger une nouvelle norme pertinente dans un laps de temps correct, deux types d'expertises sont nécessaires; la première concerne le fonctionnement du processus de normalisation: cette expertise est disponible dans des organismes tels que l'UNM, le Cetim ou l'Afnor.

La deuxième expertise est directement liée au produit ou service concerné par la norme. Pour cette expertise, il est indispensable de confier la mission à des collaborateurs dédiés (et non pas interchangeables), fortement compétents et disponibles; en fait, lors de la définition d'une norme, les discussions internationales, parfois difficiles, nécessitent, d'une part des collaborateurs au caractère bien trempé, d'autre part un suivi précis des responsables de l'entreprise.

2.7.3 Innovation et normalisation

L'entreprise qui innove doit se soucier de la protection et de la diffusion de ses innovations. L'expérience montre que la voie à retenir dépend essentiellement de la nature des marchés sur lesquels les produits innovants sont proposés. Si le nouveau produit constitue une innovation incrémentale, apportant une amélioration plus ou moins substantielle par rapport aux produits concurrents, l'entreprise innovante aura certainement intérêt à protéger son innovation, c'est-à-dire son avantage par rapport à la concurrence, tout en cherchant éventuellement à introduire les nouveaux concepts dans les normes afin de pousser la concurrence à évoluer. Elle pourra avoir recours aux techniques habituelles de protection de l'innovation (brevet,...).

En revanche, si le marché est totalement nouveau ou doit être considérablement consolidé, la stratégie peut plutôt préférer un outil donnant confiance aux utilisateurs, aux consommateurs, créant des conditions favorables à l'acceptation de l'innovation, en vue d'élargir le plus largement possible son marché.

En favorisant l'interopérabilité et la compatibilité des équipements entre eux et permettant ainsi l'élargissement des marchés, la réduction des variétés et donc la réduction des coûts de production, la normalisation peut contribuer significativement à la diffusion de l'innovation. Une entreprise intégrant ses propres innovations dans les normes en participant à leur développement, facilite l'accès au marché de ses produits.

Enfin, la normalisation internationale permet la diffusion rapide des innovations dans le cadre des échanges commerciaux internationaux. L'Accord sur les obstacles techniques au commerce (OTC) de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) reconnaît en effet l'importance de la contribution des normes internationales et des systèmes d'évaluation de la conformité dans l'amélioration de l'efficacité de la production et la facilitation du commerce international. La normalisation internationale permet, en évitant la prolifération de standards nationaux et régionaux, de réduire les coûts des transactions voire de certification.

2.7.4 Industrie du futur et normalisation

La révolution industrielle aujourd'hui en marche est fondée sur l'accroissement de la vitesse de traitement de l'information et des capacités de mémoire et sur le développement massif des réseaux de communication. Cette mutation technologique, liée notamment à l'arrivée du numérique, se caractérise par une interconnexion totale des machines et des systèmes au sein des sites de production et entre eux et l'extérieur; elle ouvre la voie à une nouvelle organisation des moyens de production aussi bien au stade de l'approvisionnement, que de la fabrication et de la diffusion des produits. Dans ce cadre, la normalisation doit permettre de favoriser les innovations, d'améliorer l'interopérabilité des systèmes et d'abaisser les coûts d'acquisition des nouvelles technologies, en particulier pour les PME.



3 MUTATIONS TECHNOLOGIQUES

3.1 Simulation numérique ou prototypage virtuel

Dans la conception des produits et des procédés les industriels font de plus en plus appel à la simulation numérique, appelée également le prototypage virtuel. Cette technologie a permis de réduire le coût et le délai de la mise au point des produits et des procédés industriels d'une façon significative.

L'utilisation de la maquette numérique a favorisé l'introduction des nombreuses innovations technologiques dans les produits et a permis de valider leurs conceptions et d'évaluer leurs performances sans faire appel aux prototypes physiques.

Dans l'industrie de l'aéronautique, on passe du prototype virtuel d'avion, au produit physique pour réaliser des essais de vols de certification pour assurer sa navigabilité.

La simulation permet également d'étudier l'influence des différents paramètres de conception sur la performance du produit et de rechercher des solutions optimales. Tout se fait sur la maquette numérique, réduisant ainsi les allers retours entre la phase de conception et le prototype physique.

Autrement dit, il s'agit de "faire le bon choix du premier coup" !

La compétition internationale et la recherche des solutions optimales et innovantes conduisent les différents acteurs industriels à faire appel aux maquettes numériques en grande partie basée sur les logiciels de simulation par la méthode des éléments finis et les méthodologies associées.

La figure 2 présente la simulation numérique et l'analyse du comportement de la Tour Eiffel réalisée par le Cetim et à la demande de la Société d'Exploitation de la Tour Eiffel (SETE). Dans cette étude la méthode dite « zoom structural » a été utilisée afin d'obtenir la valeur des contraintes dans les zones très chargées avec un maillage fin dans la zone concernée en utilisant les résultats obtenus par une modélisation complète de la structure, voir [AFZ 22].

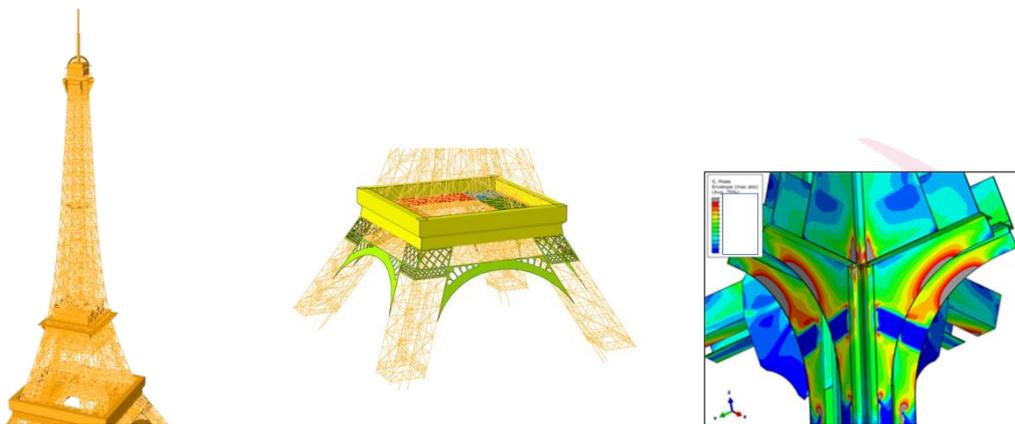


Figure 2. Modélisation et simulation numérique du comportement de la Tour Eiffel par le logiciel Castor (@Cetim)

Un autre exemple pour les applications mécaniques concerne l'analyse dynamique transitoire de ponts roulants. Il s'agit d'étudier le comportement des ponts roulants sous chargements sismiques. Cette étude a été l'occasion de comparer plusieurs méthodes d'analyse afin de mettre au point une méthodologie de simulation par la méthode des éléments finis pour les constructeurs de ponts roulants.



Figure 3. Analyse dynamique transitoire de ponts roulants (@Cetim), la photo gauche (@EDF)

La simulation numérique des phénomènes multi-physiques met en œuvre les différents phénomènes physiques comme la fluïdique, la thermique, l'électromagnétisme, le comportement des structures, etc. Pour réaliser ces analyses l'industrie utilise un chaînage des logiciels validés dans les domaines concernés. A titre d'exemple une analyse multi-physique thermique, fluïdique et de structure consiste à réaliser une simulation thermique et en mécanique des fluïdes et les résultats, comme les distributions de la pression et de la température, sont utilisés comme chargement pour analyser le comportement mécanique de la structure sous ces chargements.

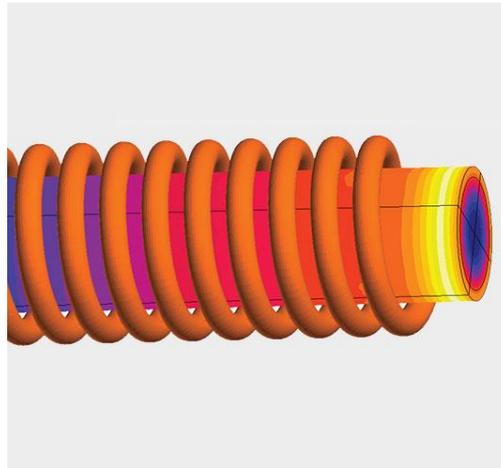


Figure 4. Simulation multi-physique électromagnétique et mécanique d'un moteur électrique (@Altair)

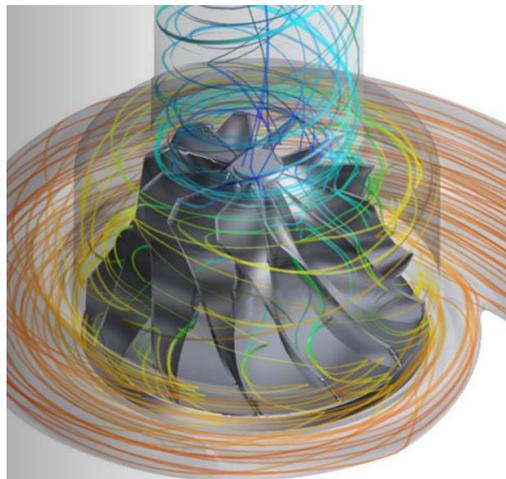


Figure 5. Simulation multi-physique, la mécanique des fluïdes et la mécanique de structures d'une turbomachine (@Ansys)



La simulation numérique est également utilisée pour étudier et optimiser les procédés de fabrication comme le forgeage, l'emboutissage, la fabrication additive, le soudage, la fonderie, etc.

Comme dans le domaine de la conception, les ingénieurs de méthodes font appel à la simulation numérique pour étudier la faisabilité à produire d'une façon optimale des pièces. Il s'agit d'étudier l'influence des différents paramètres du procédé sur la qualité de la pièce avant de lancer les essais physiques.

Dans la simulation de forgeage de pièces ou d'emboutissage des tôles, outre l'étude de la formabilité, et en minimisant le nombre de passes, il est important d'éviter la déchirure ou le flambement localisé. Il est également possible de calculer les contraintes résiduelles dans la pièce ainsi que les contraintes dans les outillages en vue de leur dimensionnement.

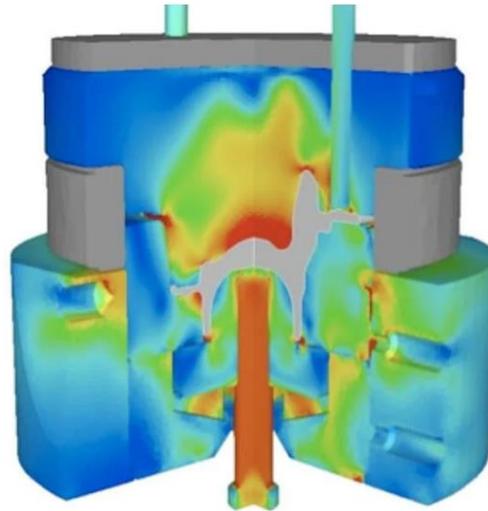


Figure 6. Simulation du forgeage par le logiciel FORGE® (© Transvalor) et le calcul des contraintes dans les outillages.

Pour les informations complémentaires sur la simulation numérique voir [AFZ 22].

3.2 Jumeau numérique : du prototypage virtuel au prototypage physique

Un jumeau numérique est une réplique ou l'avatar numérique d'un objet ou produit physique ou procédé.

Ce concept utilise l'Internet Industriel des Objets pour transmettre les données du produit physique au modèle virtuel à l'aide de capteurs communicants. Il est basé sur le produit physique, son modèle virtuel (jumeau numérique) et les informations qui relient les deux.

C'est un concept qui concerne les différentes étapes de développement et exploitation d'un produit ou procédé : la conception, la simulation, la fabrication, l'utilisation, la surveillance et la maintenance du produit ou procédé. Il s'agit de mettre en place une maquette virtuelle qui permet de réaliser une analyse prédictive du comportement et de la performance du produit ou du procédé. Le modèle virtuel interagit avec le produit physique grâce aux capteurs et les données sont régulièrement enrichies.

Les jumeaux numériques sont associés au concept l'industrie du futur ou industrie 4.0.

Les principaux avantages des jumeaux numériques sont :

- **Augmenter la qualité, la fiabilité et la disponibilité:** grâce à la simulation et au pilotage du produit ou procédé, le retour de données issues du produit physique et l'enrichissement des modèles virtuels avec comme objectif la performance du produit ou procédé.



- **Optimisation du fonctionnement** : grâce aux données collectées, améliorer la performance et la durée de vie du produit.
- **Réduire le coût de la maintenance** : une analyse prédictive basée sur des modèles numériques fiables et enrichis des retours d'expérience, permet d'anticiper les incidents et les arrêts d'exploitation souvent très coûteux.

Il existe deux grandes familles de jumeaux numériques :

- o « Bottom up » : la démarche s'appuie sur les données de capteurs et sur les modèles de prédiction grâce aux techniques de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique,
- o « Top down » : la démarche s'appuie sur la simulation numérique, avec la réduction de modèle, pour simuler le comportement du système et ensuite enrichis par des mesures à l'aide des capteurs et des techniques de l'intelligence artificielle (IA).

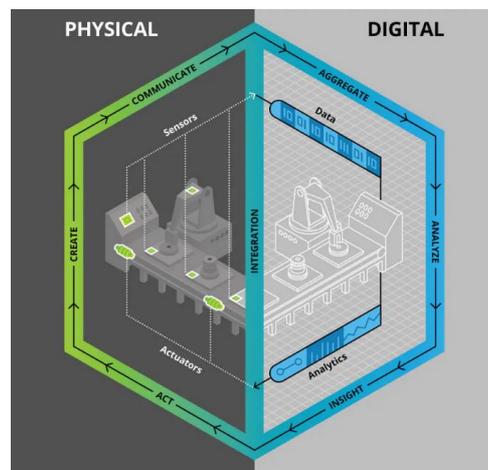


Figure 7. Jumeau numérique pour un produit ou procédé

Les applications pour l'industrie aéronautique

Les jumeaux numériques sont de plus en plus utilisés par les constructeurs aéronautiques, comme Airbus, Dassault Aviation, Safran, General Electric et Rolls-Royce pour la gestion de la maintenance prédictive des équipements dont les moteurs et ses composants.

Les données d'exploitation des compagnies aériennes et celles issues des capteurs sont utilisées pour enrichir le jumeau numérique leur permettant de chercher la performance des équipements d'une façon optimale. Le jumeau numérique est également utilisé pour simuler le comportement d'avion ou du moteur selon les différents profils de vol. Les deux méthodes « Bottom up » et « Top down », décrites ci-dessus, sont utilisées. L'utilisation des données massives (big data) et les algorithmes associés, ainsi que les simulations numériques décrivant la physique des différents phénomènes en s'appuyant sur les profils de vols et les techniques de l'intelligence artificielle permettent de rechercher des solutions les plus performantes.

Cette démarche permet aux constructeurs et aux exploitants de disposer des informations riches pour mettre en place une stratégie optimale afin d'assurer la maintenance préventive des moteurs d'avion.

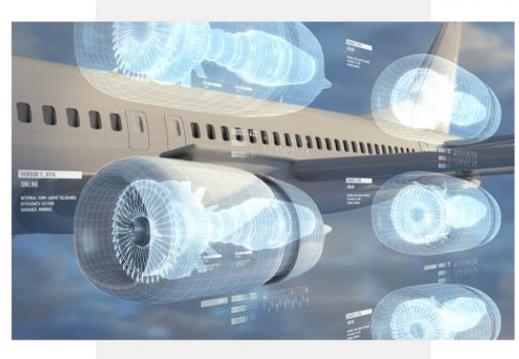
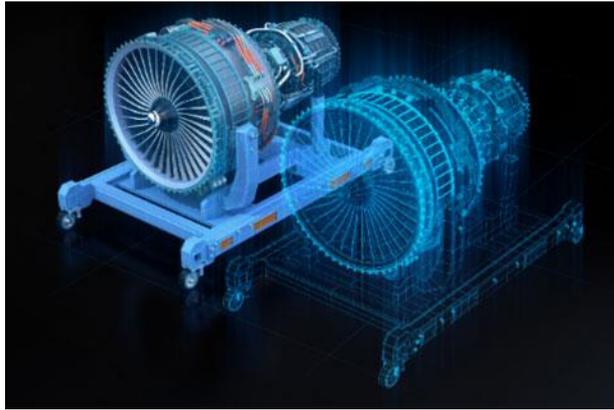


Figure 8. *Les jumeaux numériques pour les applications aéronautiques*

C'est le cas du constructeur Safran qui a développé des jumeaux numériques pour la maintenance de ses moteurs d'avion. En fonction des profils de vols et des événements survenus pour les moteurs, le jumeau réalise des simulations et il permet de remplacer la maintenance classique par la maintenance préventive si les conditions de vols sont jugées optimales. Dans le cas contraire, si les analyses par le jumeau numérique permettent de détecter les conditions exceptionnelles avec des risques d'endommagement de quelques pièces, une intervention sera déclenchée pour éviter des pannes éventuelles.

Le constructeur General Electric a annoncé avoir fait gagner 1,5 milliard US Dollars à ses clients dont 150 000 US Dollars pour une application spécifique grâce à la mise en place des jumeaux numériques, voir [GEN 21]. Un exemple de données enregistrées et exploitées est présenté dans la Figure 9. Le changement de la température et celui de la pression du gaz à la sortie du moteur sont parmi les paramètres à analyser par les jumeaux numériques. En fonction des données analysées une inspection du moteur est engagée d'une façon préventive. En cas de détection des anomalies par le jumeau numérique et lors de l'inspection, de dommages ont été observés sur les aubes du compresseur haute pression du moteur.

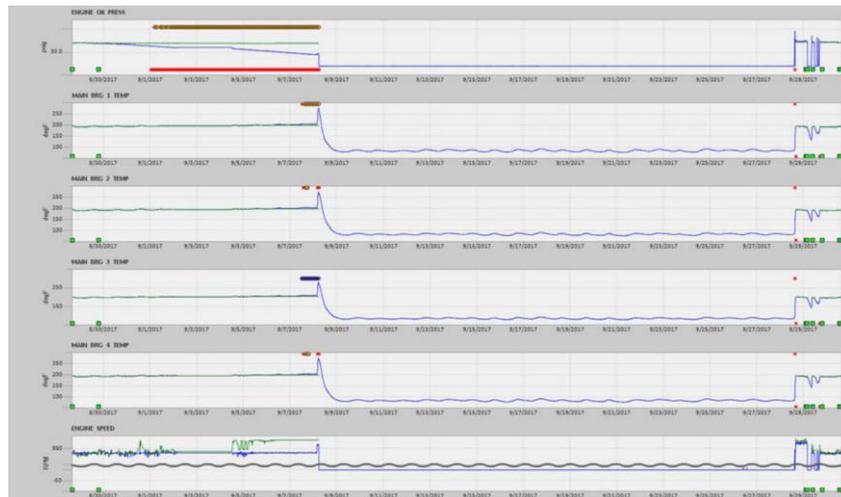


Figure 9. Jumeau numérique mise en place par General Electric pour assurer la maintenance préventive des moteurs d'avion [GEN 21]

Pour d'autres applications des jumeaux numériques voir [AFZ 22].

3.3 Réalité virtuelle, réalité augmentée, assistance aux opérateurs

3.3.1 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV) permet à l'utilisateur d'interagir avec un environnement du monde réel, représenté par un modèle virtuel (modèle CAO 3D) ou dans un monde imaginaire, grâce aux lunettes stéréoscopiques ou un casque immersif et des logiciels associés. Il s'agit d'un outil performant pour la conception, la formation et la maintenance de produits ou des procédés d'une façon de plus en plus réaliste [CEA 17].

Cette technologie date des années 50, mais les développements des matériels et des logiciels au coût raisonnable ont rendu très populaire l'usage de ces outils par le grand public via les jeux vidéo et par les industriels pour le design et la conception des produits.

L'UTC a développé la salle immersive de réalité virtuelle « **TRANSLIFE** » dédiée à la recherche dans le domaine des interactions entre l'opérateur et les objets virtuels. Le **CAVE™ (Cave Automated Virtual Environment)** à quatre faces est une salle immersive cubique (Figure10). A l'aide d'un outil « haptique », l'utilisateur peut manipuler un objet avec le retour de force. Cette fonction est souvent utilisée notamment pour la formation à la conduite ou pour la maintenance industrielle.



Figure 10. La réalité virtuelle crée un environnement virtuel dans lequel l'utilisateur peut interagir avec les objets



Figure 11. Le CAVE Translife du laboratoire Heudiasyc de l'UTC

Chez Renault, la réalité virtuelle est utilisée pour valider les différentes fonctions d'un véhicule et interagir avec le véhicule numérisé grâce aux outils de modélisation et des bases de données.



Figure 12. Utilisation de la réalité virtuelle chez Renault

3.3.2 Réalité augmentée

La réalité augmentée permet d'enrichir le « réel » avec des images ou vidéos « virtuelles » fixes ou animées en temps réel. Sur les lieux touristiques, sur une tablette, il est possible d'observer le monument tel qu'il existait il y a 2500 ans sur les images ou vidéos réelles observées par les touristes.



Un autre exemple concerne l'affichage des informations de vol sur l'écran du cockpit de la nouvelle génération d'avions, ou grâce à la technologie « tête haute » qui consiste à afficher, sur le pare-brise d'un véhicule, les informations relatives à la conduite.



Figure 13. La réalité augmentée chez PSA pour informer le conducteur des informations relatives à la conduite

Dans la maintenance industrielle des sites sensibles, comme les centrales nucléaires, la technologie de réalité augmentée peut être utilisée pour piloter des opérations de maintenance par l'intermédiaire des télécommandes.

Enfin, la **réalité mixte** qui permet de visualiser des informations en réalité augmentée à l'aide de casque d'immersion. Parmi les exemples cités: l'opérateur est guidé pour l'opération de l'assemblage de pièces d'un véhicule. L'ensemble des informations pour l'assemblage des pièces est affiché sur la lunette facilitant ainsi le travail des opérateurs.



Figure 14. Réalité mixte pour assister l'opérateur dans l'opération du montage (Artefacto)

3.4 Technologie avancée de production

3.4.1 Fabrication additive

La fabrication additive (FA) est une technologie qui permet de réaliser des pièces, à partir d'un modèle 3D CAO, par addition de la matière, le métal ou le polymère, à l'aide de poudres ou fils. La technologie adaptée pour les matériaux métalliques est la fabrication additive par fusion laser et elle convient pour les pièces de prototype ou en petite série.



A l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme, cette technologie permet de réaliser des pièces fonctionnelles et sans outillages offrant une liberté aux concepteurs sur la forme optimale de la pièce. Ainsi les pièces de structures lattices (une combinaison de matériau et de zones vides) peuvent être réalisées par cette technologie afin d'alléger la masse tout en conservant la rigidité et la résistance souhaitée, voir les figures 15 et 20.

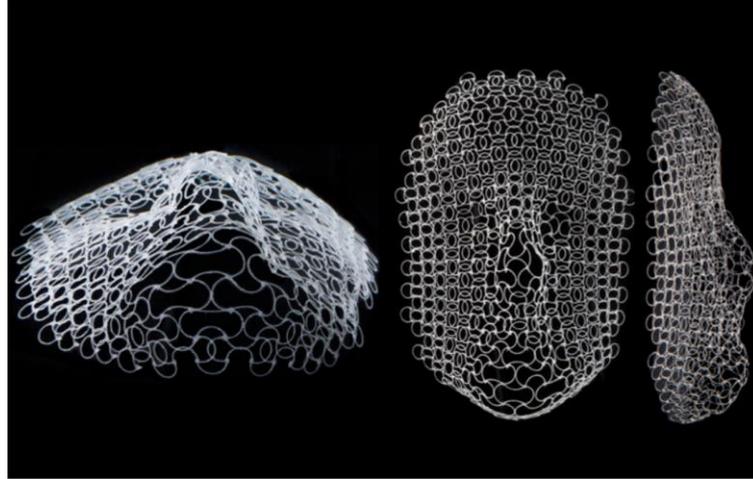


Figure 15. Un exemple de structure lattice [Chu 19]

La mise en œuvre de la fabrication additive, par les PME sous-traitants, nécessite la maîtrise des outils de CAO afin de préparer le modèle CAO et éventuellement d'optimiser la forme permettant de bénéficier de tous les avantages de cette technologie.

Les différentes étapes de la mise en œuvre sont présentées dans la figure 16 : Modèle CAO 3D, fichier STL (STereo-Lithography), le découpage en couche, la fabrication additive par la machine et les traitements de surface et thermique pour obtenir la pièce finie.

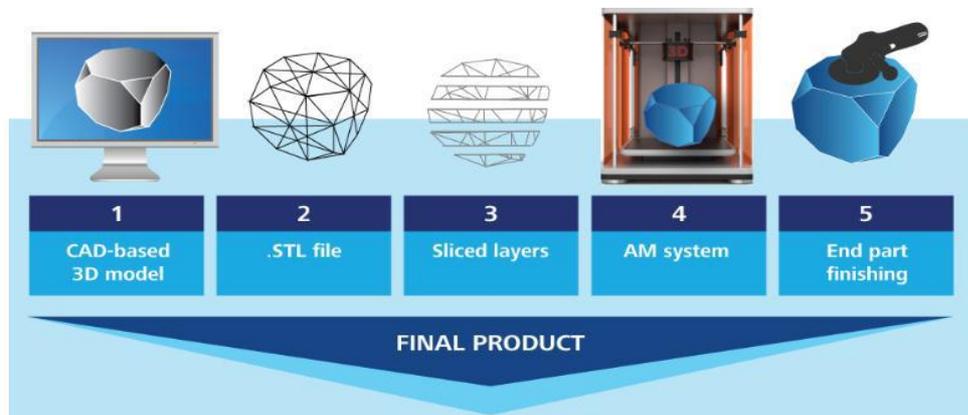


Figure 16. Différentes étapes de la fabrication additive

Afin d'obtenir un bon état de surface et en fonction des paramètres du procédé, il est nécessaire de faire appel aux procédés de finition comme le polissage électrochimie ou le parachèvement par grenailage notamment pour améliorer la performance en fatigue du produit. Le traitement thermique permet de redistribuer les contraintes résiduelles générées durant le procédé de la FA et d'améliorer les performances mécaniques de la pièce.



Figure 17. Polissage d'une pièce en TA6V (source Airbus Munich)

Dans la figure 18 il est conseillé de prendre en compte les différentes étapes avant et après le procédé de FA afin de réaliser les pièces dans des bonnes conditions.

- Matériau : définir le choix de la poudre, la disponibilité et le recyclage.
- Conception : réaliser l'optimisation de forme afin d'alléger la structure et obtenir une structure lattice en respectant les règles de conception du produit.
- Simulation : simuler pour connaître la déformation et les contraintes thermiques pendant la fabrication.
- Fabrication : stratégie de supportage, paramètres de laser, stratégie de balayage (vitesse et l'épaisseur de couche), contrôle du procédé.
- Post-traitement et parachèvement : traitement thermique, traitement de surface, usinage, soudage, etc.
- Sécurité : respect des règles d'hygiène en lien avec ce procédé.
- Qualification : contrôle qualité, qualification du procédé, de la machine et du personnel.



Figure 18. Démarche du développement produit par la fabrication additive (source Liebherr)



Figure 20. *Fabrication additive de la charnière de nacelle en titane avec la pièce optimisée à droite (source Airbus group)*



Figure 19. *Fabrication additive de la chambre de combustion, aube directrice de sortie, matériau : Inco 718 (source Safran)*



Figure 21. *Une application de la fabrication additive pour le secteur médical, prothèse dentaire*

3.4.2 Production automatisée et robotique

Les applications des robots dans l'industrie sont nombreuses. Des robots pour déplacer des pièces, pour assemblage de composants mécaniques, pour usiner ou pour le parachèvement des pièces, des cobots pour assister les opérateurs pour soulever ou déplacer des pièces lourdes, etc. Les robots sont utilisés pour des tâches répétitives et/ou pénibles ou dangereuses pour les opérateurs comme dans la maintenance des centrales nucléaires. Ils sont adaptés pour la production de masse mais également dans certaines applications pour les petites séries en permettant de réaliser des tâches avec précisions et diminuant les erreurs.

Ainsi, la robotisation permet d'améliorer la qualité, la compétitivité et les conditions de travail des opérateurs.

L'usage de cette technologie doit tenir compte de l'application, des moyens de production et du métier de l'entreprise. L'intégration des robots dans l'atelier de production doit tenir compte :

- de l'interaction opérateur- robot,
- de la sécurité des opérateurs,
- des flux de production,
- de l'acceptation de la solution par le personnel.



A titre d'exemple, le Cetim a développé le diagnostic ARTHUR (Analyse de la Répartition des Tâches entre Humain et Robot) afin d'étudier la viabilité d'un projet de robotisation, sur le plan technique et économique [CET-Info-4-21]. Il permet de prédéfinir une architecture pour la mise en place des robots au sein de l'atelier de production. A l'issue de ce diagnostic, un cahier des charges décrit les équipements nécessaires et permet de choisir l'intégrateur qui mettra en place le robot avec les adaptations nécessaires aux besoins de l'entreprise [CET-Info-4-21]. Le Cetim offre une solution de prêt d'une cellule robotique mobile pour réaliser des études de faisabilité sur site de l'entreprise. En collaboration avec un intégrateur et d'une façon concrète, l'industriel peut évaluer l'apport du robot sur le plan technique et économique avant d'investir. Le Cetim réalise une centaine d'accompagnement sur le territoire pour différents domaines d'application et tous secteurs d'activité.

La mise en œuvre d'une solution robotique doit faire appel à une attention particulière d'intégration dans la chaîne de production.

Ainsi, la mise en place des robots nécessite des outils spécifiques tels préhenseurs, systèmes de vision et aussi des mécanismes pour le changement automatique ou non des outils afin de s'adapter aux différentes pièces ou outils à manipuler selon le processus de production. Outre ces équipements « périphériques » au robot proprement dit, on doit tenir compte des flux de production, de la sécurité des opérateurs ainsi que de leur formation

L'aide d'un intégrateur est indispensable. L'intégrateur robotique réalise l'étude, la mise en place et la mise au point de solutions robotisées pour les moyens de production existants ou en développement.

Parmi les tâches de l'intégrateur, on peut citer :

- Définir le cahier des charges de la solution robotisée qui peut faire appel à plusieurs fournisseurs d'équipements en prenant en compte tous les paramètres nécessaires (vitesse, précision, rayon d'action, charges à transporter, flux, sécurité ...)
- Assurer l'intégration de la solution robotisée ainsi définie aux processus de l'entreprise
- Accompagner l'entreprise par les services de personnalisation dans l'utilisation du système robotisé, notamment :
 - o Assurer l'implantation et l'interconnexion avec d'autres systèmes de production de l'entreprise,
 - o Intégrer l'interfaçage avec les opérateurs et la sécurité de ceux-ci en respect des règles et normes en vigueur
 - o Réaliser des tests, analyser les résultats
 - o Définir avec les utilisateurs et fournisseurs des équipements un plan de formation adapté aux utilisateurs
 - o Définir et assurer l'interfaçage avec les outils périphériques permettant d'assurer la fonction finale du robot (préhenseurs, caméra....)

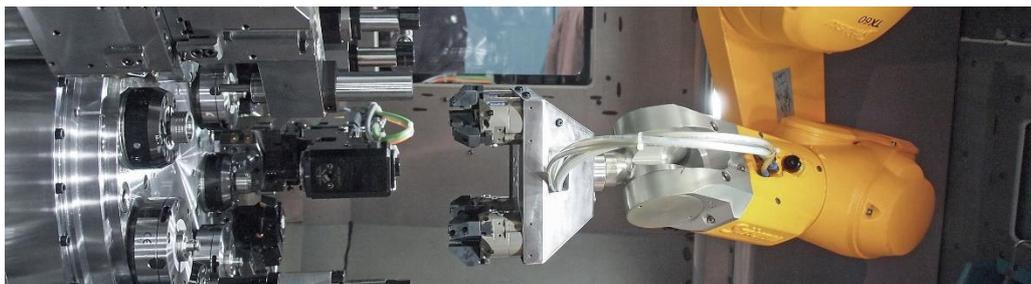


Figure 22. Robot Staubli, chargement, déchargement des pièces lors des opérations de production

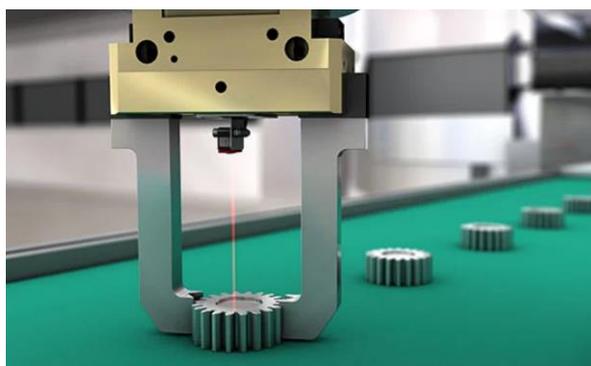


Figure 23. Détection de la présence d'une pièce



Figure 24. Robot de parachèvement développé par le Cetim et CTIF (©Cetim)

Robot mobile

Le robot mobile autonome ou AMR (Autonomous Mobile Robot) dispose des technologies de vision, de bras robotisé pour déplacer des objets, capteurs, caméras et de l'intelligence artificielle (IA) pour pouvoir se déplacer en toute sécurité dans une usine. Les technologies IA utilisées sont proches de celles utilisées pour les véhicules électriques autonomes en développement et en expérimentation aux États-Unis, en Europe et au Japon. L'interaction avec les opérateurs et le respect de la sécurité sont parmi les défis à relever par les constructeurs de ces robots. Les robots AMR offrent de nouvelles fonctions pour des tâches répétitives et diversifiées au sein de l'usine ; ce qui permet d'avoir le retour sur investissement plus rapide, mais également d'assurer la qualité de la production en maîtrisant les temps de transfert des pièces d'une machine à l'autre.

L'usage de ces robots nécessite de définir les zones de déplacements pour le robot, mettre en place des critères de sécurité et une haute fiabilité des systèmes de détection et du système IA du robot.

Il existe deux types de robot mobile :

- Autonome (AMR)
- Non autonome ou robot ou véhicule autonome guidé (AGV Autonomous Guided Véhicules)

Les robots AGV nécessitent la mise en place de système de guidage, comme les bandes magnétiques ou les capteurs pour guider le robot ; ce qui nécessite des investissements supplémentaires et réduit la flexibilité de ce type de solution.



Figure 25. Robot Mobile HelMo de Staubli

Cobot

Proches du robot, ces équipements sont des assistants à la manipulation d'objets, au déplacement de personnes. On peut retrouver les mêmes technologies (préhenseurs, vision...) que pour les robots mais le cobot n'est pas programmé pour exécuter des opérations répétitives, c'est l'opérateur qui agit, le cobot l'assiste dans ses tâches qu'il soulage grâce à des systèmes mécaniques, électroniques spécifiques à l'opération pour lesquelles il est fait. Une attention particulière est portée sur la sécurité de ce dernier.

Ils sont de plus en plus présent dans les ateliers car ils diminuent notablement les maladies musculo-squelettiques

Exosquelette

Comme le cobot, l'exosquelette porte assistance physique à l'opérateur mais, contrairement au cobot, il est étroitement associé à celui-ci. Véritable squelette externe de ce dernier, il soutient et intensifie ses mouvements grâce à des équipements mécaniques et électroniques complexes. L'ergonomie est ici primordiale pour son acceptabilité. Il est destiné pour soulager des taches particulièrement pénibles.

3.4.3 Simulation des flux, organisation de l'atelier de production

Cette thématique essentielle de l'usine du futur fait l'objet d'un intérêt qui ne se tarit pas. Le présent chapitre l'illustre en présentant quelques développements prometteurs qui ont été retenus par le Cetim dans le cadre sa veille technologique ; les éléments ci-après sont disponibles sur la mécaothèque du Cetim, voir [CET 22]) : Il convient aussi de signaler que le Cetim positionne certaines technologies comme prioritaires pour l'industrie mécanique à 2025, dont les technologies liées à l'industrie 4.0. Ces informations sont disponibles dans le document sur les *technologies prioritaires en mécanique*, voir [TMP 21].

3.4.3.1 Agilité des systèmes de production

Ces systèmes de production sont basés sur un processus par lequel une entreprise apporte à ses clients un produit ou un service personnalisé. Ce type d'entreprise met en œuvre les technologies et les méthodes permettant une variété de produits qui répondent rapidement à la demande des consommateurs. Dans cet objectif, il est nécessaire d'une part de renforcer la relation avec le client, via une expérience client personnalisée, d'autre part de développer la flexibilité de l'outil de production.



Défis à relever

L'adaptation rapide aux demandes spécifiques des clients nécessite de relever les défis suivants:

- remettre en question les stratégies industrielles, y compris les mécanismes de création de la valeur de l'entreprise,
- automatiser totalement des chaînes de production pour les adapter, de façon fluide, aux commandes personnalisées,
- assurer la continuité numérique de la chaîne de production,
- réduire le coût de la production personnalisée,
- raccourcir la chaîne logistique entre le fabricant et l'utilisateur,
- simplifier la démarche de personnalisation des caractéristiques des produits, demandées par l'utilisateur,
- disposer de méthodes de conception, permettant la personnalisation de masse en production

Indications pour réussir la personnalisation de masse

D'une façon plus concrète, les indications suivantes doivent être prises en compte :

- Les fonctionnalités de personnalisation de masse portées par la continuité digitale ont vocation à être déployées à l'échelle de l'entreprise ; elles ne peuvent donc être pensées comme des achats technologiques à petit budget, à l'échelle d'un service ou d'une usine seulement.

- Chercher à se doter des tout derniers concepts technologiques « à la mode » est une approche qui n'est ni stratégique, ni visionnaire : En fait, pour mettre en œuvre le projet, il convient avant tout de comprendre ce qu'est une plateforme d'innovation; l'objectif est de déployer celle-ci et de l'exploiter à l'échelle de l'entreprise, en collaboration avec les systèmes métier back-office.

- La plupart des fabricants utilisent la modélisation et la simulation 3D, dans la conception et l'ingénierie des produits. Il convient aussi d'utiliser ces fonctionnalités pour définir, tester et améliorer leurs processus de fabrication.

- En fait, au cours des prochaines années, la modélisation 3D sera pleinement intégrée aux opérations de fabrication et aux solutions de gestion de l'exécution, afin de créer une véritable continuité digitale, dans la fabrication.

- Les technologies vont et viennent mais, en fin de compte, ce sont les processus métier qui assurent de bout en bout la continuité digitale, de l'idéation à la livraison du produit, en passant par le service sur le terrain. Finalement, les processus sont la clé du succès de la personnalisation

- Pour gagner en agilité, les entreprises doivent utiliser une plateforme d'innovation centralisée, fondée sur les technologies 3D et orientée, à la fois sur les processus et les produits. Elles peuvent ainsi modéliser et unifier les sources de données issues de sources uniques, sur toute la chaîne de l'ingénierie et de la fabrication. Les industries pourront bientôt mettre en œuvre des processus de fabrication en circuit fermé. Les ateliers de fabrication seront entièrement simulés au sein d'un espace virtuel, avant même qu'un investissement en capital ne soit réalisé. La personnalisation de masse deviendra véritablement centrale pour l'entreprise.

Exemples d'application

- **Automobile**

Les ateliers « BMW Individual » permettent au client de participer au « design » du véhicule, et utilisent un système de codification afin d'assister les ouvriers, lors de la production. Les modèles de véhicules nécessitant une finition spécifique quittent automatiquement la ligne de montage pour en rejoindre une autre.



- Numérique

. Développement de plateformes de personnalisation basées sur la réalité augmentée (RA)) et accessibles aux utilisateurs, Voir §3.3.2.

. Développement de logiciels de simulation permettant d'intégrer d'une façon fluide/flexible les données personnalisées.

- Médical

. Développement de bio-implants personnalisés en se basant sur la simulation et sur l'impression 3D pour la fabrication du tissu.

. Idem pour des prothèses

- Luxe

Lacoste personnalise les chaussures, avec un message écrit préalablement sur une tablette et un bras robotisé muni d'un stylo.

3.4.3.2 Un exemple de poste de travail pour l'industrie du futur

Ce domaine de recherche est lui aussi en plein essor. Sans chercher à être exhaustif, voilà dans quel environnement se mouvra le « col gris », assisté d'outils « intelligents », à son poste de travail personnalisé. Le projet « FuturWorks360 » du Fraunhofer Institut IAO a été présenté sous forme d'une visite virtuelle le 31 mars 2020.

Atelier à la fois réel et virtuel

Les postes de travail, l'environnement, les formes d'organisation homme machine-logiciel présentent des scénarios d'application réalistes qui façonneront le travail de demain.

La plateforme en ligne permet de visualiser la fabrication additive, les systèmes d'assistance en montage, la planification numérique et la production en réseau.

Poste de travail intelligent

Il réfléchit avec l'opérateur et lui fournit les informations les plus importantes. L'opérateur peut faire appel, via un « Cloud »(serveurs distants interconnectés), à des outils de contrôle et de qualité, à des mécanismes d'assistance, limitant l'effort de mise en œuvre et prenant en compte le niveau de formation du monteur pour agir de manière flexible.

Fabrication additive (FA) 7 axes en réseau

Une table rotative et pivotante permet un alignement flexible des composants pendant le processus d'impression, évitant l'utilisation de supports, minimisant l'effet d'escalier et permettant une meilleure microstructure de surface ,voir § 3.4.1.

Jumeau numérique géométrique (positionnement en intérieur)

Un système « 3D NavVis M6 Indoor Mapping » capture l'environnement à 360°, permettant ensuite de réaliser la modélisation et d'ajouter des marques, repères, liens vers de l'information additionnelle.

3.4.3.3 Concept de l'usine Ultra-Efficace

Ce concept concerne « La circulation des matériaux et de l'énergie, sans émissions et sans déchets »

L'Ultra-Efficacité

L'Ultra-Efficacité est un concept pour les entreprises de toute taille et de tout secteur.



Chaque entreprise étant unique, il ne peut y avoir de moyen standardisé vers l'ultra-efficacité. Il convient donc d'examiner chaque entreprise individuellement, de définir le potentiel d'ultra-efficacité pour chaque cas particulier et de développer un concept adapté.

L'une des bases les plus importantes pour la mise en place d'une usine ultra performante est de créer la plus grande transparence possible, entre autres sur les flux des matériaux et d'énergie, les processus et les activités. C'est pourquoi, le modèle de l'usine ultra-performante convient à tous les types d'entreprises.

De la place pour les grandes étapes de développement

L'étape entre le point de départ et la vision souhaitée est relativement longue. Cela s'explique par l'ambition de ne pas viser exclusivement de petites améliorations.

Cette approche donne lieu à un plus grand potentiel ; la vision fournit des incitations laissant la place à des étapes de développement majeures ; Il est donc intentionnel que la situation existante ne soit pas nécessairement utilisée comme un point de départ pour apporter des améliorations réalistes mais mineures. Le terme « ultra-efficacité », employé dans le sens d'une efficacité supérieure à ce qui est actuellement réalisable, traduit cette façon de penser. L'importance des étapes franchies sur le chemin de l'usine ultra-performante et leur aspect réel dépendent de chaque entreprise.

Exemple d'application

A titre d'exemple, dans le cadre du projet « *L'usine ultra-efficace – production économe en ressources, sans émissions, dans les zones urbaines* », le Fraunhofer Institut IGB a développé une approche intégrée de la production durable concernant l'optimisation de la technologie des procédés dans les domaines suivants : la gestion de l'eau, le traitement des eaux usées industrielles, la technologie environnementale ainsi que la récupération des produits, à partir de résidus organiques.

3.5 Les matériaux du futur

Tout est matériau, les matériaux sont partout et servent l'ensemble des marchés d'usages stratégiques: Santé, Mobilité, Bâtiment, Énergie, Luxe... mais leurs positions transversales et amont font que leurs rôles sont bien souvent méconnus voire oubliés, voir [SFM 21].

3.5.1 Les matériaux et innovations

Les matériaux permettent de transformer les idées en réalités concrètes et sont donc au cœur de l'innovation. Les matériaux avancés et actifs ont même été définis comme la technologie clef n°1 dans une étude de la DGE sur la préparation de l'industrie du futur. Donc pas de relance sans Matériaux, voir [LIE 14].

Les solutions sont multi-matériaux; elles doivent être pensées en cycle pour leur utilisation : du « berceau au berceau et non plus à la tombe », c'est *l'économie circulaire*, un point clef du « Green deal ». Les transitions numériques et écologiques impactent l'industrie des matériaux (procédés, choix des matériaux, éco-conception des solutions) et inversement les matériaux sont essentiels pour la réussite de ces transitions (les robots, les capteurs, l'internet des objets), les batteries, les stockeurs d'hydrogène, les bâtiments à énergie neutre). Dans le domaine médical, des biomatériaux toujours plus bio-inspirés et multifonctionnels se développent tant pour une médecine de masse que personnalisée...

3.5.2 Les matériaux restent une clef pour le futur de l'industrie et de la société

La métallurgie du futur bénéficiera du caractère « flexible » des métaux et des alliages métalliques (points de fusion, plasticité, variétés d'alliages extrêmement grandes, large gamme de microstructures, de phases et de



propriétés). C'est cette flexibilité des alliages métalliques qui est à l'origine de leur fort impact sur le développement industriel, l'économie et la société. La science et la technologie en métallurgie ont produit pendant des décennies.

Cette flexibilité est bien adaptée pour initier de nouvelles approches et de nouvelles méthodes de conception de matériaux. La complexité qui y est associée demandera d'être abordée par les outils naissants autour des approches combinatoires, des méthodes de caractérisation à haut débit, de la fouille de données, de la modélisation, et des méthodes de l'intelligence artificielle.

De plus la notion de « matériau de la Mécanique » évolue, en fonction de l'environnement et des conditions souvent complexes de sollicitation d'un composant mécanique, qui conduisent à exposer principalement la surface (cas d'endommagement par fatigue, corrosion, « fretting », usure) et qu'il convient de renforcer à l'aide de traitements superficiels ou de dépôts, ayant des compositions et des caractéristiques adaptées.

Grâce à de tels traitements par voie humide (revêtements chimiques, électrolytiques...) ou par voie sèche (revêtements sous vide PVD ou CVD, projection thermique...), il est possible de générer un nouveau « matériau de surface » adapté à l'emploi.

Par ces traitements, il est possible de créer de nouvelles surfaces fonctionnelles, qui répondent à une ou plusieurs fonctions (par exemple : résistance à l'usure + résistance à la corrosion + esthétique). La réalisation de co-dépôts, dépôts multicouches ou composites permet ainsi de répondre à des sollicitations en service, diverses et combinées.

Ainsi, aux gradients thermique, mécanique ou physicochimique, imposés en service, répond un matériau à gradient de microstructures. Ce type de démarche, déjà largement utilisée, devrait se déployer dans le futur grâce à des nouveaux moyens de traitement et de dépôts, pour de nouvelles applications.

Les principaux défis des polymères et composites concernent principalement la gestion de la complexité structurelle et des propriétés physiques associées à divers nouveaux matériaux polymères hybrides. Ces matériaux futur devront répondre aux exigences de performance et de sécurité des polymères et composites du quotidien, tout en intégrant la vitesse et la sobriété de développement, de personnalisation, voire de simplicité d'innovation. Pour cela plusieurs approches complémentaires devront être mises en oeuvre:

- Faire appel à *la simulation numérique* de manière complémentaire aux approches théoriques et expérimentales en prenant en compte de manière plus fine les conditions aux limites des propriétés du matériau.
- Innover sur *la modélisation des couplages photo-hydro-chimio-thermomécaniques* sous sollicitations statique et dynamique (fatigue) pour une estimation réaliste des durées de vie.
- Répondre à la question : *peut-on tirer des lois de comportement des relations microstructures/propriétés pour bâtir des modèles prédictifs?* Sachant qu'une loi de comportement est spécifique à chaque matériau, qu'elle doit représenter le matériau dans toutes les situations très diverses de vitesse et de température.
- Utiliser les *apports de l'Intelligence Artificielle* pour l'accélération des développements dans le domaine de la formulation et des mises au point de procédés.
- Respecter les *enjeux environnementaux* de recyclabilité et de durabilité des propriétés des polymères issus : une exploration fine de la relation structure-propriété des matériaux écologiques est nécessaire.
- Tirer profit des *outils de la plasturgie tels que l'extrusion réactive et/ou multi-nanocouches* pour structurer les matériaux polymères aux différentes échelles.

La combinaison de ces processus/nanostructures devrait apporter à *l'avenir des systèmes stimulables, des capteurs et desactionneurs innovants*. L'importance de la prise en compte des *divers couplages électrique, mécanique et thermique* et l'ouverture vers d'autres disciplines pour chercher des informations complémentaires (propriétés diélectriques par exemple) par l'étude des dynamiques relaxationnelles et des propriétés couplées sont des domaines riches d'applications issues du contrôle des diverses échelles de structuration.



3.5.3 Les matériaux et la transition écologique

L'industrie métallurgique, indispensable pour créer des matériaux de structure en particulier, se trouve face aux trois défis majeurs:

- la réduction de l'empreinte environnementale (et des émissions de CO₂) des procédés métallurgiques en phase liquide,
- l'optimisation des performances et de la durabilité des alliages métalliques industriels par le design des microstructures ;
- le recyclage des matériaux métalliques.

Une écoconception des matériaux et alliages est devenue indispensable. Il existe, aujourd'hui, un trop grand nombre de matériaux ou alliages qui au mieux ne sont recyclables que sur eux-mêmes et au pire pour lesquels il n'y a pas de valorisation possible. Pendant des décennies nous avons cherché à améliorer les performances des matériaux sans se préoccuper de leur valorisation en fin de vie. D'autre part lors de la collecte, du démantèlement (déconstruction) et du recyclage, il n'est pas toujours possible de trier et de séparer tous les types de matériaux et plus particulièrement ceux qui sont incompatibles entre eux. Les moyens de tri sélectifs doivent progresser mais ils ne seront pas suffisants.

Les nouveaux matériaux et alliages doivent aujourd'hui être conçus en intégrant les contraintes environnementales et de recyclage. Ceci conduit à ajouter de nouvelles contraintes dans la conception d'alliages telles que l'impact des impuretés provenant du recyclage, les risques de pollution indirecte par mélange lors du recyclage ou à l'inverse la compatibilité avec d'autres matériaux, la rareté, l'impact écologique...

De nouvelles méthodes numériques de conception d'alliages pourraient permettre de délimiter de nouveaux domaines d'exploration de composition et aussi de permettre une meilleure tolérance des alliages aux « impuretés » issues du recyclage.

3.5.4 Les besoins en matériaux de la société du futur

Les besoins changent... tout en restant constants. Nous aurons toujours besoin de produire l'énergie, de construire nos infrastructures, de nous déplacer et de nous soigner. Pour mieux construire nos infrastructures et mieux utiliser l'énergie dont nous disposons, il faudra développer de nouveaux matériaux à très forte capacité d'isolation (type aérogels ou isolants, à « capacité de guérison », pour des solutions plus durables .

- Le sujet *des matériaux pour l'énergie* couvre un vaste domaine. L'énergie fait partie des challenges sociétaux fondamentaux, sur deux volets : l'écologie (réduction des émissions du CO₂ par le développement des énergies décarbonées) et l'autonomie économique. Dans ce domaine, des progrès notables sont attendus des développements de nouveaux micro et nano-matériaux pour une électricité verte abondante. Les méta-matériaux et leurs propriétés électromagnétiques hors du commun sont potentiellement des solutions pour le futur. Les matériaux poreux ont un bel avenir devant eux : ils sont de plus en plus utilisés pour la séparation, le stockage et la compression des gaz et, comme support de catalyseurs dans les applications liées à l'énergie, telles que les électrodes de piles à combustible, électrolyseurs et super condensateurs.

- *L'hydrogène* est prometteur pour une *production/stockage/consommation* de proximité, évitant toute importation. C'est un *vecteur d'énergie* à utiliser dans une approche de filière décarbonée, via l'utilisation d'énergies renouvelables (photovoltaïque et éolien) pour aller vers l'électrolyse de l'eau. Des besoins en développement des matériaux pour ces usines d'électrolyse et pour le stockage d'énergie aussi peuvent devenir critiques pour la filière.

- *Le nucléaire, l'éolien*, et le photovoltaïque doivent être regardés dans une approche d'économie circulaire (démantèlement, réutilisation, réparation, recyclage, ...). Le recyclage des matériaux du



nucléaire, le reconditionnement de composants des éoliennes, et des centrales photovoltaïques, constituent des filières économiques d'importance majeure.

- *Le secteur de la mobilité* est en train de devenir de plus en plus « électrique » et par là même connecté avec les nouveaux développements de l'énergie sans oublier la poursuite de la chasse aux kilos au travers d'une optimisation du choix des matériaux dans un compromis sécurité/ autonomie.

- *Le domaine de la santé* continue à former un grand défi pour les matériaux.

En plus des développements déjà classiques (implants, prothèses, ...), le développement debiomatériaux et nano-systèmes bio-inspirés pourrait être renforcé pour la mise au point de solutions toujours plus biocompatibles voire multifonctionnelles.

Concernant les risques sanitaires, le développement de surfaces et de matériaux anti bactériens, virucides, auto nettoyants, anti salissures, est devenu une nécessité. Diverses approches antimicrobiennes sont en développement, soit à base de métaux/couches métalliques antibactériennes, soit de systèmes céramiques ou polymères.

3.5.5 La conception des futurs matériaux passe par le numérique

La simulation numérique est au cœur de l'Industrie 4.0 de l'élaboration, de la transformation et du recyclage des matériaux; elle sert généralement l'un des trois objectifs suivants, le plus souvent interdépendants :

- la découverte et le développement de nouveaux matériaux et alliages;
- l'optimisation d'alliages existants vis-à-vis de leurs propriétés;
- l'optimisation de procédés en termes d'efficacité (économies d'énergie et de matière) et de robustesse.

L'évolution de ce dernier domaine suit l'accroissement continu de la puissance des moyens de calcul. Parce qu'il est maintenant possible de réaliser des simulations de plus en plus réalistes à une échelle donnée, on a perçu plus récemment tout l'intérêt pour les matériaux de structure,

- de réaliser des simulations multi-échelles et multiphysiques,
- et de suivre une démarche dite ICME (*Integrated Computational Materials Engineering*), où les processus d'optimisation intègrent tous les maillons de la chaîne de production et d'utilisation d'un matériau.

Aujourd'hui, le « matériau numérique » commence à être employé pour des pièces à haute valeur ajoutée, il est destiné à se généraliser et à court terme conditionnera la compétitivité de nos entreprises. En effet, les gains considérables de performance des moyens de calcul, des méthodes numériques et des techniques expérimentales dans la dernière décennie permettent aujourd'hui d'avoir accès à l'information locale au cœur de la matière et de la modéliser. De nouvelles stratégies de modélisation commencent donc à apparaître là où la physique considérée dans les simulations à l'échelle macroscopique se nourrit de simulations réalisées à l'échelle de la microstructure. Dans un futur proche, tous les types de matériaux, et donc tous les secteurs d'activités seront concernés par cette révolution.

3.6 Les assemblages par procédés innovants

3.6.1 Contexte

Le chapitre précédent a insisté sur la multiplicité des matériaux disponibles ou qui peuvent être développés aujourd'hui. Comme l'industrie tend vers l'assemblage de sous-systèmes complexes fabriqués en économie étendue, cet hyper choix « matériaux » permet de sélectionner sur chaque partie élémentaire d'un



composant industriel, la ou les solutions les mieux adaptées, conduisant à l'utilisation de plusieurs types de matériaux sur une même pièce.

Cependant, contrairement à la mise au point d'une pièce monolithique, l'optimisation d'un tel composant mécanique nécessite de concevoir des assemblages permettant sa réalisation.

3.6.2 Position du problème

L'utilisation croissante des composites légers présente un challenge mais aussi des opportunités. L'un des défis principaux est l'assemblage sûr de ces matériaux. En général, les systèmes de fixation conçus pour les tôles métalliques comme les rivets ou les boulons et les fixations serties conçues pour le métal sont incompatibles avec les composites ou nécessitent certains compromis. Les ingénieurs en conception et en processus doivent généralement faire face à un choix de fixations limité quand ils travaillent avec des composites

En fait, les problématiques posées par les nouvelles techniques d'assemblage, se situent à l'échelle matérielle, interfaciale, ou structurale. Elles concernent plusieurs préoccupations telles que la prévision et la caractérisation de leurs performances « mécaniques », la maîtrise de la qualité des procédés, les processus de qualification/certification associés, les capacités de modélisation fine, de dimensionnement et d'analyse structurale, que ce soit en termes de durée de vie (fatigue et vieillissement) ou de tenue (statique et dynamique).

Certaines ruptures conceptuelles ou technologiques sont attendues dans le développement de certaines des techniques d'assemblages jugées prometteuses (collages, soudages, etc), et dans la proposition de stratégies de modélisation avancées (analyse multi-échelle, modélisation probabiliste, etc) qui devraient permettre à terme de mieux spécifier, dimensionner et certifier ces assemblages structuraux.

3.6.3 Les marchés impactés

Dans le domaine du transport, l'Aéronautique et l'Automobile sont particulièrement impliqués dans l'utilisation des matériaux composites.

- AERONAUTIQUE : Efficience énergétique, allègement, coût et augmentation des cadences ; il s'agit d'obtenir le maximum de résultats avec le minimum de moyens, de coûts, d'effort ou d'énergie
- AUTOMOBILE : Allègement via l'utilisation des matériaux composites, *pour répondre aux contraintes réglementaires d'émissions de CO2*
- INDUSTRIE MECANIQUE et FERROVIAIRE: Performances et coûts

3.6.4 Défis des assemblages liés aux composites

Les principaux défis sont les suivants :

- Performances : durabilité, robustesse et fiabilité.
- Réponse aux exigences de baisse de consommation énergétique, via entre autres le concept « multimatériaux ».
- Réduction des *coûts produit-process-industrialisation*.
- Respect des exigences du *produire propre*.

Ainsi, chaque jour, les fabricants doivent faire face aux défis de l'assemblage. Certains de ces défis sont plus présents que d'autres; c'est le cas, en particulier, de ceux liés aux matériaux composites. En effet, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés et génèrent certaines difficultés en matière de choix de solutions d'assemblage et donc de conception.



Cependant, 50 à 70% des causes d'avaries sont liées aux assemblages ; c'est pourquoi 15 à 20% des budgets R&D sont consacrés à leur conception.

3.6.5 Verrous technologiques

Ils concernent à la fois :

- les matières premières et les constituants (matrices et renforts) : associer les chimistes pour la maîtrise de la formulation et la performance des matériaux ;
- les équipements : généraliser la robotisation des procédés, assurer un contrôle en continu, développer le pilotage auto adaptatif ;
- les logiciels : simuler le comportement des assemblages, développer des solutions multi matériaux, prendre en compte la variabilité des procédés, grâce à la maîtrise des procédés par la simulation numérique et l'aide d'approches stochastiques/en contexte aléatoire ;
- la filière recyclage : proposer une stratégie et des technologies pour le recyclage des matériaux composites, adapter les technologies de mise en œuvre pour valoriser les déchets et les semi-produits issus de recyclage ;
- le contrôle : les assemblages innovants ne peuvent être utilisés dans les domaines à forte exigence de sécurité que si leur contrôle est possible.

3.6.6 Les axes de recherche

Les activités de recherche portent principalement sur le développement, la caractérisation et la modélisation de techniques permettant d'assembler des matériaux de natures différentes. Elles s'appuient sur la nécessité de développer des moyens d'assemblages innovants couplés à des méthodes de dimensionnement prenant en compte les conditions en service. Parmi les moyens d'assemblage, le collage et le soudage sont des techniques reconnues et déjà beaucoup étudiées. Cependant l'apport de nouveaux matériaux allié à une volonté d'atteindre des performances en termes de vitesse d'assemblage ou de caractéristiques mécaniques, conduit à introduire des techniques hybrides (exemple: boulonnées-collées) demandant à ce jour des études approfondies.

Trois axes principaux de recherche sont actuellement considérés:

- l'étude et l'optimisation des procédés d'assemblage qui s'appuie sur la simulation numérique des procédés d'assemblage,
- la caractérisation de la tenue à long terme des assemblages qui utilise la simulation numérique des comportements mécaniques,
- le développement de techniques d'assemblage hybride, pour les structures hybrides/mixtes.

Dans les recherches récentes, la part de la simulation numérique apparaît comme essentielle dans la connaissance du comportement d'un assemblage. A la modélisation classique, « globale » de l'assemblage qui a pour but de déterminer rapidement l'ordre de grandeur des sollicitations (par des méthodes analytiques ou pseudo-analytiques), vient se substituer, dans une première approche, une modélisation d'ensemble « loin des liaisons », à l'aide de modèles plaques/coques/3D et de connecteurs (liaisons), afin de prévoir le comportement mécanique de l'assemblage ; de son côté une modélisation macroscopique conduit à une description fine des liaisons qui permet d'accéder aux phénomènes non linéaires (contact, frottement).

A titre d'exemple, le projet CARAB (Conception Avancée Robuste pour les Assemblages Boulonnés) qui vient de s'achever a réuni un certain nombre d'industriels et de laboratoires académiques, afin de proposer une première formulation d'un connecteur éléments finis pour la simulation des assemblages boulonnés.

Les travaux réalisés avaient pour ambition de proposer une formulation simplifiée de boulon, capable de simuler un comportement sensiblement équivalent à un boulon discrétisé en 3D. Dans cette étude, ce connecteur a la particularité de prendre en compte le contact frottant entre les pièces assemblées ainsi que la pré-charge et le jeu. Son comportement non linéaire est décrit en connaissant uniquement quelques



paramètres physiques (valeur de pré-charge, coefficient de frottement...) qui peuvent être déterminés à l'aide d'une procédure d'identification basées sur des modèles simplifiés (VDI par exemple), des simulations numériques 3D ou des essais.

D'un point de vue industriel, l'enjeu était triple:

- permettre des gains en termes de mise en œuvre de modèles et de temps de calculs,
- conserver un bon niveau de précision globale,
- pouvoir faire varier des paramètres (pré-charge par exemple), sans devoir ré-identifier le modèle de recyclage.

3.6.7 Assemblages et contrôle

Les travaux de recherche et développement dans ce domaine du contrôle occupent une place particulière dans les cas des marchés considérés; ils se focalisent autour des quatre thématiques suivantes :

- la mise au point de méthodes de contrôle santé automatisées et adaptées aux pièces et aux procédés utilisés. Prédiction numérique de l'endommagement induit par les procédés,
- l'association de la détection des défauts à l'analyse du comportement des structures classiques et nid d'abeilles (statuer sur la nocivité puis l'admissibilité des défauts de fabrication),
- le développement de techniques de détection et d'analyse de la nocivité des défauts induits (chocs, foudre, brûlure, etc.),
- l'amélioration des technologies de réparation des pièces.

3.7 Choix des capteurs dans l'industrie

L'intégration de la mesure physique à l'aide de capteurs intelligents dans les produits, les composants, et les machines devient une plus-value technique fondamentale. Le développement de l'internet des objets, qui se généralise sur des milliards de produits, révolutionne le marché des capteurs estimé au niveau mondial à 70 M €, Voir [ASC 17].

Un capteur permet d'obtenir une grandeur électrique à partir d'une grandeur physique. Cette mesure physique passe par la maîtrise de toute la chaîne : intégration du capteur, transmission des informations, traitement des données et le choix de l'instrumentation associée.

3.7.1 Les différents types de capteurs

Il y a différents types de capteurs (mécanique, électronique, pneumatique) qui fournissent des informations sur les caractéristiques des équipements et des machines: capteurs à fibre optique, capteurs piézoélectriques, à courants de Foucault, jauges de déformation, thermocouples, MEMS (Micro-Electro-Mécanique System),

Les capteurs les plus répandus sont : les capteurs de pression, de température et de déplacements. Ils sont essentiellement dans les marchés du transport (automobile, aéronautique, ...), de l'industrie des machines et du médical.

3.7.2 Les tendances technologiques

Dans un monde technologique où les produits et les services sont en constante évolution, nous constatons que les capteurs ne peuvent échapper à la tendance générale des technologies du futur (c'est une réalité): recherche de baisse de consommation, capteur écologique, capteur associé à l'internet des objets (IoT) et au



secteur de la « e-mobilité ». En résumé on recherche à réaliser un capteur plus sûr, plus efficace, à faible coût, plus sobre, miniaturisé, etc

Malgré des progrès importants réalisés, plusieurs verrous technologiques demeurent, en premier lieu l'autonomie énergétique : présence de capteurs communicants (smart) et développement de capteurs à faible consommation. Dans ce domaine on peut citer les travaux réalisés par le Cetim sur des structures hybrides piézo-électriques et les technologies des jauges de déformation.

3.7.2.1 Suivi et surveillance

La nécessité du suivi en temps réel des modes de défaillance et de leur caractérisation, conduit à faire appel à de nouvelles techniques qui permettent d'obtenir des résultats en temps réel. Cela rend nécessaire l'utilisation d'algorithmes qui permettent de traiter des grandes masses de données d'où la nécessité de faire appel à des logiciels d'intelligence artificielle qui facilitent ces traitements et permettent d'obtenir en temps réel une exploitation plus pertinente de ces données, voir [SHM 21].

La méthode CND basée sur l'émission acoustique, permet en temps réel de détecter les endommagements au sein du matériau et d'identifier la zone de défaillance et localisés des défauts (déformations, ruptures, fissures, ...) dans l'ensemble de la structure. Cette méthode est très utilisée pour les équipements sous pression (E.S.P), voir [COF 21].

La seconde technique qui se développe fortement est le "Structure Health Monitoring" (SHM), qui permet le contrôle de santé intégré des structures voir [SHM 21]. Les méthodes correspondantes sont appliquées dans l'aéronautique et le génie civil pour détecter les fissures et tous les mécanismes irréversibles. Certains laboratoires travaillent sur la technique basée sur les capteurs ultrasonores (champs diffus ou ondes de surface); pour cela il faut accéder à des approches multi échelles et multi physiques.

3.7.2.2 Capteurs IOT (ou IIoT)

L'internet des objets (IoT) concerne l'utilisation de moyens de mesure intelligents (Smart) dans les produits, les équipements, les composants mécatroniques et les machines industrielles. Il est nécessaire pour ces capteurs embarqués qu'il soit équipé d'algorithmes permettant le traitement local du signal, la récupération de l'énergie, etc...

Pour le développement de réseaux mondial d'objets connectés qui se comptent actuellement en milliards, des capteurs se sont développés au même rythme. Ces réseaux sont amenés donc à être plus communicants et pour cela il convient de développer des protocoles de communication plus rapides et d'utiliser des capteurs plus sécurisés: sur ce point, une capture sans fil est constituée d'une source d'énergie et de 3 unités : mesure, traitement, et transmission. Dans ce cas, la gestion des données doit sécuriser la transmission des données pour prévenir les risques de cyberattaque. En effet, la donnée constitue un patrimoine stratégique.

3.7.2.3 Capteurs dédiés

Il existe également des capteurs dédiés à une famille de machines ou d'équipements.

Citons à titre d'exemple: le capteur constitué de 2 grandeurs physiques (émission acoustique et vibration) utilisé pour la surveillance d'usure et de la tête d'outils voir [CHE 18].

En contrôle non-destructif (CND), la transition écologique et environnementale exige le développement de technologies « propres ». C'est pourquoi on assiste au développement de capteurs CND, comme les caméras utilisées en thermographie active comme alternative aux méthodes telles que le ressuage et la magnétoscopie.

Le développement de capteurs sans contact type sonde « Electro-Magnetic-Acoustic-Transducer » (EMAT) permet répondre aux enjeux liés aux structures industrielles non accessibles pour des raisons de



température, de surface ou d'espace d'accès. L'EMAT fonctionne grâce à l'interaction d'un champ magnétique haute fréquence (bobinage) et basse fréquence (aimant).

En CND, les capteurs à ultrasons sont des méthodes qui offrent le plus de potentiel industriel. En ce domaine, les capteurs à ultrasons multiéléments visent à remplacer plusieurs capteurs par une seule matrice qui permet d'augmenter la rapidité des contrôles, d'améliorer la traçabilité et d'obtenir des cartes de cartographie 3D en temps réel. Cette technologie des transducteurs multiéléments, inspirés du médical, se généralise pour différents types de capteurs et permet d'inspecter des structures complexes et de caractériser avec précision les dommages internes voir [CHE 08].

Un autre champ s'ouvre aux capteurs qui est la caractérisation des matériaux par des méthodes non destructives, ainsi le Cetim a développé avec d'autres partenaires un système hybride ultrason et micro-magnétique qui permet de contrôler en ligne des aciers avancés à haute résistance voir [DUP 10].

3.7.2.4 Maintenance prédictive et jumeaux numériques

Le capteur joue un rôle fondamental dans la chaîne d'acquisition et de traitement pour assurer la surveillance des équipements. En parallèle, la surveillance des ESP joue un rôle clé pour la maîtrise de l'intégrité, l'optimisation de la disponibilité et de la sécurité des unités de production. Afin de définir l'aptitude en service des ESP et de vérifier leur capacité à répondre aux exigences réglementaires, l'inspection évolue vers une véritable ingénierie de contrôle, combinant plusieurs techniques (multi-éléments, ondes guidées, etc.). Cette démarche permet de limiter les durées des arrêts d'exploitation. En effet, on sait que plus de la moitié des temps d'arrêt des machines et des installations sont évitables si l'ensemble des dispositifs de surveillance par des capteurs sont correctement mis en œuvre.

Le suivi en temps réel concerne aussi d'autres équipements tels que le suivi de la santé des éoliennes. Ces structures d'accès difficile, particulièrement en offshore, peuvent être surveillées par une combinaison de capteurs (émission acoustique, vibration, pression,) pour détecter les dysfonctionnements et estimer la durée de vie résiduelle des structures. Dans ce domaine, il est fait de plus en plus appel à des approches basées sur la probabilité de détection (POD).

Les jumeaux numériques qui, pour répondre aux problématiques de la maintenance prédictive, permettent d'actionner à distance des commandes, nécessitent en premier des capteurs et des travaux pour leur bon positionnement. Cela ouvre un nouveau métier d'architectes de l'instrumentation des capteurs dans les jumeaux numériques.

Une autre tendance consiste à surveiller les équipements et les installations avec des capteurs sans fils et sans câbles, d'où le développement des technologies sans fils et autoalimentées qui permet à des techniques comme le SHM de se développer.

3.7.2.5 Exemples

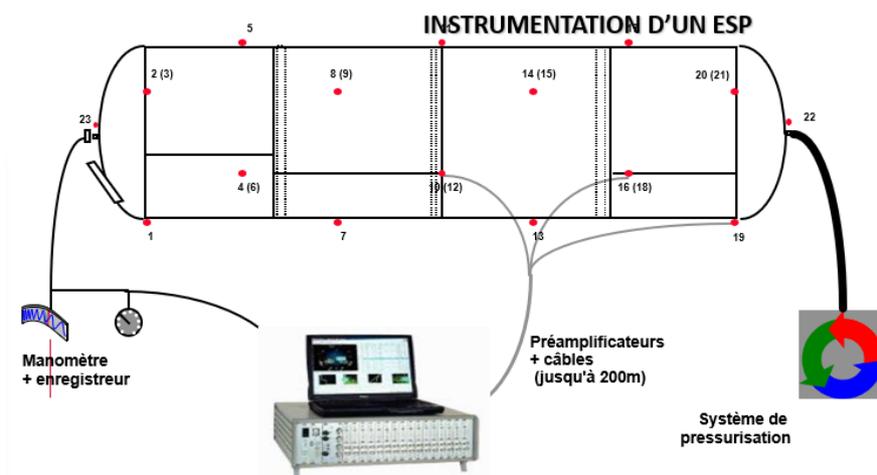


Figure 28. Equipement sous pression (ESP) instrumenté par des capteurs, [AFI 21]

La figure 28 schématise un équipement sous pression (ESP) instrumentés par des capteurs d'émission acoustique et surveillé lors de la mise sous pression : l'objectif de ces essais est la surveillance des ESP ou leur requalification (en alternative à l'épreuve hydraulique) des équipements ESP selon le guide GEA en émission acoustique (disponible sur [AFI 21]) www.afiap.org.

Grâce à un maillage adapté, les capteurs permettent de détecter tous les défauts évolutifs, de les localiser et de caractériser leur intensité et à l'aide d'autres capteurs (à ultrasons, à courants de Foucault,...), de pouvoir caractériser leur nocivité des défauts et à l'aide de la Mécanique de la Rupture et de pouvoir estimer la durée de vie résiduelle de la structure ou du composant industriel.

3.7.2.6 En guise de synthèse

Les capteurs sont un enjeu dans plusieurs domaines: internet industriel des objets (l'IoT), les jumeaux numériques, la robotique, ...et pour toutes ces raisons et d'autres, les capteurs continueront à jouer un rôle fondamental dans l'innovation et les nouvelles technologies. Leur développement nécessitera des progrès scientifiques et techniques sur plusieurs axes et sans être exhaustif, on peut citer les suivants :

- continuer à améliorer la sensibilité, l'autonomie, la communication ;
- poursuivre le développement des réseaux de capteurs (hybridation), pour améliorer leur fiabilité, leur robustesse en service et le chaînage numérique ;
- collecter massivement des volumes de données massives et des outils de datamining performants pour leur traitement ;
- améliorer la transmission des données à distance et leur traitement local ;
- permettre la conception de capteurs miniaturisés notamment grâce aux MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) ;
- favoriser le développement des capteurs bio-inspirés et quantiques en ouvrant de nouveaux chantiers.

4 L'HOMME CATALYSEUR DE L'INDUSTRIE

L'Usine du Futur requiert la montée en compétences des acteurs dans un souci d'employabilité. Les outils digitaux et les nouvelles ingénieries pédagogiques vont pouvoir soutenir la mise en adéquation des compétences nécessaires à l'adoption des nouveaux procédés et moyens de production. L'intégration de l'homme dans la chaîne de valeur est ainsi primordiale.



4.1 L'organisation du travail

L'industrie se transforme, bouleversée par l'introduction de technologies nouvelles (impression 3D, cobotique, automatisation, internet des objets, etc.) et la diffusion très large de nouveaux outils numériques. La mise en place de cette « industrie du futur » implique toutefois une élévation des qualifications de tous les salariés, l'apparition de nouveaux métiers et de nouvelles exigences en termes de compétences et une réorganisation profonde du travail.

Cela impacte le management et les modes de collaboration ainsi que la communication interne jusqu'à de nouvelles formes d'organisation du travail plus collaboratives, plus participatives tout en responsabilisant les salariés devenus polyvalents pour accompagner ces changements organisationnels.

Ainsi, l'entreprise connaîtra des transformations organisationnelles et managériales du fait de l'automatisation-numérisation dans l'usine du futur. Parler de « transformation » pourrait aussi laisser entendre que l'on passe d'un modèle d'organisation générale marqué par différents courants de pensées (taylorisme, organisation apprenante, « learn », etc) vers un nouveau modèle qui réponde à l'exigence accrue de compétitivité et d'agilité face à l'imprévu par une flexibilité pour s'adapter aux besoins du client ou de l'environnement.

Dès lors, on peut imaginer se projeter vers un modèle d'organisation combinant rationalisation du travail et participation des salariés : un modèle plus horizontal par le fait de l'autonomisation des salariés qui conduit souvent à un aplatissement de la ligne hiérarchique et plus « apprenant » qui favorise les capacités d'apprentissage en autonomie, les modes de travail en intelligence collective, susceptible de répondre à la fois aux besoins de la révolution numérique et aux aspirations nouvelles des salariés, de se réappropriier l'organisation de leur travail, de réfléchir sur son sens et son intérêt.

Cela implique d'inciter les salariés à avoir envie d'apprendre par eux-mêmes et à avancer vers l'autonomie, ce qui permet de réduire les temps de contrôle et de décision induits par la chaîne managériale et d'accroître leur pouvoir d'agir et de responsabilité.

Ces nouvelles formes d'organisations devenues plus responsabilisantes reposent de fait sur des liens de collaboration plus importants, renforcent l'autonomie, et développent l'implication des salariés. Ce qui sous-entend que les défis liés à la transformation numérique du modèle productif supposent de créer l'adhésion de tous.

4.2 La formation

Les mutations technologiques étaient lentes à venir à la fin du 20^{ième} siècle et laissaient le temps aux collaborateurs pour les appréhender. Cependant, nous nous inscrivons aujourd'hui dans un contexte mouvementé avec une révolution digitale rapide. La formation professionnelle et continue constitue donc un enjeu stratégique dans le cadre de l'Usine du Futur où les technologies sont sans cesse améliorées et où la polyvalence des collaborateurs s'impose. La formation professionnelle devient un élément incontournable de la rétention des talents en développant leur employabilité et en leur offrant un continuum de formation. Parce que les collaborateurs deviennent plus avertis, plus connectés et plus exigeants, les entreprises doivent leur proposer des formations efficaces, séduisantes, ludiques et adaptées.

Il est souhaitable que le salarié devienne alors acteur de sa propre formation. Nous sommes ainsi amenés à mettre à disposition de chacun des outils variés et des modules pédagogiques courts pour une formation adaptée et souple.

Le défi, c'est aussi de pouvoir développer un continuum de formation en réduisant l'écart entre la formation initiale, l'apprentissage et la formation continue et pourquoi pas la création de « learning factory » (mini centre de formation au sein des usines) pour plus d'agilité à l'exemple de :



- l'Innovation Center for Operations (ICO) créé par Boston Consulting Group et CentraleSupélec à Saclay,
- l'entreprise Festo, (spécialisée dans les systèmes d'automatisation), avec des programmes de formation se rapprochant le plus possible des conditions réelles de production pour assurer la mise à jour régulière des compétences des salariés,
- la plateforme «learning factory » de Saclay, pilotée par le Cetim (Centre technique des industries mécaniques),qui délivre des modules de formation continue sur toute la chaîne de la « conception aux matériaux-procédés », et combine formation continue et initiale, R&D et transfert technologique,
- « IT'm Factory » représentant le condensé d'une usine numérique physique et virtuelle sur les usages de l'industrie du futur (Réalité Augmenté/Virtuelle/Mixte, Cobotique, Jumeau numérique, Intelligence Artificielle, MES...) .Il sert à démontrer que l'intégration des nouvelles technologies est un levier de compétitivité pour former et accompagner les TPE, PME et ETI dans leur transformation digitale.

4.3 Qualité de vie au travail

La motivation est l'impératif numéro 1. Au-delà de la montée en compétences, l'employabilité requiert le développement de formats d'apprentissage efficaces, de dispositifs numériques qui facilitent à la fois l'industrialisation et la personnalisation, adaptés aux aspirations de réactivité des entreprises. Les PME sont aussi confrontées à des enjeux de transmissions des compétences. L'émergence de l'Usine du Futur remet aussi en lumière la problématique de recrutement. Les métiers industriels sont en forte tension à tous les niveaux de qualifications et plus particulièrement dans la branche métallurgie : automobile, aéronautique, ferroviaire... Cela s'explique avant tout par un problème d'attractivité malgré les initiatives existantes pour promouvoir ces métiers et la formation, à l'image du projet collaboratif « osons l'industrie » porté par Alliance industrie du futur ou le programme « Factory Lab », [EYM 17] , citer également la FIM [FIM 16]. La motivation est l'impératif numéro 1.

L'usine du futur, plus robotisée et connectée aux technologies numériques, change la qualité du management, la nature du travail, les conditions de travail, la qualité du travail, de même que le niveau des compétences.

Dès lors, dans un contexte d'évolution de l'organisation du travail, la qualité de vie au travail (QVT)* est aussi considérée comme levier de compétitivité parce qu'elle permet de mobiliser pleinement le potentiel des salariés, réel facteur d'attractivité, notamment dans le recrutement des jeunes.

Une entreprise qui donne de la latitude aux salariés pour s'exprimer et agir sur leur travail autour de modes d'organisation destinés à développer l'autonomie, la responsabilisation, la capacité à prendre des décisions, le dialogue entre les salariés et leur hiérarchie contribue à l'engagement et la motivation de ces derniers.

*Dans une approche de QVT, l'entreprise doit néanmoins être attentive au fait que la mise à niveau des compétences en lien avec l'introduction ou l'évolution d'une technologie ainsi que l'information provenant des différents objets connectés pourraient augmenter la charge cognitive par une grande quantité d'information envoyée aux salariés.

En outre, la sensation d'isolement des salariés dans une usine où la production serait assurée par des machines autonomes peut entraîner une destruction du sens du travail causé par la disparition des collectifs et des relations déshumanisées. Aussi, le développement d'environnements 4.0 devra se centrer sur la place des salariés, leur sécurité et leur confort en lien avec la surcharge cognitive et émotionnelle causée par l'automatisation intelligente.

5 EXEMPLES ET PERSPECTIVES



Les exemples choisis ci-dessous sont des entreprises qui se sont modernisées grâce aux solutions technologiques de l'industrie du futur, et qui figurent sur la plateforme *Alliance Industrie du Futur (AIF)*, voir[ALL 21-a], labellisée par le *Conseil National de l'Industrie*. Parmi le grand nombre d'entreprises citées par l'AIF le choix du comité mécanique a été conduit par les 3 critères suivants afin d'illustrer les propos des paragraphes précédents:

- L'aspect novateur de la technique concernant par exemple l'immobilisation réduite des machines et les possibilités de remodeler l'atelier en permanence, avec maintien de la qualité du service.
- la capacité d'organisation et d'adaptation des hommes impliqués dans les processus de production, l'homme restant au centre des montées en compétitivité.
- La réduction des coûts et des délais en maintenant la haute technicité et la compétition internationale tout en maintenant les sites de production en France.

Il s'agit ici seulement d'apporter quelques illustrations, ce qui implique la non-exhaustivité du choix ci-dessous qui pourrait rassembler un très grand nombre d'entreprises.

5.1 KALISTRUT AEROSPACE: robotisation du procédé de production

L'entreprise Kalistrut Aerospace réalise la conception et la fabrication de bielles mécanique pour les avions. L'entreprise a constaté que dans les opérations manuelles de chargement/déchargement de pièce, ils perdent beaucoup de temps et a envisagé, avec le soutien du Cetim, d'étudier l'opportunité de faire installer un robot pour ces opérations, voir [CET Info. 21]. L'intégrateur, en collaboration avec le Cetim et l'entreprise a défini et a programmé le robot deux zones afin d'assurer la sécurité des opérateurs. Une zone, dans laquelle l'arrivée d'un opérateur diminue la vitesse des mouvements du robot et une autre, dite « rouge », le robot s'arrête. Une fois la zone « rouge » est libre, le robot reprend ses tâches à exécuter. Pour automatiser le choix du préhenseur, l'intégrateur a développé, grâce à la fabrication additive, un préhenseur « universel » permettant de manipuler toutes les gammes de pièces fabriquées par l'entreprise.



Figure 29. Utilisation de robot pour le chargement et déchargement de pièces par Kalistrut Aerospace

5.2 FONDERIE DE SOUGLAND: organisation de l'atelier de production

Cette PMI de l'Aisne (02), créée en 1543, est une des plus anciennes entreprises industrielles française, voire européenne et mondiale, voir[ALL 21-b]. Elle opère dans de très nombreux secteurs d'activité (construction



navale, sidérurgie, incinération, ferroviaire...) et allie trois compétences: la fonderie, l'usinage et la mécano-soudure pour une production globale et intégrée.



Figure 30 : *Coulée matériaux ferreux (fonderie Sougland)*

Cette entreprise a pris l'initiative de créer un service R&D permettant de lancer des projets de recherche en recueillant parallèlement le savoir-faire historique de ses employés. Citons par exemple: La récupération des températures et du temps de cycle en vue d'une optimisation, les études au microscope des nuances d'alliages, les essais mécaniques, la simulation numérique des coulées, l'implication forte du personnel et des clients.

Ces actions ont conduit aux résultats suivants: maîtrise de plus de 300 nuances d'alliages, une garantie de conformité, une réduction des délais et des coûts, une offre sur mesure.

5.3 ARMOR : robotisation de procédés

ARMOR est un groupe industriel français, situé à la Chevrolière en Loire Atlantique (44), leader mondial dans la production de rubans transfert thermique (Cf. [ALL 21-c]).



a)

b)

Figure 31. *Utilisation de robots a) Pour la découpe b) Pour le chargement pièces (ARMOR)*



Depuis 2010, le groupe a également lancé plusieurs nouvelles activités qui s'appuient sur son savoir-faire historique en formulation (Opération consistant à fabriquer un matériau homogène et stable répondant à un cahier des charges spécifique) et enduction (Traitement de surface qui consiste à appliquer un revêtement sur un support) : films photovoltaïques organiques, collecteurs de courant pour batteries innovantes et filaments 3D.

Grace à la robotisation de la découpe (passage de 36 découpeuses manuelles à 7 découpeuses semi-automatiques en 10 ans) et à ses possibilités de remodeler l'atelier en permanence, cette entreprise accuse 10% de croissance en volume par an à surface d'exploitation constante. La fidélisation du client par la qualité et le service rendu a permis à cette entreprise de contrebalancer la concurrence des pays à bas coûts.

5.4 BAUD INDUSTRIES: Jumeau numérique, réalité virtuelle

Baud Industries, voir [ALL 21-c], est un groupe familial créé en 1978 à Vougy en Haute-Savoie (74) comptant 500 employés. L'usine est spécialisée dans le décolletage, l'usinage haute précision de pièces métalliques.



Figure 32. Chaîne de fabrication (Baud industries)

Baud Industries opère dans plusieurs secteurs comme l'automobile, la connectique, la domotique, l'horlogerie.

Trois initiatives ont permis à cette entreprise de maîtriser les objectifs de coût en maintenant la qualité : Utiliser un jumeau numérique de la station de tournage-fraisage (modifier et simuler des préséries virtuelles), instrumenter les outils avec des capteurs, effectuer des mesures métrologiques de la pièce usinée transmise à la machine d'usinage.

L'optimisation du domaine d'utilisation des outils d'usinage et l'ajustement permanent en temps réel de l'usinage de la pièce (entre autres) ont permis par exemple à cette entreprise de :

- réduire d'une semaine à jour l'immobilisation d'une machine lors de la fabrication d'un nouveau produit,
- de baisser le coût de l'outillage en augmentant sa durée de vie de 15 à 20%.

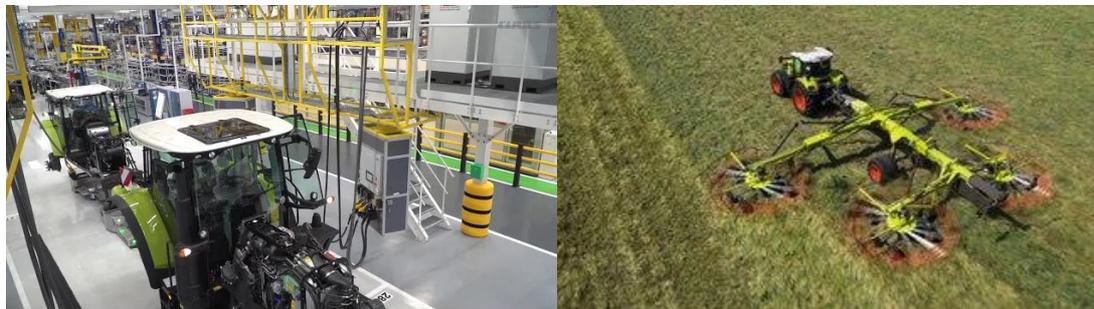
Toutes ces adaptations ont permis à cette entreprise de faire face aux pays à faible coût de main d'œuvre.

5.5 CLASS: réalité virtuelle

CLAAS Tractor (Cf. [ALL 21-c]) est une filiale du groupe familial allemand CLAAS dont l'usine est implantée au Mans (Sarthe). Elle propose une centaine de modèles de tracteurs allant de 80 à 460 ch et produit en



moyenne 10 000 tracteurs/an. Depuis son intégration dans le groupe en 2003, l'entreprise a vécu une véritable transformation tant sur le plan social que sur le plan technologique.



a)

b)

Figure 33. a) *Chaîne de montage de tracteurs.*

b) *Andaineur à 4 rotors*

CLAAS est l'un des leaders mondiaux parmi les constructeurs d'andaineurs à rotors (un andaineur est une machine permettant de mettre en rangées régulières une herbe fauchée). Les nouveaux andaineurs à quatre rotors articulés se distinguent principalement par une faible hauteur de transport, un excellent suivi du sol pour les rotors et une grande maniabilité.

Cette entreprise assure la continuité numérique en exploitant d'une part les données en tant qu'outil de management et en utilisant la réalité virtuelle d'autre part en tant qu'outil d'ingénierie instantanée.

Cette continuité numérique est assurée via CATIA et 2 salles de réalité virtuelle. Cette entreprise est fortement insérée dans l'écosystème local.

5.6 VENTANA: fonderie, fabrication additive, intelligence artificielle

Créé en 1938, le site de Ventana Arudy (Cf. [ALL 21-c] fut l'un des tout premiers sites implantés dans le Béarn (Pau, Oloron, Tarbes) et est à l'origine d'un tissu industriel aéronautique régional reconnu.

Experte mondiale de la fonderie sable de précision pour les alliages d'aluminium et magnésium, elle développe en « co-engineering » des pièces de fonderie complexes par de la coulée basse pression.



Figure 34. *Coulée basse pression (Ventana fonderie)*



La conception technologique grâce à l'impression 3D, fabrication de moules, a permis à cette entreprise de diviser par 4 les délais de développement, par 2 son coût, et d'obtenir un gain de masse de 30%.

Afin de renforcer sa position au premier rang européen dans le domaine de la fonderie d'alliages légers, Ventana Arudy a développé des solutions de fabrication augmentée en intégrant des briques technologiques telles que :

- la simulation,
- l'impression 3D,
- la mesure sans contact,
- les interfaces hommes-machines,
- les données massives,
- l'intelligence artificielle

6 CONCLUSION

Les développements précédents ont mis en évidence les différentes spécificités de la 4^{ème} révolution industrielle (Industrie 4.0) dans le secteur de la mécanique, spécificités qui toutes exploitent la puissance du numérique afin de mieux répondre aux besoins du marché qui exige toujours une réactivité plus grande.

Avant de développer les aspects technologiques et humains il a semblé nécessaire de faire un point sur **l'évolution des industries mécaniques**.

- Depuis l'arrivée du numérique au début de 1960 les outils numériques sont de plus en plus portables et sont répartis sur des serveurs distants interconnectés (le "cloud"), les procédés de fabrication ont évolué et les matériaux sont plus performants. Tout ceci assure une meilleure flexibilité pour répondre à des besoins variés qui évoluent rapidement. Outre l'aspect technique l'aspect humain et social mérite une attention particulière dans le domaine de la formation, de la santé, de l'environnement, de la solidarité. L'intégration de l'homme dans la chaîne des valeurs est primordiale.
- Les PME-PMI en mécanique sont le premier employeur industriel en France et leur positionnement et leur coordination sont des points essentiels dans le défi de l'industrie du futur. L'usine du futur peut inciter ces dernières, concernées par la mécanique, à investir dans le domaine numérique.
- Aujourd'hui, l'urgence à réagir devant la mutation technologique a conduit ces acteurs à s'unir pour démultiplier leur effort dans une vision plus large d'Usine du Futur. Des réseaux d'acteurs tels que *l'Alliance pour l'Industrie du Futur (AIF)*, *le Cetim*, les pôles de compétitivité, etc... ont été mis en place.

Les mutations technologiques s'articulent globalement autour de 3 thématiques: Les outils de conception, les outils de fabrication et les matériaux.

Les outils de conception qui utilisent plusieurs approches :

- La simulation ou prototypage virtuel, qui crée une maquette numérique du produit, permet d'étudier l'influence des différents paramètres de conception. On passe ainsi du prototype virtuel au prototype physique pour les essais.
- Le jumeau numérique est une réplique du produit physique qui reçoit ses informations à partir de capteurs. Son rôle ne se limite pas à la conception, il peut également être utilisé dans la fabrication, l'utilisation ou la maintenance du produit.
- La réalité virtuelle (RV) ou augmentée (RA) permet à l'utilisateur d'interagir avec un environnement du monde réel représenté par un objet virtuel. C'est un outil de conception qui peut aussi être une assistance aux opérateurs au niveau de la formation ou de la maintenance de produit.



Les outils de fabrication qui concernent les technologies avancées telles que :

- La fabrication additive qui est une technologie permettant de réaliser des pièces par addition de matière et sans outillage. Ces pièces, de petites séries, peuvent ainsi être optimisée : allègement en masse en conservant la rigidité par exemple.
- La production automatisée et la robotique qui utilisent depuis plusieurs décennies des robots pour déplacer des pièces, pour usiner ou réaliser des tâches répétitives ou dangereuses. Actuellement des systèmes de diagnostic permettent d'étudier la viabilité d'un projet de robotisation tant sur le plan technique qu'économique.
- L'organisation de l'atelier de production qui est une thématique essentielle de l'usine du futur mettant en œuvre plusieurs développements prometteurs liés à l'industrie 4.0 tels que la virtualisation de l'atelier et du poste de travail, la virtualisation de l'usine ultra efficace et des grandes étapes de développement.

Enfin les matériaux qui sont au cœur des innovations pour transformer les idées en réalités concrètes, tant au niveau des matériaux du futur que des procédés d'assemblage innovants qui sont la clé de la préparation de l'industrie du futur.

- Les matériaux nouveaux tels que les composites, les multi-matériaux, les nouveaux alliages sont conçus en intégrant les contraintes d'environnement et de recyclage, conception qui passe par le numérique.
- Les assemblages par procédés innovants nécessitent de concevoir des assemblages permettant leur réalisation, cas des composites par exemple. Le collage et le soudage sont des voies prometteuses malgré certains verrous technologiques. Enfin il ne faut pas sous-estimer l'importance de l'aspect normatif: Les normes ne sont pas seulement des règles et des recommandations industrielles mais surtout des leviers économiques.

Le dernier volet concernant **l'aspect social et humain** est centré autour de l'organisation de travail, de la formation et de la qualité de vie au travail.

- L'organisation de travail qui est un modèle combinant rationalisation du travail et participation des salariés en les incitant à avancer vers l'autonomie. Ceci permet de réduire les temps de contrôle et de décision induits par la chaîne managériale et d'accroître leur pouvoir d'agir et de responsabilité.
- La formation professionnelle et continue qui devient un élément incontournable de la rétention de talents
- La qualité de vie au travail qui facilite à la fois l'industrialisation et la personnalisation, adaptés aux aspirations de réactivité des entreprises.

Ces trois approches sont illustrées par quelques exemples d'entreprises qui se sont modernisées en utilisant les solutions technologiques et humaines apportées par l'industrie du futur.

Le développement inéluctable de l'industrie du futur doit être mené, comme le soulignent bon nombre d'employeurs, en veillant à ne pas perdre le sens physique et la réalité au niveau des acteurs. La technologie, même performante, ne doit pas remplacer peu à peu les qualités humaines et le savoir-faire: toute conception doit pouvoir déboucher sur des réalisations et sur de la production répondant aux besoins du marché où l'homme garde toute sa place dans la chaîne de valeur industrielle. Certains pensent même à une production personnalisée et à plus long terme envisagent déjà une chaîne qui auto-apprend et s'automatise toute seule.

7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- [AFI 21] Association Française des Industries en Appareils à Pression (AFI), **2021**www.afiap.org
- [AFZ 22] M. Afzali, **La simulation numérique : un outil pour les innovations technologiques**, Techniques de l'Ingénieur, **2022**<https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [AIF 15] Alliance Industries du Futur (AIF), **2015**<http://www.industrie-dufutur.org/>
- [AIF 16] Alliance Industries du Futur (AIF), **Priorité de l'Alliance Industrielle du Futur en matière de Normalisation et de standardisation**, Mécatèque cetim, **2016**
- [ALL 21-a] Alliance Industrie du Futur (AIF), **2021**<http://www.solutionsindustriedufutur.org>
- [ALL 21-b] Alliance Industrie du Futur (AIF), **exemples, 2021**
<https://vitrinesindustriedufutur.org/vitrines/?themeld=26>
- [ALL 21-c] Alliance Industrie du Futur (AIF), **Exemples, 2021**
<https://vitrinesindustriedufutur.org/vitrines/?sizeId=11>
- [ASC 17] G. Asch, B. Poussery, **Les capteurs en instrumentation industrielle**, 8ème édition, **2017**, Dunod.
- [CEA 17] CEA découvrir et comprendre, **La réalité virtuelle**, **2017**
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-realite-virtuelle.aspx>
- [CET 21] CETIM, **Informations générales, 2021**
- [CET 21] CETIM, **Info4**, Avril **2021**
- [CET 22] cetim Mécatèque, **la base de connaissances du facturier**, **2022**<https://www.cetim.fr/mecatèque>
- [CHE 08] M. Cherfaoui, **Les contrôles non-destructifs (CND-END)**, les techniques de l'ingénieur, **2008**.
- [CHE 16] M. Cherfaoui, C. Hervé, **Techniques en essai non destructif et applications industrielles sur équipements sous pression**, congrès ESOPÉ, **2016**.
- [CHE 18] M. Cherfaoui, **Acoustic Emission works over the last 10 years and relationship with Industry 4.0**, Cetim, 33rd EWGAE, **2018**
- [CHU 19] J. Chu, **This flat structure morphs into shape of a human face when temperature changes**, New structural design office. **2019**, <https://news.mit.edu/2019/mesh-structure-shape-temperature-changes-0930>
- [COF 21] **Confédération Française pour les Essais Non Destructifs (COFREND)**, Informations générales, **2021**www.cofrend.com
- [CON 02] Ph Contet, J.P. Chanard, **La normalisation, outil stratégique des industries mécaniques**, Document UNM, décembre **2002**
- [DUP 10] B. Dupont, F. Zhang, H. Walaszek, M. Cherfaoui, M. Ben Tahar, **Caractérisation du matériau et études numériques et expérimentales la technique ultrason**, Cetim et UTC, **2010**.
- [EYM 17] D. Eymard, **Factory Lab**, Conférence présentée à l'IESF, **2017**
- [EYM 20] D. Aymard, **L'usine du futur pour la création de valeur**, Magazine n°6 de l'IESF, 1er trimestre **2020**, <https://fr.calameo.com/read/0050401854341f0ed9bd0?authid=2TEBHle43QR7>
- [HCM 19] Haut comité mécanique, **Rapport de l'académie des sciences et techniques et du haut comité mécanique**- Novembre **2019**<https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/mecanique-futur.html>
- [FER 20] S. Ferri, **L'humain : catalyseur de l'usine du futur**, Magazine n°6 de l'IESF, 1er trimestre **2020**, <https://fr.calameo.com/read/0050401854341f0ed9bd0?authid=2TEBHle43QR7>



[FIM 16] Fédération des Industries Mécaniques, **Guide pratique de l'usine du futur et panorama de solutions et Guide de technologie de l'industrie du futur**-Fédération des Industries mécanique (FIM) et Alliance Industrie du futur (AIF), mai 2016. <http://www.industrie-dufutur.org/aif/>

Contact : usinedufutur@fimeca.org

[GEN 21] General Electric Digital, **Industry Manager Service**, Early warning of a shift in core parameters on a jet engine, GE Twin Digital web site, 2021 <https://www.ge.com/digital/industrial-managed-services-remote-monitoring-for-iiot/article/87245-early-warning-of-a-shift-in-core-parameters-on-a-jet-engine?industries=7>

[LIE 14] H. P. Lieurade, **La métallurgie dans les Industries Mécaniques**, L'avenir de la métallurgie française, réflexions et pistes d'action, Editeurs : Yves Bréchet, André Pineau, Yves Quéré, 2014

[SFM 21] Société Française de Métallurgie et des matériaux, **Les matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post Covid**, Demain se prépare aujourd'hui, Livre blanc rédigé par des membres de la SF2M, février 2021

[SHM 21] Structural Health Monitoring (SHM) **Contrôle de santé des structures, CND, 2021**

[TMP 21] Technologies Prioritaires en Mécanique, 2021, <https://www.tpm2025.fr/>