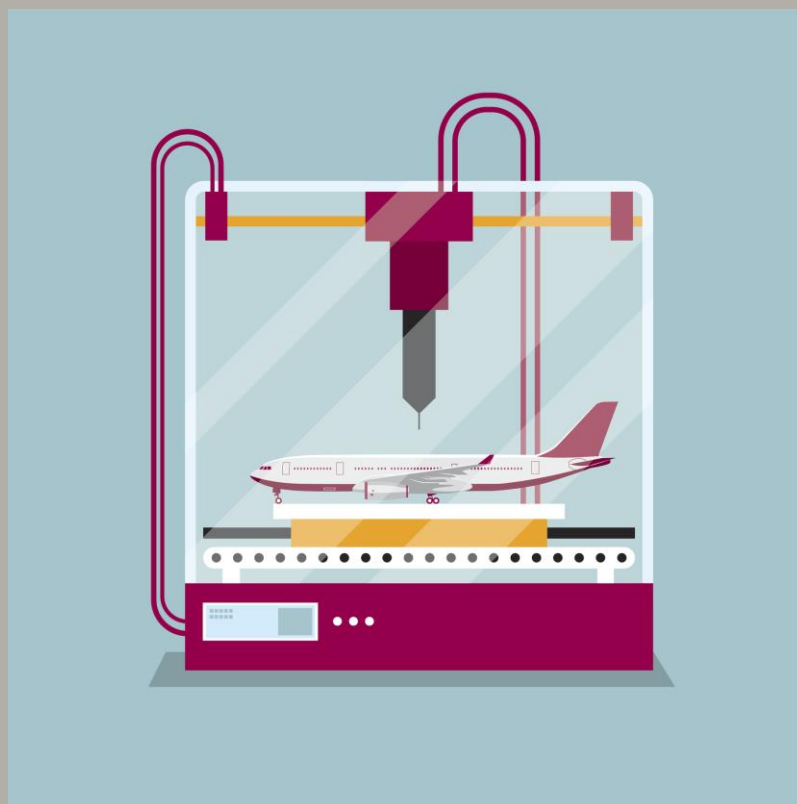


INDUSTRIE 4.0 DANS LE SECTEUR AERONAUTIQUE : LES CAS DE L'ALLEMAGNE ET DES ETATS-UNIS



L'Industrie 4.0 également appelée « Smart Industry », correspond à une industrie où les entreprises tirent parti des technologies de l'information et de la communication pour augmenter leurs performances, et ce tout au long de leur chaîne de valeur. L'enjeu résidant principalement dans l'amélioration de :

- La production via l'automatisation de tâches ou l'assistance robotisée des manutentionnaires ;
- L'agilité de la chaîne de production, afin de la moduler de manière rapide et autonome ;
- La consommation d'énergie via une utilisation intelligente et économe des ressources ;
- La qualité et de la granularité de l'information à des fins de pilotage et contrôle de l'activité ou dans un but de communication plus transparente vis-à-vis du client final (consommateur ou régulateur) ;
- La maintenance prédictive, via une détection ciblée et anticipée des pannes.

L'Allemagne et les Etats-Unis se sont intéressés à ces problématiques il y a quelques années, ce qui les positionne en leaders sur ces sujets. Le secteur aéronautique, stratégique pour ces pays, a pu bénéficier des innovations qui en ont découlé.

Industrie 4.0 : Genèse aux Etats-Unis et en Allemagne

A partir des années 2010, les **Etats-Unis et l'Allemagne ont lancé** des programmes nationaux autour des problématiques de l'Industrie 4.0.

Industrie 4.0 en Allemagne

Dès 2006, du fait de la concurrence asiatique sur le marché des machines-outils, les Allemands s'interrogent sur le maintien de leur position de leader dans l'industrie de pointe et dans la production de biens d'équipement industriels haut de gamme. Ils prennent conscience que leur industrie est fortement tournée vers l'innovation incrémentale mais peu vers l'innovation de rupture.

Le gouvernement allemand lance alors le programme « Stratégie High Tech » qui est étendu **en 2010** sous le nom de « **Plan d'action Stratégie de haute technologie 2020** ». Parmi les dix projets d'avenir du programme, on trouve « **Industrie 4.0** », d'un budget de 200M€. Les parties prenantes de ce projet sont le gouvernement fédéral (Chancellerie, cinq ministères : BMWi : Ministère de l' Economie et Energie, BMBF : Ministère de l'Education et la Recherche, BMI : Ministère de l'Intérieur, BMJ : Ministère de la Justice et BMAS : Ministère du Travail), des représentants des Länder, des fédérations professionnelles, des représentants académiques et des représentants économiques

(notamment les constructeurs de machines et fournisseurs d'automatismes), et se réunissent dans des groupes de travail.

L'objectif est d'inciter les acteurs de l'industrie allemande à coopérer entre eux de façon cohérente, afin d'augmenter la capacité d'innovation technologique du pays. Il en a découlé la mise en place de la plateforme Industrie 4.0, financée et pilotée par les 3 grandes fédérations professionnelles (BITKOM spécialisé dans le monde du numérique, VDMA pour le génie mécanique et ZVEI pour l'électrique et électronique). Cette plateforme met en relation industriels, syndicats et chercheurs dans des groupes de travail pour étudier la mise en application concrète des concepts de l'industrie 4.0. Des projets de recherche ont conduit à la mise en place de démonstrateurs.

Advanced Manufacturing National Program Office aux Etats-Unis

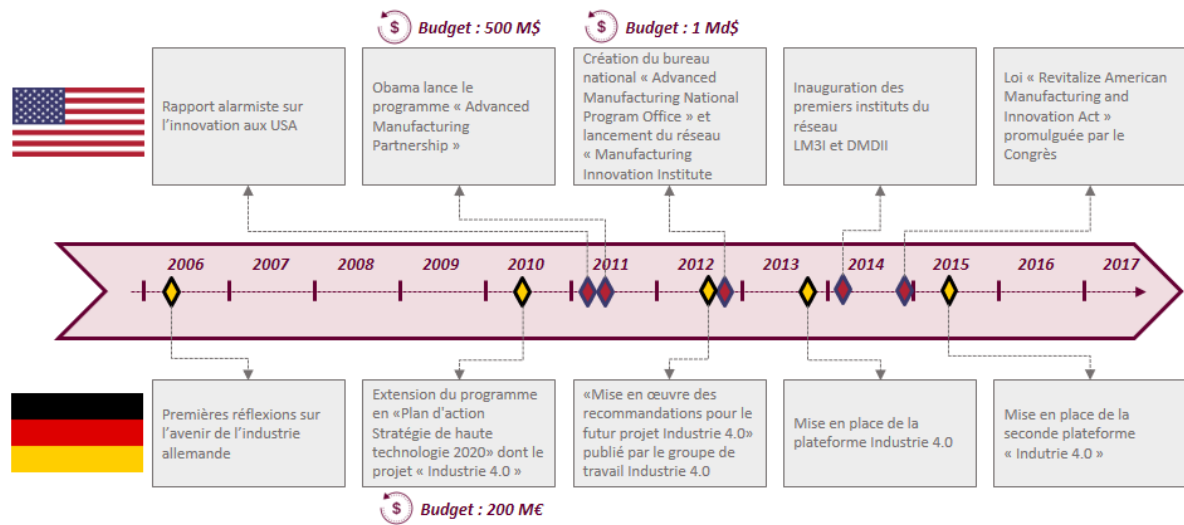
En juin 2011 aux Etats-Unis, un rapport alarmiste publié par le « President's Council of Advisors On Science and Technology » qualifie l'industrie américaine de trop peu innovante, notamment dans le secteur des hautes technologies, stratégique pour le pays. Pour remédier à cela, le Président **Obama lance le programme « Advanced Manufacturing Partnership » d'un budget de 500 M\$**, afin d'encourager l'innovation, d'améliorer la compétitivité industrielle, de trouver un moyen de faire revenir les entreprises sur le sol américain (bureaux d'étude et usines) et de créer des emplois à forte valeur ajoutée.

Industriels, universités (universités de recherche, Community Collège), associations (consortiums industriels, organisations de développement économique, organisations syndicales, laboratoires nationaux, ...) et organismes gouvernementaux (fédéral, étatique et local) se sont réunis pour publier un recueil de recommandations.

Il en a suivi la création du **bureau national « Advanced Manufacturing National Program Office »** qui a pour rôle d'encourager et coordonner les projets de R&D sur le thème de l'innovation industrielle. Ce bureau est également en charge du nouveau réseau de **15 Instituts d'Innovation Industrielle**, reposant sur des partenariats publics-privés. Chaque institut est spécialisé dans une technologie particulière liée à l'innovation industrielle, mais forme un réseau cohérent et complet avec les autres instituts. La mise en place de ces 15 instituts correspond à un **budget de 1Md\$**, mais ils doivent à terme devenir financièrement indépendants, grâce aux financements et cotisations des entreprises privées.

carnets de commandes d'Airbus et Boeing sont tels que les compagnies aériennes sont

Historique des programmes étatiques américains et allemands sur l'Industrie du Futur



Innovations tout au long de la chaîne de valeur de l'industrie aéronautique

Pour l'Allemagne et les Etats-Unis, l'aéronautique est un domaine stratégique. En effet, le **secteur allemand de l'aéronautique**, composé de 220 entreprises et institutions (la plupart étant des PME), se place au **4^{ème} rang mondial** : il a atteint en 2016 un **chiffre d'affaire record de 37,5 Mds€**. Les **Etats-Unis**, quant à eux ont réalisé une **balance commerciale positive de 90,5 Mds USD** en 2016, avec le plus haut taux d'exportation parmi les industries américaines.¹

Ce secteur stratégique entre donc tout à fait dans le cadre des programmes étatiques décrits ci-dessus, d'autant plus que les **entreprises aéronautiques doivent relever des enjeux** de taille pour rester compétitives:

- **Diminuer les coûts de production.** L'efficacité de la fabrication impacte fortement la rentabilité d'un programme. De plus, les clients recherchent des produits de plus en plus personnalisés. L'enjeu est donc de répondre à leurs attentes, tout en maintenant des prix compétitifs face à la concurrence.
- **Augmenter la cadence de production**, notamment dans l'aviation commerciale. Les

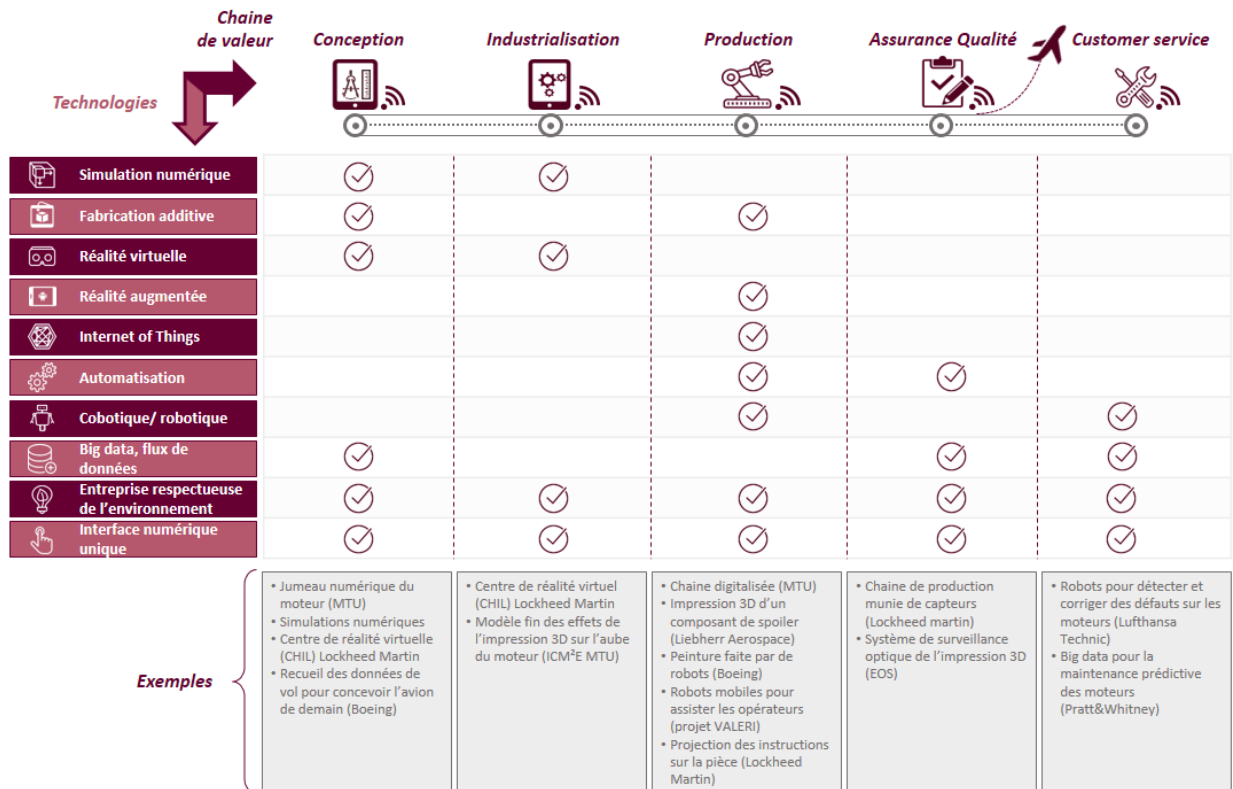
contraintes d'attendre plusieurs années avant d'être livrées. Régulièrement Airbus et Boeing enregistrent de nouveaux records de commandes (par exemple, suite au salon du Bourget de cette année, le carnet de commande d'Airbus a atteint un nouveau record de plus de plus de 6 800 avions).

- **Gérer la complexité grandissante des programmes**, due à l'augmentation du nombre de systèmes intégrés différents, l'introduction de nouveaux éléments (matériaux composites, fabrication additive permettant de réduire la masse de l'avion et donc les coûts d'exploitation), et des autorités certificatrices de plus en plus exigeantes.
- **Fabriquer des produits de très haute qualité**, afin d'atteindre l'objectif zéro défaut pour minimiser les risques et répondre aux exigences des régulateurs.

Les innovations apportées par l'industrie du futur permettront aux acteurs du secteur aéronautique de relever ces défis. L'Allemagne et les Etats-Unis ayant investi dans ces programmes d'innovation il y a déjà plusieurs années, commencent à en voir aujourd'hui les bénéfices, sur toute la chaîne de valeur des entreprises : de la phase de conception à la maintenance du produit, en passant par la mise en production, la fabrication et le contrôle qualité.

¹ source : www.selectusa.gov, www.trade.gov, www.gtai.de

Représentation de la chaîne de valeur classique de l'industrie aéronautique



1. Des innovations dès la phase de conception

La conception des produits de l'aéronautique repose grandement sur la **modélisation numérique** : les ingénieurs sont en mesure de réaliser de nombreuses simulations, leur permettant de répondre aux contraintes propres à leur secteur d'activité.

Le motoriste allemand MTU a été jusqu'à mettre en place un **moteur virtuel, intégrant tous les aspects d'un moteur physique**. La représentativité de ce jumeau numérique permet de réaliser des **campagnes d'essais sur des ordinateurs**, et ainsi de limiter drastiquement les essais coûteux sur banc ou en vol.

La réalisation d'une maquette numérique complète permet d'identifier très en amont du projet des contraintes d'intégration de systèmes, toujours plus nombreux et complexes. Les ingénieurs ne sont ainsi plus contraints d'attendre la réalisation d'un prototype physique pour visualiser le produit fini, ce qui génère des **gains de temps et financiers considérables**.

Dans cette optique, l'avionneur américain Lockheed Martin a mis en place un **laboratoire de réalité**

virtuelle, le Collaborative Human Immersive Laboratory. Il s'agit d'un centre de réalité virtuelle immersive, où les concepteurs **visualisent les maquettes virtuelles en 3D** et les manipulent grâce à un système de détection de mouvement. Le produit peut ainsi être testé et validé plus aisément en tirant bénéfice de ces technologies innovantes.



2. Préparation assistée de la chaîne de production

Une fois que le design du produit est clairement défini et validé, il en suit l'étape essentielle de la **préparation à la mise en production**. Cette étape consiste à définir des processus de fabrication efficaces, tout en garantissant la sécurité des opérateurs.

La solution mise en avant par l'industrie du futur est la **modélisation de la chaîne de production**, ainsi que celle de tous les processus conduisant à la réalisation du produit final.

Le jumeau virtuel de la chaîne de production de l'américain Lockheed Martin se trouve dans son centre de réalité virtuelle (Collaborative Human Immersive Laboratory). Grâce à des **lunettes 3D et**

une technologie de capture de mouvement, l'ingénieur peut évoluer dans une **chaîne d'assemblage virtuelle**. Celle-ci lui permet de reproduire les gestes que l'opérateur sera amené à réaliser, d'évaluer l'accessibilité de certaines pièces, d'apprécier l'espace de travail et de mesurer le risque d'endommagement de pièces coûteuses. La future chaîne d'assemblage peut ainsi être adaptée en conséquence, ce qui permet de **minimiser le gâchis**, de **réduire les risques d'accident** et de **diminuer le temps de fabrication**. Cet outil de Lockheed Martin a été notamment utilisé lors de la fabrication des satellites de la société.

Le motoriste allemand MTU aborde quant à lui la modélisation des processus d'une manière plus microscopique, avec son approche ICM²E (Integrated Computational Materials and Manufacturing Engineering). L'objectif est de regrouper toutes les **caractéristiques du matériau à travailler**, ainsi que les opérations qu'il devra subir. Tout ceci est **modélisé de manière à mesurer très précisément les impacts** des opérations sur le matériau, et définir avec exactitude les manipulations à réaliser dans les usines. Cette approche a déjà permis à l'entreprise de régler finement les paramètres de son procédé de frittage sélectif par laser, afin d'**obtenir un composant final ayant les propriétés souhaitées**. Ce type de simulation permet également de calculer le temps nécessaire pour travailler un composant, piloter les machines afin qu'elles aient un rendement optimal. L'objectif est ici également de **limiter les manipulations** afin de réaliser des économies.

Le motoriste envisage de généraliser ce procédé à toutes les étapes de fabrication conduisant au moteur final, en impliquant ses équipementiers.

L'autre intérêt de cette modélisation de processus est d'apporter une **plus grande flexibilité à la production** : les modifications de la chaîne de production peuvent être étudiées, ainsi que leur impact **sans avoir à interrompre la fabrication**. Cela représente un grand intérêt pour l'industrie aéronautique, secteur où les produits subissent d'importantes adaptations en fonction des besoins du client (notamment dans le domaine militaire où chaque contrat donne lieu à une version personnalisée du produit).



3. Une usine connectée

Dans les usines, les concepts de l'industrie 4.0 permettent d'augmenter grandement la performance.

Une usine plus autonome

L'un des concepts phare de l'industrie 4.0 est l'utilisation de l'**IoT (Internet of Things)**. Le principe réside dans la **connectivité et la communication des objets entre eux**. Une expérimentation est en cours dans les usines de MTU à Munich, où le centre de production des aubes a été en grande partie digitalisé : grâce à l'IoT, le composant est en mesure d'identifier sa nature et l'ensemble des opérations qu'il doit subir. Il peut entrer en contact avec les lignes de production, qui décident de manière autonome de travailler le composant suivant un ordre prédéfini. L'expérimentation durera 5 ans et permettra d'évaluer les avantages d'une telle technologie.

Une usine flexible

L'**impression 3D**, ou fabrication additive, offre la possibilité de réaliser des **pièces sur mesure**, souvent difficilement réalisables avec les méthodes de fabrication classiques. Les produits de l'impression 3D offrent parfois de meilleures performances que des composants fabriqués de manière classiques (par exemple, le bloc vanne d'actionneur de spoiler imprimé en 3D par Liebherr Aerospace pour l'A380 est 35% plus léger). Certains de ces éléments ont même pu démontrer leur fiabilité : Boeing est le premier à avoir obtenu la certification de la FAA, pour l'utilisation de parties structurelles en titanes issue de l'impression 3D. Cela devrait permettre à l'entreprise d'**économiser** de 2 à 3 millions de dollars par 787 Dreamliner d'ici 2018.

Une usine plus agréable pour les opérateurs

Des technologies sont pensées pour faciliter le travail des opérateurs, en les **assistant ou remplaçant** lors de manipulations dangereuses, pénibles ou répétitives.

L'**utilisation de robots** répond tout à fait à cet objectif. Ils peuvent être utilisés pour remplacer totalement les opérateurs (c'est le cas dans les usines de Boeing où des robots peignent les ailes des avions, et percent le fuselage), ou pour les assister. Il s'agit du concept de **cobotique** : les robots évoluent dans le même environnement que les humains, afin de prendre en charge des emplois monotones et libérer leurs collègues des travaux répétitifs et pénibles pour qu'ils puissent se concentrer sur des tâches à plus grande valeur ajoutée. Dans cette optique, le projet VALERI (Validation de la robotique collaborative avancée dans les applications industrielles), lancé par

L'Institut allemand Fraunhofer, a pour objectif de développer et tester des robots mobiles dans les ateliers d'Airbus et de ses sous-traitants.

De son côté, Lockheed Martin a choisi une autre approche de l'aide aux opérateurs, en misant une fois de plus sur la réalité augmentée : l'entreprise étudie la mise en place d'un système de projection avancé permettant **d'afficher les instructions de travail sur le produit**, ce qui permet de **faciliter l'assemblage** en guidant les opérateurs, et donc de gagner du temps.

Une usine respectueuse de l'environnement

L'usine du futur est une **usine éco-responsable**. De nombreuses initiatives voient le jour en ce sens, par exemple :

- Installation de **panneaux solaires** sur le toit de ses usines (Boeing)
- **Supply chain éco-responsable** favorisant les produits recyclables, régionaux, bios, avec le moins de produits toxiques, des emballages réduits... (Lockheed Martin)
- **Economies en eau, en électricité** : mur solaire pour préchauffer l'air, toit réfléchissant pour diminuer l'effet îlot de chaleur (Pratt&Whitney)



4. L'innovation au service de la qualité

Du fait de l'**objectif « zéro défaut »** des produits issus de l'industrie aéronautique, une étape essentielle dans la chaîne de valeur est l'assurance qualité. Classiquement, les vérifications, souvent longues et complexes, sont réalisées en aval de la production. Cette étape incontournable est d'autant plus importante dans l'usine du futur, qu'une plus grande autonomie est laissée aux machines.

La solution envisagée est d'intégrer sur la chaîne de production une **multitude de capteurs, permettant de suivre en temps réel la conformité du produit fabriqué, ainsi que l'état de la chaîne de production**. Si une anomalie est détectée, des changements ou des améliorations peuvent être apportées immédiatement. Les pannes peuvent aussi être anticipées, grâce à la **détection des signes avant-coureurs : les équipes techniques interviennent** alors selon les informations fournies en temps réel par les machines. Ce concept est évoqué par l'américain Lockheed Martin.

De plus, l'introduction d'un nouveau moyen de production (la fabrication additive) implique un nouveau moyen de contrôle. La société allemande EOS, spécialisé dans l'impression 3D, associée à MTU a développé un **système de surveillance optique contrôlé par ordinateur** : il permet de s'assurer que chaque couche d'impression est réalisée dans des conditions optimales, et que le produit final est bien conforme à l'attendu. Les contrôles sont réalisés pendant le processus de fabrication, ce qui représente un gain de temps considérable.



5. Maintenance assistée et maintenance prédictive

Enfin, dans l'aéronautique, les **opérations de maintenance représentent un poste important**, où les innovations apportées par l'industrie du futur ont un rôle majeur à jouer. Dans la vie d'un avion, les opérations de maintenance sont **régulières et obligatoires**. Or, un avion cloué au sol coûte cher. L'enjeu est donc de réaliser ces opérations dans un **minimum de temps, sans rogner sur la qualité**.

L'utilisation de robots en phase de maintenance peut être un moyen de réduire coûts et délais. Avec son projet AutoInspect, Lufthansa Technik a **automatisé son processus de détection des fissures** qui peuvent apparaître sur les moteurs : **les déformations sont détectées grâce à un système optique automatique**, puis **des robots du projet AutoRep réalisent les opérations correctives**. Ce principe ne peut pas être généralisé à trop grande échelle car sur certaines manipulations, les humains restent tout de même plus efficaces.

Une autre solution en cours de développement, est l'utilisation du **Big Data dans le cadre de la maintenance prédictive**. Par exemple, dans chaque Airbus A380, 24 000 capteurs sont utilisés pour la maintenance prédictive, sur les 300 000 capteurs qui alimentent les enregistreurs de vol. L'enjeu est alors d'analyser finement cette quantité importante de données, afin d'extraire les informations pertinentes qui permettent de surveiller l'état de santé des avions. Dans cette optique, le motoriste américain Pratt & Whitney s'est associé à IBM pour améliorer la gestion de sa flotte, constituée de plus de 4000 moteurs civils en service. Avoir une vision précise de l'état des moteurs permet au motoriste de **prédire des pannes, de lancer des alertes** et ainsi **planifier des opérations de maintenance**. Remplacer une pièce avant qu'elle ne s'abîme est toujours **plus simple et rapide que de résorber une panne**, qui a pu potentiellement endommager

d'autres systèmes de l'avion. Le pilote espère augmenter la durée de vie de ses moteurs de 50%, et de réduire les coûts de maintenance de 20%.



6. Le recueil et l'analyse de données au service d'une amélioration continue

Le géant Boeing se lance également dans des solutions liées au Big Data pour ses opérations de maintenance en **exploitant les données de vol**, mais ne s'arrête pas là : il souhaite s'appuyer sur les **informations recueillies** à partir de sa flotte existante pour **concevoir la prochaine génération d'avion, et améliorer sa production**.

La frontière entre les étapes de la chaîne de valeur s'estompe donc, permettant ainsi une **meilleure interaction** entre ces étapes. Boeing a confirmé cette volonté en signant récemment un contrat d'un milliard de dollars avec Dassault Système, pour disposer d'une **interface numérique unique**. Celle-ci sera utilisée pour **concevoir les produits, moderniser l'intégralité de la chaîne de production, gérer les sous-traitants et proposer de nouveaux services**. Intégrer ces éléments au sein d'une même plateforme numérique permettra à l'avionneur de bénéficier des **nouvelles perspectives offertes par le digital**.

L'industrie 4.0 n'est pas qu'une révolution technologique



L'industrie aéronautique se métamorphose ainsi grâce aux innovations technologiques pour faire face à ses enjeux.

Cette révolution des moyens amène à **repenser la place des humains dans l'industrie**. En effet, les rôles des individus sont directement impactés par l'introduction de ces nouveaux outils et processus : dans un environnement où tout est interconnecté, le travail se fait désormais en réseau. De nouvelles coopérations sont ainsi possibles entre ingénieurs, concepteurs, professionnels des systèmes d'information, techniciens, et même utilisateurs. Ainsi, les personnes ayant des **profils pluridisciplinaires** deviennent plus recherchées car l'interconnexion entre les métiers de l'entreprise est grandement facilitée.

Des **plans de formation** doivent être mis en œuvre pour **accompagner les employés dans cette transformation** des processus et des outils. Les robots et nouvelles technologies assistent **les opérateurs qui deviennent les superviseurs de leurs nouveaux collègues numériques**. La **pénibilité du travail est amoindrie, mais les responsabilités et le mode de travail évoluent**.

L'industrie du futur doit être un moyen de générer de l'emploi et non de s'y substituer. Cette composante est **bien prise en compte dans les réflexions menées en Allemagne et aux Etats-Unis**. En effet, les syndicats sont associés aux groupes de travail organisés par la plateforme Industrie 4.0.

Ainsi, au même titre que l'ensemble des autres éléments de la chaîne de valeur de l'industrie aéronautique, **le modèle organisationnel doit lui aussi évoluer** afin que **la transformation de l'entreprise se fasse de manière complète, efficiente et pérenne**.

L'industrie aéronautique du futur est donc une industrie en rupture qui tire parti d'innovations technologiques et de nouvelles méthodes pour se métamorphoser. L'Allemagne et les Etats-Unis l'ont compris et ont d'ores et déjà investi massivement dans ce domaine. La France s'intéresse également à ces problématiques. Elle a lancé en 2013 le projet « Usine du Futur », qui avait pour ambition de transformer le modèle industriel actuel grâce au numérique et à la diffusion des nouvelles technologies. Il a été rebaptisé « Industrie du Futur » en 2015, afin d'inclure également des réflexions sur les mutations organisationnelles, humaines et écologiques, à l'image de l'Industrie 4.0 allemande.

Copyright © 2017 Sia Partners. Reproduction totale ou partielle strictement interdite sur tout support sans autorisation préalable de Sia Partners.

A PROPOS DE SIA PARTNERS

Sia Partners est devenu en dix-sept ans le leader des cabinets de conseil français indépendants. Cofondé en 1999 par Matthieu Courtecuisse, Sia Partners compte 950 consultants pour un chiffre d'affaires de 140 millions d'euros. Le Groupe est présent dans quinze pays, les Etats-Unis représentant le deuxième marché. Sia Partners est reconnu pour son expertise pointue dans l'énergie, les banques, l'assurance, les télécoms et le transport.



Abu Dhabi

PO Box 54605
West Tower #605
Abu Dhabi Mall - UAE

Amsterdam

Barbara Strozilaan 101
1083 HN Amsterdam -
Netherlands

Bruxelles

Av Henri Jasparlaan, 128
1060 Brussels - Belgium

Casablanca

14, avenue Mers Sultan
20500 Casablanca -
Morocco

Charlotte

401 N. Tryon Street
10th Floor
Charlotte, NC 28202 - USA

Doha

PO Box 27774 Doha
Tornado Tower #2238
West Bay - Qatar

Dubai

PO Box 502665
Shatha Tower office #2115
Dubai Media City
Dubai - UAE

Hong Kong

23/F, The Southland
Building,
48 Connaught Road Central
Central - Hong Kong

Houston

800 Town and Country Blvd,
Suite 300
Houston, TX 77024 - USA

Londres

2nd Floor, 4 Eastcheap
London EC3M 1AE - UK

Luxembourg

7 rue Robert Stumper
L-2557 Luxembourg

Lyon

3 rue du Président Carnot
69002 Lyon - France

Milan

Via Gioberti 8
20123 Milano - Italy

Montréal

2000 McGill College, Suite 600
Montreal QC H3A 3H3 -
Canada

New York

40 Rector St, Suite 1111
New York, NY 10006 - USA

Paris

12 rue Magellan
75008 Paris - France

Riyad

PO Box 502665
Shatha Tower office #2115
Dubai Media City
Dubai - UAE

Rome

Via Quattro Fontane 116
00184 Roma - Italy

Singapour

137 Market Street
#10-02 Grace Global Raffles
048943 Singapore

Tokyo

Level 20 Marunouchi Trust
Tower-Main
1-8-3 Marunouchi,
Chiyoda-ku
Tokyo 100-0005 Japan

Suivez-nous sur [LinkedIn](#) et [Twitter @SiaPartners](#)