

MCO 4.0

LE POTENTIEL DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 APPLIQUÉES AU MAINTIEN EN CONDITION OPÉRATIONNELLE (MCO) DES ÉQUIPEMENTS DE DÉFENSE

Josselin Droff

*Chercheur à la Chaire
Économie de défense, IHEDN*

ICA Benoît Rademacher

*Directeur du domaine Armement
et économie de défense, IRSEM*

MCO 4.0

LE POTENTIEL DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 APPLIQUÉES AU MAINTIEN EN CONDITION OPÉRATIONNELLE (MCO) DES ÉQUIPEMENTS DE DÉFENSE

Josselin Droff

*Chercheur à la Chaire
Économie de défense, IHEDN*

ICA Benoît Rademacher

*Directeur du domaine Armement
et économie de défense, IRSEM*

Pour citer cette étude

Josselin Droff, ICA Benoît Rademacher, *MCO 4.0. Le potentiel des technologies de l'industrie 4.0 appliquées au maintien en condition opérationnelle (MCO) des équipements de défense*, Étude n° 65, IRSEM, avril 2019.

Dépôt légal

ISSN : 2268-3194

ISBN : 978-2-11-152621-1

DERNIÈRES ÉTUDES DE L'IRSEM

64. *Impact des nouveaux modèles économiques industriels sur les équipements des armées*
Dr Antoine PIETRI, ICA Benoît RADEMACHER
63. *Le Rôle des armées dans la fonction « intégration » de l'État*
Barbara JANKOWSKI
62. *Le Gazoduc Nord Stream 2. Enjeux politiques et stratégiques*
Céline MARANGÉ, Angélique PALLE et Sami RAMDANI
61. *Améliorer la résilience psychologique des combattants et de leurs familles. Pour une prévention permettant de limiter l'impact psychologique d'un traumatisme et/ou de faciliter le rétablissement*
LCL Arnaud PLANIOL
60. *L'Activité de renseignement des groupes jihadistes*
COL Olivier PASSOT
59. *France and Poland Facing the Evolution of the Security Environment*
Barbara JANKOWSKI and Amélie ZIMA (eds.)
58. *L'Ergonomie et la réalité augmentée adaptées aux besoins militaires. Opportunités technologiques et culturelles (nouvelles générations de combattants)*
LCL Arnaud PLANIOL
57. *Du gel au dégel des pensions des anciens militaires subsahariens des armées françaises : histoire politique, combat juridique et difficultés actuelles*
Camille EVRARD
56. *Les Conséquences en termes de stabilité des interventions militaires étrangères dans le monde arabe*
Flavien BOURRAT

ÉQUIPE

Directeur

Jean-Baptiste JEANGÈNE VILMER

Directeur scientifique

Jean-Vincent HOLEINDRE

Secrétaire général

CRG1 (2S) Étienne VUILLERMET

Chef du soutien à la recherche

Caroline VERSTAPPEN

Éditrice

Chantal DUKERS

Retrouvez l'IRSEM sur les réseaux sociaux :

@ <https://www.irsem.fr>



@IRSEM1



PRÉSENTATION DE L'IRSEM

Créé en 2009, l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM) est un organisme extérieur de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Composé d'une quarantaine de personnes, civiles et militaires, sa mission principale est de renforcer la recherche française sur les questions de défense et de sécurité.

L'équipe de recherche est répartie en cinq domaines :

- Questions régionales Nord, qui traite de l'Europe, des États-Unis, de la Russie et de l'espace post-soviétique, de la Chine, du Japon et de la péninsule coréenne.

- Questions régionales Sud, qui traite de l'Afrique, du Moyen-Orient, du Golfe, du sous-continent indien, de l'Asie du Sud-Est et du Pacifique.

- Armement et économie de défense, qui s'intéresse aux questions économiques liées à la défense et aux questions stratégiques résultant des développements technologiques.

- Défense et société, qui examine le lien armées-nation, l'attitude de l'opinion publique vis-à-vis des questions de défense, et la sociologie de la violence, de la guerre et des forces armées.

- Pensée stratégique, qui étudie la conduite des conflits armés à tous les niveaux (stratégique, opératif, tactique).

En plus de conduire de la recherche interne (au profit du ministère) et externe (à destination de la communauté scientifique), l'IRSEM favorise l'émergence d'une nouvelle génération de chercheurs (la « relève stratégique ») en encadrant des doctorants dans un séminaire mensuel et en octroyant des allocations doctorales et postdoctorales. Les chercheurs de l'Institut contribuent aussi à l'enseignement militaire supérieur et, au travers de leurs publications, leur participation à des colloques et leur présence dans les médias, au débat public sur les questions de défense et de sécurité.

AVERTISSEMENT : l'IRSEM a vocation à contribuer au débat public sur les questions de défense et de sécurité. Ses publications n'engagent que leurs auteurs et ne constituent en aucune manière une position officielle du ministère des Armées.

BIOGRAPHIES

Josselin Droff est docteur en sciences économiques de l'Université de Bretagne occidentale (UBO). Chercheur à la Chaire Économie de Défense de l'IHEDN, il est lauréat du prix d'économie de la défense du ministère de la Défense en 2015 pour ses travaux de thèse. Ses recherches portent principalement sur l'organisation géographique de la défense (notamment l'organisation du maintien en condition opérationnelle des matériels ou les restructurations des armées) et se situent à l'intersection de l'économie géographique, de l'organisation industrielle et de l'économie publique. Il travaille également sur les conséquences économiques des opérations extérieures et les questions d'innovation dans la défense (conceptions de l'innovation, organisation de l'innovation et évolution des modes d'innovation).

Contact : Josselin.Droff@fdd-ihedn.fr

Benoît Rademacher est directeur du domaine Armement et économie de défense à l'IRSEM, depuis octobre 2016. Ingénieur en chef de l'armement, diplômé de l'École polytechnique (promotion X 96) et de l'ENSTA ParisTech, il a commencé sa carrière au centre d'analyse de défense de la direction générale de l'armement (DGA) comme responsable d'études technico-opérationnelles. Puis il a rejoint l'Agence des participations de l'État au ministère des Finances, chargé du suivi d'un portefeuille d'entreprises publiques. Chef du bureau de la tutelle des écoles et des formations internationales à la direction générale de l'armement (DGA) de 2011 à 2016, il a exercé la tutelle de quatre écoles d'ingénieurs (École polytechnique, ISAE-Supaéro, ENSTA ParisTech et ENSTA Bretagne). Benoît Rademacher est également titulaire du DESS Défense, géostratégie et dynamiques industrielles de l'Université Paris II Panthéon-Assas.

Contact : benoit.rademacher@irsem.fr

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	13
INTRODUCTION	15
1. Définition du MCO	15
2. La problématique actuelle	15
3. Les facteurs d'évolution des coûts du MCO	19
4. Le potentiel de l'innovation technologique dans la gestion du MCO	21
5. Objectifs de l'étude	26
6. Méthode et terrain	29
<i>Veille bibliographique</i>	29
<i>Entretiens</i>	30
7. Plan de l'étude	31
I. L'INDUSTRIE 4.0 : DU CONCEPT AU CONCRET	33
1. De la première à la quatrième révolution industrielle ?	34
<i>Positionnement historique</i>	34
<i>L'industrie 4.0 : une politique industrielle ?</i>	38
<i>Une thématique de recherche en forte expansion</i>	42
2. L'industrie 4.0 à travers trois notions	43
<i>Systèmes cyber-physiques (SCP)</i>	44
<i>L'Internet des objets (IoT)</i>	47
<i>De l'IoT à l'Internet des services et ses applications</i>	56
<i>L'usine intelligente ou « smart factory »</i>	60
3. Essai de synthèse et lien avec le MCO	62
<i>Une tentative de définition</i>	62
<i>Que permet l'industrie 4.0 ?</i>	64
<i>Industrie 4.0 et MCO</i>	67
II. IOT ET OBJETS CONNECTÉS DANS LE MCO DES MATÉRIELS DE DÉFENSE	69
1. Intérêt de l'IoT et des objets connectés dans le MCO des matériels	69
<i>Exploitation des données pour optimiser la maintenance</i>	69
<i>Gestion de la documentation et actualisation des configurations des matériels</i>	83
<i>Logistique et gestion des pièces détachées</i>	85
<i>Traçabilité et suivi des outillages connectés</i>	88
2. Limites et freins de l'IoT dans le MCO des matériels de défense	90
<i>Transmission et stockage des données</i>	90
<i>Sécurisation des données</i>	92
<i>Traitement et interprétation des données</i>	92

<i>La question de la maîtrise des données : qui possède quoi ?</i>	96
<i>Enjeux opérationnels liés aux données</i>	101
3. Synthèse des intérêts/limites	103
III. IMPRESSION 3D ET MCO	107
1. Principe des processus d'impression 3D	107
<i>Diffusion et applications industrielles</i>	111
2. Intérêts des processus d'impression 3D dans le MCO	114
<i>Innovation de produit</i>	114
<i>Gain de masse</i>	117
<i>Production à la demande</i>	119
<i>Gestion des obsolescences</i>	121
<i>Rapidité et flexibilité dans la production</i>	122
<i>Économie de matériaux</i>	125
« <i>Innovation RETEX</i> ».....	126
3. Limites et freins à l'adoption des processus d'impression 3D dans le MCO... 128	128
<i>Les limites économiques</i>	128
<i>Contraintes et freins d'ordre technique</i>	134
<i>Contraintes et limites d'ordre réglementaire</i>	136
<i>Contraintes et limites en termes de sécurité</i>	140
<i>Contraintes et limites socioculturelles</i>	140
4. Synthèse des intérêts et limites/freins de l'impression 3D dans le MCO..... 141	141
IV. TECHNOLOGIES DE VIRTUALISATION (RÉALITÉ VIRTUELLE ET RÉALITÉ AUGMENTÉE) : APPLICATION AU MCO	145
1. Réalité virtuelle (RV) et réalité augmentée (RA)	145
<i>La réalité virtuelle</i>	145
<i>La réalité augmentée</i>	147
2. Intérêt des techniques de visualisation (RV et RA) dans le MCO	149
<i>Augmentation de la productivité et de la qualité du service</i>	150
<i>Opportunités de développement de la télémaintenance</i>	156
<i>Intérêt dans la formation</i>	157
<i>Intérêt dans la conception, la planification et le management</i>	160
3. Freins aux applications des techniques de virtualisation dans le MCO..... 161	161
<i>Problèmes d'ordre technique</i>	161
<i>Problèmes d'ergonomie des appareils</i>	163
<i>Perceptions négatives du contrôle</i>	164
<i>Limites spécifiques aux conditions d'emploi de matériels militaires</i>	165
4. Synthèse.....	166

V. AUTOMATISATION : USAGE DES ROBOTS, COBOTS ET DRONES DANS LE MCO	169
1. Robots, cobots et drones.....	169
<i>Robots et cobots</i>	169
<i>Drones</i>	176
2. Usage des robots, cobots et drones dans le MCO	178
<i>La production de pièces détachées</i>	178
<i>La logistique</i>	181
<i>Les tâches d'inspection</i>	184
<i>Tâches d'assemblage et opérations de maintenance</i>	191
3. Synthèse de l'intérêt et des limites/freins à l'usage des robots, cobots et drones dans le MCO.....	196
CONCLUSION	203
Grappe 1 : IoT et objets connectés.....	205
Grappe 2 : impression 3D	206
Grappe 3 : techniques de virtualisation (RV et RA).....	208
Grappe 4 : automatisation du MCO (robots, cobots et drones)	209
BIBLIOGRAPHIE	213
ANNEXES	225
1. Liste des personnes interviewées dans le cadre de l'étude.....	225
2. Statistiques sur la durée des entretiens.....	227
<i>Acteurs rencontrés et temps cumulé d'entretien (en minutes)</i>	227
<i>Acteurs rencontrés et répartition du temps d'entretien (%)</i>	227
3. Questionnaires.....	228
<i>Questionnaire à l'attention des acteurs étatiques</i>	228
<i>Questionnaire à l'attention des entreprises</i>	230
4. Applications envisagées des technologies	232

RÉSUMÉ

Le maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense constitue un enjeu majeur pour le ministère des Armées, du fait notamment de son impact opérationnel et des coûts afférents. De nombreuses initiatives et expérimentations ont été lancées, ou sont en cours de déploiement, dans l'objectif d'améliorer significativement, voire de transformer, la façon de réaliser les tâches de MCO, tant au niveau des acteurs étatiques que des acteurs industriels.

Elles misent en particulier sur le potentiel offert par les technologies à la base de la numérisation des chaînes de valeur, qui recouvrent un spectre très large allant de l'exploitation massive de données issues des matériels de défense en service (big data) à l'utilisation de robots ou de drones pour des tâches d'inspection ou de maintenance, en passant par la fabrication additive (impression 3D).

Toutes ces technologies ont en commun d'être à l'origine de fortes évolutions des processus de production industrielle et des modèles d'affaires afférents, qui se fédèrent autour de concepts tels que l'« industrie 4.0 », l'« usine du futur » ou la *smart factory*, qui se développent rapidement depuis près de cinq ans et qui structurent en partie la politique industrielle menée par de nombreux pays.

L'objet de cette étude est de caractériser l'impact de ces technologies et des concepts sous-jacents sur l'organisation et la réalisation du MCO des matériels de défense, pour tous les milieux (matériels aéronautiques, navals et terrestres). En particulier, il s'est agi d'identifier l'état des pratiques des acteurs du MCO, qu'ils soient étatiques ou industriels, vis-à-vis de ces nouvelles technologies, et d'en envisager les évolutions potentielles.

À cette fin, les auteurs ont réalisé une étude bibliographique sur les évolutions des pratiques et sur les évolutions des technologies concernées, qui ont été regroupées dans quatre « grappes de technologies » : Internet des objets et objets connectés (maintenance prédictive, collecte massive de données) ; impression 3D (fabrication et réparation additives) ; techniques de virtualisation

(réalité virtuelle, réalité augmentée) ; automatisation complète ou partielle de processus (robotique, cobotique, drones).

Les auteurs ont également conduit plus d'une vingtaine d'entretiens auprès d'acteurs étatiques et industriels en charge des questions de MCO, qu'ils tiennent à remercier tout particulièrement pour leur accueil et leur aide. Ce travail de terrain a permis de dresser un état des pratiques et des expérimentations en cours, ainsi que de confronter les perspectives suggérées à travers la lecture des nombreuses publications avec la perception qu'en ont les principaux acteurs concernés.

Les auteurs espèrent enfin que cette étude contribuera à la réflexion sur l'évolution et l'amélioration du MCO.

INTRODUCTION

Dans une optique prospective, cette étude traite des effets attendus de certaines technologies à la base de ce que l'on nomme « l'industrie 4.0 » sur l'organisation du MCO des équipements de défense (équipements aéronautiques, navals et terrestres). C'est ce que nous appelons le « MCO 4.0 ».

1. DÉFINITION DU MCO

Le MCO regroupe l'ensemble des moyens (humains, techniques et financiers), des prestations et processus qui permettent à un équipement de défense (véhicule terrestre, navire, aéronef, etc.) durant toute sa durée d'utilisation jusqu'à la préparation au retrait du service, de rester apte à l'emploi pour répondre aux besoins de disponibilité et d'activité des armées, directions et services (opérations et préparation opérationnelle) conformément aux dispositions des contrats opérationnels et organiques¹.

2. LA PROBLÉMATIQUE ACTUELLE

Dans le MCO des matériels de défense, la problématique à laquelle doivent faire face l'ensemble des acteurs de la défense – acteurs civils représentant l'État, militaires et industriels – est la suivante : les contraintes budgétaires sont fortes, les coûts d'acquisition et de possession tendent à augmenter suivant les évolutions technologiques et/ou le vieillissement des flottes dans un contexte où les sollicitations opérationnelles sont – et resteront probablement – fortes².

1. Ministère des Armées (MINARM), État-major des armées (EMA) et Délégation générale pour l'armement (DGA), *Politique générale de maintien en condition opérationnelle des équipements de défense sur leur cycle de vie*, 2017.

2. J. Droff, *Le facteur spatial en économie de la défense : application au maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense*, thèse pour le doctorat en sciences économiques, Université de Bretagne occidentale/ENSTA Bretagne, Brest, 2013, 448 p. ; J. Droff, « Le maintien en condition opérationnelle (MCO)

Tout l'enjeu consiste à trouver des solutions afin de contenir ou de réduire ces coûts compte tenu de l'importance des contraintes budgétaires et opérationnelles. Il est difficile d'obtenir des informations chiffrées, notamment en longue période, sur l'évolution du coût du MCO. Néanmoins, à partir de diverses sources (rapports parlementaires, PAP³), il est possible de se faire une représentation de l'évolution des crédits alloués au MCO.

Tableau 1

Variations comparées des crédits budgétaires (en volume, euros de 2010)

	Variation 2003-2016	TCAM* 2003-2016
Budget défense	+ 1 %	+ 0,07 %
Dépenses d'équipement	+ 6 %	+ 0,42 %
Dépenses hors équipement	- 6 %	- 0,44 %
Crédits d'entretien programmé des matériels (EPM)	+ 37 %	+ 2,27 %

Source : Droff (2017)⁴

* TCAM : Taux de croissance annuel moyen.

Entre 2003 et 2016, les crédits EPM en volume ont augmenté de 37 %, soit un taux de croissance annuel moyen plus de cinq fois supérieur à celui des crédits d'équipement. La tendance à la hausse des budgets se poursuit. La LPM 2014-2019 prévoyait une augmentation annuelle de 4,3 % des crédits EPM en valeur (soit environ 3,4 milliards d'euros par an en moyenne consacrés

des matériels de défense : quelles tendances ? », *Newsletter Chaire Économie de Défense*, n° 4, 2017, p. 1-13.

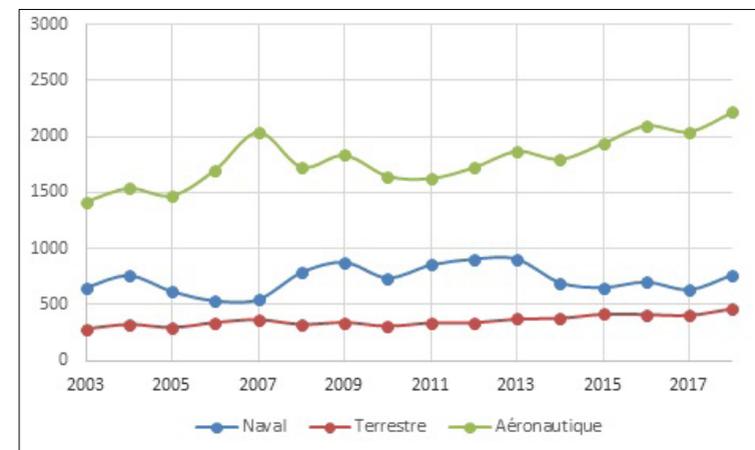
3. PAP : Projets annuels de performance. Ces documents retracent, pour chaque programme, la stratégie, les objectifs, les indicateurs et les cibles de résultat dont l'atteinte est mesurée.

4. J. Droff, « Le maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense : quelles tendances ? », *art. cit.*

à l'EPM)⁵. La LPM 2019-2025, pour la période 2019-23, consacre 4,4 milliards d'euros par an en valeur à l'EPM, soit un effort financier supplémentaire de plus d'un milliard par an en moyenne annuelle en valeur par rapport à la LPM précédente⁶.

Figure 1

Crédits EPM en CP-LFI (euros de 2010) par milieu (aéronautique, naval, terrestre)



Source : auteurs, d'après EMA (2003-2009) et Assemblée nationale (2010-2018)⁷

D'un point de vue désagrégé, i.e. par milieu (cf. figure 1), les crédits aéronautiques représentent 64,3 % du total des crédits EPM en 2018 (contre 60,2 % en 2003). Ils augmentent fortement sur la période 2003-2018 (+ 56,19 % avec un TCAM de 3,02 %). La part relativement élevée et la croissance des crédits expliquent que le MCO aéronautique soit le domaine le plus « médiatisé »,

5. A. Marty et M. Recalde, *Rapport d'information en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les conséquences du rythme des opérations extérieures sur le maintien en condition opérationnelle des matériels*, Assemblée nationale, 2015.

6. Projet de loi de programmation militaire 2019-2025, rapport annexé, p. 23-63.

7. J. Puyeu et F. André, *Rapport d'information n° 718 en conclusion des travaux d'une mission d'information sur l'exécution de la loi de programmation militaire 2014-2019*, Assemblée nationale, 2018.

ce qui ne réduit en rien l'intérêt que l'on peut porter aux autres domaines dont la maîtrise des coûts représente un enjeu tout aussi important pour l'avenir. Les crédits EPM navals représentent 22,3 % du total des crédits EPM en 2018 contre 27,7 % en 2003. Ce sont eux qui connaissent la plus faible augmentation avec un taux de croissance cumulé de 17,5 % sur la période 2003-2018 (TCAM de 1,08 %). Les crédits d'EPM terrestres représentent 13,5 % du total des EPM en 2018 contre 12,1 % en 2003. Notons que ce sont eux qui augmentent le plus fortement sur la période 2003-2018 (+ 63,7 % avec un TCAM de 3,33 %).

Un autre indicateur, plus complet que les crédits EPM est l'indicateur de coût de la fonction MCO, publié dans les Projets annuels de performance (PAP). Cet indicateur a le « défaut » d'être relativement récent (2012 pour un périmètre stabilisé) et donc de ne présenter des évolutions que pour une période relativement courte. Il est calculé par milieu et par un ratio dépenses/unité de mesure. Son objectif est d'améliorer l'appréciation du rapport coût/efficacité du MCO des équipements. L'indicateur présente l'intérêt de calculer une évolution du coût global du MCO et pas seulement les crédits EPM. Rappelons que les crédits EPM n'englobent en effet que le coût des prestations de maintenance et celui des pièces de rechange. Ils excluent le coût de la main-d'œuvre étatique et le coût des infrastructures « consommées » par les matériels.

Sur la période pour laquelle les données sont disponibles, l'indicateur synthétique publié par le ministère des Armées montre que l'augmentation des coûts est plus forte dans l'aéronautique que dans le terrestre ou le naval. En prenant les taux de croissance annuels moyens, l'indicateur montre que la croissance du coût du MCO dans l'aéronautique est environ 3 fois supérieure à celle des domaines naval ou terrestre.

Tableau 2

Coût synthétique, en volume (euros de 2010) de la fonction MCO

	2012	2017	Taux de croissance 2012/2017	TCAM 2012/2017
Coût moyen de la fonction MCO terrestre par matériel et jour de préparation opérationnelle (euros de 2010)	62	70	12 %	2,4 %
Coût moyen de la fonction MCO navale par jour de disponibilité de la flotte (milliers d'euros de 2010)	54	60	11 %	2,2 %
Coût moyen de la fonction MCO aéronautique à l'heure de vol (euros de 2010)	8 314	11 130	34 %	6 %

Source : auteurs, d'après les indicateurs synthétiques calculés par le ministère des Armées et présentés dans les PAP. Le déflateur utilisé pour les calculs est celui de la France, base de données AMECO (Commission européenne).

3. LES FACTEURS D'ÉVOLUTION DES COÛTS DU MCO

Il est possible de regrouper les facteurs explicatifs de cette augmentation des coûts en trois catégories⁸.

Il y a d'abord les facteurs liés au cycle de vie des matériels. Le vieillissement et les obsolescences ainsi que les sollicitations importantes des matériels entraînent des besoins accrus en MCO. Certains matériels ont aujourd'hui 30 ou 40 ans de service actif (parfois davantage comme dans le cas des avions ravitailleurs C-135 de l'armée de l'air dont l'âge moyen en 2018 est de plus de 55 ans). Or, plusieurs études américaines montrent une augmentation des coûts et une baisse de la disponibilité lorsque l'âge des matériels augmente⁹. D'autre part, les engagements de la France

8. J. Droff, *Le facteur spatial en économie de la défense : application au maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense*, op. cit.

9. Edward G. Keating et Matthew C. Dixon, *Investigating optimal replacement of aging Air Force systems*, Santa Monica, CA, RAND, 2003.

en opérations extérieures (Opex) ont considérablement augmenté sur la décennie 2000¹⁰. Les fortes sollicitations des matériels accélèrent leur vieillissement et entraîne des besoins accrus en MCO. En raison du climat et des facteurs naturels (sable, chaleur notamment) et des conditions d'engagement (vols de longue durée sur des espaces de grande taille), un moteur d'hélicoptère sera par exemple utilisé 3 000 heures dans des conditions nominales en métropole contre seulement 300 heures en Opex¹¹. Pour les matériels terrestres, l'usure des véhicules déployés en Opex se révèle de 2,5 à 4 fois plus rapide qu'en métropole. Ceci n'est pas propre aux matériels terrestres et aéronautiques. Ainsi, en Libye, les bâtiments de projection et de commandement (BPC) de la Marine nationale avaient été très sollicités, ce qui avait engendré des dépenses de maintenance accrues.

Il y a ensuite les facteurs générationnels. La variation des coûts selon les générations d'appareils est symptomatique des sauts technologiques¹². Les systèmes de défense sont de plus en plus intégrés et la littérature montre que leur maintenance est plus coûteuse. La part croissante de l'électronique, de l'informatique ou encore des matériaux composites peut ici être considérée comme un facteur explicatif. La maîtrise de ces technologies nécessite une main-d'œuvre très qualifiée (ingénieurs, techniciens) et des infrastructures spécifiques (bancs de test, grues, systèmes de diagnostic des pannes) qui sont souvent très coûteuses et accompagnent l'entrée en service des matériels. C'est le cas notamment pour les infrastructures d'accueil des futurs SNA Barracuda, de l'hélicoptère Tigre avec les hangars à hygrométrie contrôlée, des infrastructures d'accueil de l'A400 M, etc.

10. J. Malizard et J. Droff, « Analyse économique de la soutenabilité des opérations extérieures », *Les Champs de Mars*, n° 30, 2018/1, p. 377-388 ; P. de Villiers, *Servir*, Fayard, 2017, 254 p.

11. A. Marty et M. Recalde, *Rapport d'information en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les conséquences du rythme des opérations extérieures sur le maintien en condition opérationnelle des matériels*, op. cit.

12. J.-M. Lehtonen et J. Anteroine, « The Capability Factors as Explanatory Variables of Equipment Unit Cost Growth: A Methodological Proposal », *Defence and Peace Economics*, vol. 27, n° 2, 2016, p. 280-298.

En conséquence, les coûts de MCO des nouveaux matériels sont bien plus élevés que pour les matériels d'ancienne génération.

Enfin, il convient de considérer les réformes et les facteurs institutionnels. Ainsi, la professionnalisation des armées ou la restructuration des établissements industriels de défense ont pu engendrer des « coûts de transition » importants. Par exemple, l'abandon de la conscription a joué un rôle dans l'augmentation du coût d'entretien et la baisse de la disponibilité des matériels dans l'armée de terre¹³. Des situations de monopole ont également été observées dans le MCO. Ainsi, en 2012, plus de 85 % du volume des marchés notifiés en matière de MCO était caractérisé par l'absence de concurrence¹⁴. De telles situations ont pu contribuer à la hausse des coûts. Enfin, concernant les facteurs institutionnels, le cadre réglementaire est important, dans le domaine aéronautique notamment, qui a vu ces dernières années s'accroître le poids des normes, des réglementations et de la traçabilité afin d'améliorer la sécurité des vols. Ceci s'est traduit par plus de main-d'œuvre ou de nouvelles procédures de contrôle et *in fine* des coûts plus importants.

4. LE POTENTIEL DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE DANS LA GESTION DU MCO

Plusieurs innovations technologiques majeures identifiées dans la littérature comme faisant partie de la « 4^e révolution industrielle¹⁵ » sont susceptibles d'être appliquées aux processus de MCO et, par conséquent, d'avoir des effets sur ses performances (notamment la productivité, les coûts ou la qualité) mais aussi sur son organisation. À la base de ce que l'on peut qualifier de processus de numérisation des chaînes de valeur, ces technologies, comme par exemple l'Internet des objets, les objets

13. Cour des comptes, *Le maintien en condition opérationnelle des matériels des armées*, La Documentation française, 2004.

14. C. Eckert et J. Launay, *Rapport n° 251 au nom de la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire sur le projet de loi de finances pour 2013 (n° 235)*, Assemblée nationale, 2012.

15. K. Schwab, *La Quatrième Révolution industrielle*, Dunod, 2017.

connectés, le *big data analytics* ou encore l'impression 3D, ont récemment été évoquées par la ministre des Armées, Florence Parly, lors de la présentation des nouvelles réformes et du « profond mouvement de transformation du ministère des Armées¹⁶ ». Le ministère des Armées est ainsi très engagé sur cette question et mise sur la transformation numérique pour améliorer l'organisation du MCO, et *in fine* la disponibilité des flottes, tout en réduisant ou en maîtrisant les coûts.

Dans le MCO, que l'on peut considérer comme un service ayant une dimension industrielle forte, ce qui est attendu de l'application de ces nouvelles technologies consiste essentiellement en une augmentation de la productivité du service¹⁷, une maîtrise des coûts et une augmentation de la qualité du service. Ces nouvelles technologies se présentent comme une opportunité pour faire passer le MCO d'une logique de service ponctuel rendu aux armées à une logique d'ingénierie globale intégrant les meilleurs processus du domaine civil, toutefois lorsque cela est possible. Mais si cette logique est séduisante « sur le papier », il faut évaluer ces nouvelles technologies afin de voir quel est leur apport au MCO et comment les intégrer à la doctrine de soutien des matériels.

Dans cette perspective, la LPM 2019-2025 dispose qu'afin « de répondre aux exigences d'emploi comme à l'accroissement des besoins, les processus et les outils du MCO seront modernisés, en particulier dans le domaine de la gouvernance, pour les chantiers propres à chaque milieu, du renouvellement des systèmes d'informations techniques et logistiques, ainsi que de la rationalisation de la chaîne d'approvisionnement (*supply chain*). Le MCO s'appuiera également sur une industrie tant étatique que privée où les nouvelles technologies (numérisation, robotisation, impression 3D, *big data*, fusion de données, développement de

16. Adresse de la ministre aux ressortissants du ministère des Armées, 14 septembre 2017.

17. À savoir le ratio entre la production et l'ensemble des moyens mis en œuvre pour l'obtenir (facteurs de production).

la maintenance prédictive) occuperont une place croissante¹⁸ ». On retrouve le même type de logique dans le tout récent rapport des députés O. Becht et T. Gassiloud sur les enjeux de la numérisation des armées : « La numérisation des procédures constitue l'un des leviers de performance au service de l'ambitieux plan de refonte du MCO aéronautique annoncé par la ministre des Armées¹⁹. »

Dans un avenir que la plupart des acteurs du milieu estime relativement proche, les grandes étapes du cycle de vie d'un matériel de défense, depuis sa conception jusqu'à son recyclage, en passant, bien sûr, par sa production et sa maintenance, s'inscrira dans une forme de « continuité numérique » entre un produit physique bien réel (un matériel) et un avatar numérique (jumeau numérique dudit matériel). Dans ce cadre entièrement numérisé, nous verrons en nous projetant – et c'est déjà parfois le cas – des opérateurs de maintenance chaussés de lunettes de réalité augmentée leur indiquant, étape par étape, le cheminement dans la réparation d'une panne sur un matériel (blindé, aéronef, navire) ou un équipement (par exemple un moteur de navire, une pompe, etc.). Des techniques de traitement de données comme le *big data analytics* aideront à décider quand un acte de maintenance devra avoir lieu et certaines des pièces détachées utilisées par un opérateur de maintenance pourront être produites en impression 3D, parfois directement sur le lieu d'intervention. Tous les actes de maintenance seront enregistrés et analysés ce qui permettra de savoir avec précision combien de temps un opérateur aura mis pour mener à bien sa tâche mais aussi de déterminer quels sont les gestes à améliorer et s'il a besoin d'un perfectionnement ou d'une formation.

Pour les industriels, les nouvelles technologies et la transformation numérique obligent à repenser – parfois de façon radicale

18. « Projet de loi relatif à la programmation militaire pour les années 2019 à 2025 et portant diverses dispositions intéressant la défense », présenté au nom de M. E. Philippe, Premier ministre, par Mme F. Parly, ministre des Armées, enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 8 février 2018, p. 94.

19. O. Becht et T. Gassiloud, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, Assemblée nationale, 2018, p. 86.

– l’organisation de la production dans toutes ses dimensions, c’est-à-dire de la conception jusqu’au marketing et aux fonctions commerciales. Cette réorganisation correspond à l’évolution de l’usine traditionnelle vers l’usine du futur, laquelle peut être définie comme une unité de production industrielle combinant automatisation et processus de production s’appuyant sur les systèmes cyber-physiques²⁰ et la valorisation des données sous forme de services à destination de l’entreprise elle-même ou bien destinés à être vendus sur un marché. L’évolution vers l’usine du futur interroge la stratégie des firmes sur plus long terme, avec notamment la question des investissements nécessaires en termes matériels (nouvelles machines, réseaux, etc.) mais aussi humains avec l’évolution des métiers de l’industrie, des qualifications et compétences requises et *in fine* des formations.

Même si ces technologies se déploient principalement dans les processus de production, leur application au MCO constitue un sujet d’étude utile et intéressant, qui se justifie par ailleurs pour deux raisons principales.

Premièrement, le sujet est d’actualité, comme l’atteste la publication récente de deux documents importants.

Il s’agit tout d’abord du rapport (classifié) de l’ingénieur général de l’armement Christian Chabbert sur le MCO aéronautique, qui a été remis à la ministre des Armées fin 2017. Outre les réformes concernant la gouvernance et la simplification contractuelle (« verticalisation » de la contractualisation avec la systématisation de contrats longs et globaux), le rapport recommande également de s’intéresser au potentiel offert par les outils numériques, et plus

20. Selon la définition de la plateforme Industrie 4.0 : « Les systèmes cyber-physiques (SCP) regroupent des systèmes embarqués, des processus de production, des logistiques d’ingénierie, de coordination et de management, tout comme des services Internet qui utilisent des capteurs pour récupérer des données et agissent sur des processus physiques au moyen d’actionneurs. Ils sont connectés les uns aux autres via des réseaux digitaux, utilisent toutes données et services disponibles mondialement, et bénéficient d’interfaces hommes-machines multimodales » (D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, La documentation française, 2016, p. 25). Plus succinctement, le terme désigne l’intégration de processus informatiques et physiques (ex. objet connectés, machines-outils intelligentes en réseaux connectées au cloud, etc.).

largement les technologies de l’industrie 4.0. Plus précisément, il met en avant l’intérêt de réformes concernant les processus techniques, logistiques et industriels dans le MCO, secteurs « où les causes d’indisponibilité semblaient plus manifestes²¹ ».

Ensuite, le document de politique générale du MCO des équipements de défense sur leur cycle de vie met également en avant l’intérêt d’une exploitation des outils technologiques dans l’amélioration du MCO. Ce document indique ainsi l’intérêt d’étudier systématiquement l’apport des innovations technologiques pour les intégrer dans les stratégies de soutien des structures faisant du MCO, qui sont les documents qui structurent l’ensemble de la conduite de la politique MCO²².

Deuxièmement, outre son actualité et les enjeux qui y sont associés sur les plans économique, opérationnel et stratégique, le MCO présente un cadre d’étude intéressant à mi-chemin entre production industrielle de « biens » et production de services. Or c’est bien cette « industrialisation des services » et cette « généralisation de l’orientation servicielle » qui caractérisent l’industrie 4.0 et plus largement les économies industrialisées aujourd’hui²³. Par ailleurs, le choix des industries de défense se justifie par le fait que leurs activités – et notamment le type de produits qui y sont élaborés – sont relativement proches de celles des « champions de la numérisation », à savoir les entreprises de télécommunication (IT), celles de l’électronique et des constructeurs automobiles²⁴. Cette proximité avec les industries précitées en fait donc « des candidats intéressants » pour y étudier les effets de la numérisation de la chaîne de valeur. Le développement du numérique dans le MCO entraîne notamment

21. D. Leggé, *Rapport d’information n° 650 au nom de la commission des finances (1) sur la disponibilité des hélicoptères du ministère des Armées*, Paris, Sénat, 2018, p. 52.

22. MINARM, EMA et DGA, *Politique générale de maintien en condition opérationnelle des équipements de défense sur leur cycle de vie*, op. cit.

23. P. Veltz, *La Société hyper-industrielle. Le nouveau capitalisme productif*, Éd. du Seuil, 2017, p. 32.

24. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, op. cit., p. 35. À l’opposé de ces secteurs « champions de la technologie », les auteurs citent des secteurs « retardataires » (commerce, métallurgie, bâtiment, eau et électricité, pétrole et gaz).

un développement de l'activité de services des industriels de défense. Ce développement s'inscrit en effet dans une dynamique générale autour de l'activité de MCO, qui apparaît clairement dans le Calepin 2016 de la DGA, dans lequel plus d'un tiers des entreprises (20 entreprises sur un total de 60) présentent le MCO comme faisant partie de leurs activités.

5. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette étude est double : d'une part, proposer un état des pratiques vis-à-vis des technologies à la base de ce que l'on appelle « industrie 4.0 » dans le MCO et, d'autre part, offrir des pistes de réflexion et d'amélioration pour les acteurs du MCO (acteurs privés comme publics). Les questions qui orientent cette étude sont les suivantes :

1) Quel est l'état des pratiques en termes d'application de ces différentes technologies dans le MCO des matériels de défense français ? Comment ces évolutions technologiques sont-elles intégrées - ou peuvent-elles être intégrées - dans l'organisation des différentes entités en charge du MCO, au sein du ministère mais aussi chez les industriels de la Défense ? L'intégration de ces technologies est-elle différenciée en fonction des différents milieux (aéronautique, terrestre et naval) ?

2) Quelles sont les parties du processus de MCO susceptibles d'être affectées par ces technologies (production et technique ; logistique ; administration et ingénierie contractuelle)²⁵ ? Quels effets peut-on attendre de l'introduction de ces technologies dans les processus de maintenance ? Quels sont les avantages (par exemple réduction des coûts, hausse de la productivité, amélioration de la qualité du service rendu) mais aussi les inconvénients ou les freins (l'ampleur des investissements liés à ces technologies, la formation du personnel à ces nouvelles technologies, la nécessité de repenser l'organisation des structures de MCO, les problèmes de sécurisation informatique qui

25. Notons que l'on retrouve ici les trois grands « métiers » du MCO : la technique (1), la logistique (2) et l'ingénierie contractuelle (3).

vont devenir cruciaux dans un MCO piloté par la donnée, les problèmes de gouvernance qui peuvent être liés à d'éventuelles réorganisations productives, etc.) liés à l'implémentation de ces différentes technologies dans le MCO des matériels de défense français ?

Afin de simplifier la présentation, parmi les différentes évolutions technologiques constitutives de l'industrie 4.0, nous retenons quatre principales « grappes de technologies²⁶ », qui agrègent des technologies fonctionnellement proches ou liées, qui sont détaillées dans le tableau suivant²⁷ :

Tableau 3

Grappes de technologies appréhendées dans le cadre de l'étude

Grappes de technologies	Descriptif
Grappe 1	Objets connectés et Internet des objets (big data, collecte massive de données, RFID)
Grappe 2	Impression 3D (fabrication et réparation additives)
Grappe 3	Techniques de virtualisation (réalité virtuelle, réalité augmentée)
Grappe 4	Robotique, cobotique et drones (automatisation des processus)

Source : auteurs

26. Cette approche regroupant des technologies par « grappes » se retrouve dans la littérature. Par exemple, S. Mittal *et al.*, « Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2017, parlent de « *technology clusters* ».

27. Ce choix est principalement motivé par le fait que certaines « technologies » retenues par les classifications des cabinets de conseil (ex. BCG) ne sont pas réellement des technologies mais parfois des ensembles transverses de pratiques (ex. « Cybersécurité » ou encore « Systèmes d'intégration horizontaux et verticaux »).

Notre connaissance du MCO mais aussi de l'industrie de défense nous permet de considérer que ces quatre « grappes de technologies » restreignent la complexité du sujet tout en constituant une grille d'analyse pertinente pour comprendre les enjeux de l'adaptation de l'organisation du MCO à l'industrie 4.0. Ces grappes de technologies englobent de fait plusieurs technologies, qui présentent des similitudes ou contribuent à un système technologique cohérent fonctionnellement. Cette approche par grappes permet de couvrir une grande partie des évolutions technologiques constitutives de l'industrie 4.0, sans pour autant s'enfermer dans une technologie en particulier.

Cette étude se focalisera plus sur les concepts et enjeux sous-jacents à la mise en œuvre de ces technologies que sur les technologies en elles-mêmes. À notre avis, les résultats de l'étude conservent ainsi toute leur pertinence, même si les technologies évoluent très vite et si certaines technologies présentées à titre d'exemple dans l'étude devenaient obsolètes. Par ailleurs, le lecteur intéressé par une dimension plus technique peut se reporter aux nombreuses références que nous proposons tout au long du texte et qui sont rassemblées dans la bibliographie à la fin de l'étude.

L'approche que nous avons retenue est plutôt prospective dans la mesure où un grand nombre de ces technologies ne sont pas encore matures. Beaucoup en sont encore aux stades de *proof of concept* (POC) ou *proof of value* (POV), qu'il s'agisse de leur application dans les forces armées, les organismes de soutien dédiés au MCO ou encore les industriels de défense. Par ailleurs, nous adoptons une logique de *benchmark* en supposant qu'un certain nombre de pratiques adoptées dans le civil (par exemple par des compagnies aériennes pour la maintenance des avions ou des gestionnaires de flottes de camions) sont susceptibles de se diffuser au sein des pratiques de MCO militaire. Aussi certains des exemples que nous mentionnons peuvent-ils être présentés comme des cas d'application possibles. Ils doivent donc être appréhendés tels quels et non comme des pratiques pleinement installées dans le MCO des matériels de défense.

Notre approche est également multidimensionnelle, ce qui se justifie par la complexité du sujet. Le MCO est en effet une

fonction à la jonction d'enjeux économiques, industriels, opérationnels, stratégiques et sociaux. L'introduction de nouvelles technologies et de nouvelles pratiques peut avoir des répercussions sur l'ensemble de ces dimensions.

Notre approche est enfin transverse (tous types de MCO, plusieurs milieux et plusieurs armées). Nous pensons qu'une approche transverse permet de mettre en évidence des solutions pensées pour un milieu mais potentiellement applicables à un autre milieu. Par exemple des drones aériens initialement pensés pour inspecter des cellules d'aéronefs peuvent également être envisagés pour inspecter des superstructures de navires.

6. MÉTHODE ET TERRAIN

Veille bibliographique

Tout d'abord, nous avons réalisé une veille bibliographique approfondie sur le potentiel d'application (et les limites) des nouvelles technologies identifiées dans le MCO et issues de l'industrie 4.0. Les sources sont pour l'essentiel de trois types :

- La littérature académique : compte tenu de « l'orientation technologique » du sujet, notre choix a prioritairement porté sur des revues et ouvrages référencés en sciences (notamment en sciences de l'ingénieur, en informatique ou en recherche opérationnelle). Secondairement, nous avons examiné la littérature existante en économie et en gestion.
- La presse spécialisée « défense » (papier et Web) : la presse spécialisée sur les questions de défense et de sécurité est une source d'exemples, d'études de cas et d'illustrations chiffrées de premier choix.
- Les rapports de consultants : les sociétés de *consulting* (par exemple Boston Consulting Group, Ernst & Young, etc.) sont parmi les premières à avoir travaillé sur ces nouvelles technologies et donc à fournir des informations chiffrées sur certains aspects de leur mise en œuvre au sein des organisations (entreprises, ministères, etc.) via notamment des enquêtes,

l'achat et très souvent la collecte de données originales lors d'enquêtes de terrain.

- Les rapports officiels : il s'agit essentiellement de rapports parlementaires ou encore de textes officiels du ministère des Armées.

Entretiens

L'approche par la littérature est enrichie par un important travail de terrain, qualitatif, qui s'appuie sur la conduite de 23 entretiens semi-directifs auprès des acteurs publics en charge du MCO des matériels de défense (DMAé [ex-SIMMAD], SIMMT, SSF, DGA, EMA, SIAé)²⁸ mais aussi des acteurs privés et tout particulièrement les grands groupes industriels (Safran, Naval Group, Airbus, Arquus [ex-RTD], Nexter) – nous avons précisé en annexe 1 la liste des personnes rencontrées.

La durée moyenne des entretiens a été de 92 minutes (minimum de 50 minutes et maximum de 130 minutes). Dans leur grande majorité, les entretiens se sont déroulés sur le lieu de travail des personnes interviewées. Nous précisons en annexe 2 la durée de ces entretiens et la ventilation du temps d'entretien entre les différents acteurs.

Deux types de questionnaires ont servi de support aux entretiens. Un premier à destination des personnes exerçant leur activité professionnelle dans une structure publique et un second à destination des industriels du secteur privé. Les questionnaires tels qu'ils ont été proposés sont présentés en annexe 3. Ils comportent deux parties :

- La première partie porte sur les technologies, dont l'objectif est de faire émerger les avantages et les inconvénients

28. DMAé (Direction de la maintenance aéronautique), SIMMAD (Structure intégrée de maintien en condition opérationnelle des matériels aéronautiques du ministère de la Défense), SIMMT (Structure intégrée du maintien en condition opérationnelle des matériels terrestres), SSF (Service de soutien de la flotte), DGA (Direction générale de l'armement), EMA (État-major des armées), SIAé (Service industriel de l'aéronautique).

des technologies tels qu'ils sont perçus ou envisagés par les acteurs d'une structure ou d'un milieu donné.

- la seconde partie porte sur les évolutions envisagées des structures, au regard de l'implémentation de ces technologies, par exemple l'évolution des modèles d'affaires, des dispositifs de formation ou les financements nécessaires.

7. PLAN DE L'ÉTUDE

Cette étude comporte cinq parties. Dans la première nous présentons la notion d'industrie 4.0 telle qu'elle est développée dans la littérature, avec notamment l'origine du concept, les principales technologies et ce que l'on peut en attendre. Nous abordons ensuite nos quatre grappes de technologies et leur potentielle application au MCO des matériels de défense. La deuxième partie s'intéresse à l'Internet des objets (IoT) avec les notions d'objets connectés et de maintenance prédictive. La troisième partie aborde l'impression 3D (fabrication et réparation additive) et ses principaux enjeux dans le MCO. La quatrième partie s'intéresse aux techniques de virtualisation (réalité virtuelle et réalité augmentée notamment) et la cinquième interroge la notion d'automatisation des processus de production dans le MCO avec une focalisation sur l'usage des robots, des cobots et des drones. La conclusion propose une synthèse de l'étude.

I. L'INDUSTRIE 4.0 : DU CONCEPT AU CONCRET

Le concept d'*Industry 4.0* est introduit de façon officielle à la foire de Hanovre en 2011¹. Il y est présenté comme une industrie dont le fonctionnement reposerait sur des équipements connectés (*smart process*), des produits intelligents (*smart products*) et une interconnexion avancée entre les entreprises et les consommateurs mais aussi entre les entreprises elles-mêmes.

Il s'inscrit dans un contexte où l'Allemagne, depuis le milieu des années 1990, concurrencée par les pays émergents (Chine, Inde et Brésil notamment) et par la montée en gamme de ces derniers, s'est positionnée dans une attitude défensive vis-à-vis de ses marchés et de sa base industrielle. À partir du milieu des années 2000, un mouvement plus offensif et volontariste de structuration des acteurs de l'industrie émerge. Il vise notamment à mener une réflexion globale sur l'avenir de l'industrie, en regroupant les acteurs industriels, politiques et académiques au sein des *Fraunhofer Institute*.

Cette réflexion prend également acte des bouleversements induits par le développement et la diffusion rapides des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), qui induisent en particulier un changement des usages et l'apparition de nouvelles formes de concurrence (plateformes de service, désintermédiation, etc.) qui obligent les entreprises industrielles à repenser leur positionnement et leur stratégie.

Comme le soulignent D. Kohler et J.-D. Weisz, « une sorte de course contre la montre est engagée dans cette révolution numérique où se télescopent de manière assez unique un changement de paradigme industriel et un changement sociétal, et où la nature même des modes d'apprentissage des savoirs est en train de se redéfinir² ». Autrement dit, la transition de l'industrie vers

1. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 (chap. 1) », *art. cit.*

2. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.*, p. 11.

l'industrie 4.0 ne constituerait pas seulement un enjeu technique et économique, ce serait également un enjeu sociétal et politique.

Si le concept d'industrie 4.0 est l'objet de travaux de recherche de plus en plus nombreux, beaucoup d'articles soulignent les difficultés à en concevoir une définition synthétique³, compte tenu du foisonnement d'idées, de concepts et de notions qui gravitent autour de ce terme.

Cette première partie vise ainsi à présenter et définir ce que nous entendons par le concept d'« industrie 4.0 », dont la définition même est un thème de recherche en soi⁴. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous proposons ci-après quelques éléments de contextualisation et de positionnement historique sur cette notion, afin de mieux cerner et comprendre comment certaines technologies constitutives de l'industrie 4.0 peuvent s'appliquer dans le MCO des matériels de défense et comment nous allons les articuler dans la présente étude. Pour plus de précisions sur ce concept, nous invitons le lecteur à consulter les ouvrages de synthèse les plus récents⁵.

1. DE LA PREMIÈRE À LA QUATRIÈME RÉVOLUTION INDUSTRIELLE ?

Positionnement historique

La plupart des travaux traitant de la question de la numérisation des entreprises et de l'industrie 4.0 s'accordent pour inscrire ce concept dans le cadre d'une quatrième révolution industrielle⁶, dont la figure 2 présente une mise en perspective temporelle.

D'après ces travaux, la première révolution industrielle démarre en Europe – plus exactement au Royaume-Uni – à la fin du XVIII^e siècle. Elle se fonde sur la mécanisation permise par la

3. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*

4. *Ibid.*

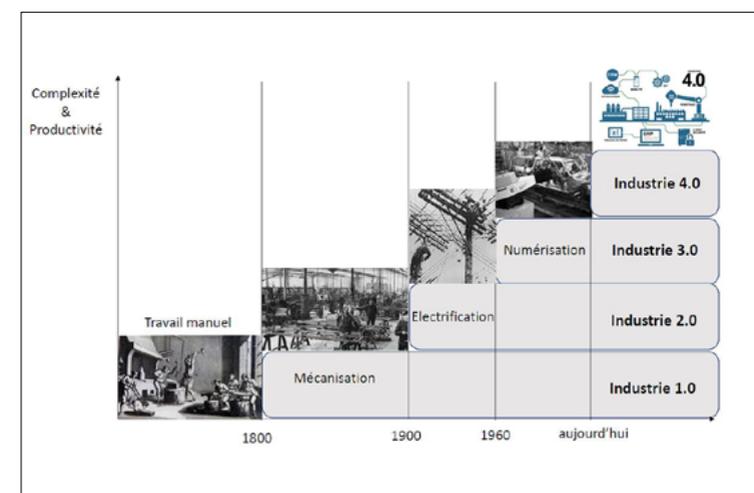
5. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.* ; N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, Dunod, 2018, 227 p. ; A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, 2018.

6. K. Schwab, *La Quatrième Révolution industrielle*, *op. cit.*

force hydraulique, puis par l'invention de la machine à vapeur, appliquée à divers secteurs industriels dont celui du textile, l'extraction minière, la production d'acier et aussi les transports. Les machines-outils sont commandées manuellement⁷. On passe progressivement d'une production relativement décentralisée dans les campagnes et dans les ateliers artisanaux à une concentration de la production dans les villes au sein d'unités de production mécanisées et de taille plus importante.

Figure 2

De la mécanisation à l'industrie 4.0, les quatre révolutions industrielles



Source : auteurs, d'après Drath et Horch (2014) et Liu *et al.* (2018)⁸

La seconde révolution industrielle est fondée sur le moteur à explosion et le développement de l'électricité comme sources principales d'énergie, notamment dans la sphère productive. La

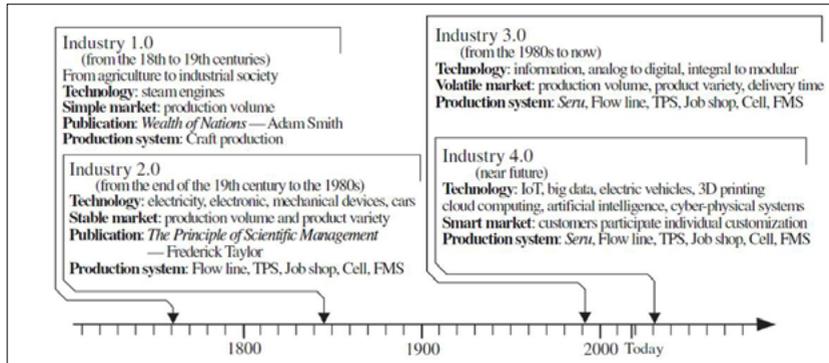
7. C. Liu *et al.*, « A systematic development method for cyber-physical machine tools », *art. cit.*

8. R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0 – Hit or Hype? », *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, n°2, 2014, p. 56-58 ; C. Liu *et al.*, « A systematic development method for cyber-physical machine tools », *Journal of Manufacturing Systems*, 2018.

production de masse, et plus particulièrement la mécanisation des chaînes de production dans l'industrie (par exemple le convoyeur de Ford), sont mises en place. Ces innovations technologiques se combinent avec l'application systématique d'une innovation organisationnelle : l'organisation scientifique du travail (OST).

Figure 3

De la première révolution industrielle à l'industrie 4.0



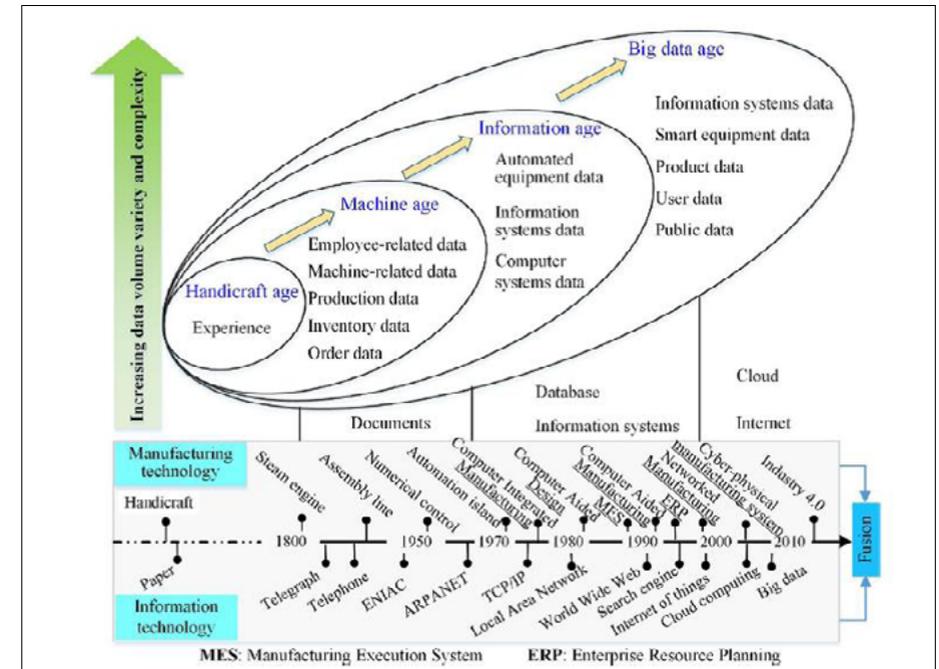
Source : Yin et al. (2017)⁹

La troisième révolution industrielle signe l'entrée de la production industrielle dans le monde du numérique avec l'arrivée des machines à commande numérique à la fin des années 1960¹⁰. On assiste au développement de l'électronique, de la programmation informatique et de l'automatisation des machines-outils qui permettent encore de gagner en productivité, mais aussi en flexibilité (par exemple des machines à commande numérique reprogrammables permettent de réaliser des pièces différentes). Ces machines-outils sont pilotées électroniquement et le contrôle numérique par ordinateur se développe¹¹.

9. Y. Yin, K. E. Stecke et D. Li, « The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0 », *International Journal of Production Research*, 2017.

10. R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0 - Hit or Hype? », *art. cit.*

11. C. Liu et al., « A systematic development method for cyber-physical machine tools », *art. cit.*

Figure 4
Évolution des données dans l'industrie

Source : Tao et al. (2018)¹²

La quatrième révolution industrielle se situe d'une certaine manière dans le prolongement de la troisième révolution industrielle, mais aux technologies de cette dernière se rajoutent de nouvelles technologies, qui permettent aux unités de production de gagner en autonomie, en productivité, en flexibilité et en sécurité. Elle s'appuie notamment sur le développement des technologies numériques, en particulier les réseaux de communication et les moyens de stockage des données (Internet et réseaux informatiques, technologies du cloud) et les possibilités de traitement de l'information offertes par les performances des équipements informatiques (capacités de calcul).

12. F. Tao et al., « Data-driven smart manufacturing », *Journal of Manufacturing Systems*, 2018.

Elle s'inscrit également dans la logique d'une « économie de l'information », qui vise, grâce à ces capacités techniques, à valoriser des données produites en très grand volume (big data), de natures très diverses, collectées par des capteurs installés en grand nombre sur des bâtiments, des machines-outils, des robots, des outillages ou des produits finis.

L'industrie 4.0 : une politique industrielle ?

Comme indiqué plus haut, le concept d'*Industry 4.0* est apparu en Allemagne en 2011, à l'occasion de la foire de Hanovre en 2011¹³, dans un contexte de coordination des acteurs industriels allemands pour faire face à la concurrence des autres pays et à celle suscitée par les nouvelles entreprises du numérique. La structuration de ce concept a permis de mettre en place des initiatives de politiques industrielles soutenues par différents États ou organismes, sous des formes variées. En effet, si le concept d'industrie 4.0 a émergé en Allemagne, le développement des technologies afférentes affecte les systèmes productifs d'autres pays, qui cherchent eux aussi à accompagner et structurer le développement des nouvelles technologies.

En 2012, le gouvernement allemand lance le plan d'action *High-Tech Strategy 2020* concernant le financement des technologies de rupture¹⁴. Un des projets du plan, spécifiquement dédié à l'industrie 4.0¹⁵, prend un caractère national et politique fin 2013 avec la signature d'un contrat de coalition de gouvernement entre le parti chrétien démocrate (CDU), son allié l'Union des chrétiens sociaux et le Parti social-démocrate (SPD) s'accordant pour accompagner la digitalisation des entreprises¹⁶. Les acteurs allemands souhaitent dans ce cadre prendre le leadership par la

13. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*

14. Y. Liao *et al.*, « Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal », *art. cit.*

15. H. Kagermann, W. Wahlster et J. Helbig, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, Berlin, Industrie 4.0 Working Group of Acatech, 2013.

16. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.*

constitution de standards et de normes, principalement sur les données et applications numériques¹⁷.

En 2012, aux États-Unis, le gouvernement lance une série de discussions et de recommandations sous le terme *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP)¹⁸. Ce programme bénéficie d'un budget de 2,2 milliards de dollars pour développer des « usines intelligentes » et permettre la création d'emplois sur le territoire en favorisant les relocalisations d'activités industrielles. En 2013, le *National Network for Manufacturing Innovation* (NNMI) est créé avec un budget de 1,8 milliard de dollars sur 8 ans¹⁹. Il vise à favoriser le développement de la fabrication additive, les nouveaux matériaux, les énergies durables et la numérisation de la chaîne de valeur dans son ensemble. Ces initiatives posent les bases du concept d'*Industrial Internet*²⁰, équivalent américain du concept d'*Industry 4.0*.

La France lance en 2013 une revue stratégique intitulée « La nouvelle France industrielle » et cible 34 secteurs prioritaires en termes de politique industrielle et d'accompagnement dans la transition vers « l'usine du futur ». Ce plan consiste en un programme d'accompagnement méthodologique et financier des PME et ETI, assorti d'une enveloppe d'environ un milliard d'euros²¹. En complément, le projet « Industrie du futur », lancé en 2015, a pour objectif de moderniser l'appareil productif français, en accompagnant les entreprises dans la transition numérique pour s'adapter aux nouveaux usages et augmenter leur compétitivité.

Le concept d'industrie 4.0 a également des déclinaisons régionales. Par exemple, le pays Basque a lancé un plan

17. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.* ; D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.*

18. R. Rafael, A. J. Shirley et A. Liveris, *Report To The President Accelerating U.S. Advanced Manufacturing*, Washington D.C., The President's Council of Advisors on Science and Technology, 2014.

19. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

20. S. Wang *et al.*, « Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, n° 1, 2016.

21. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

« Basque 4.0 »²². La région Centre-Val de Loire a adopté une initiative similaire avec un véritable diagnostic territorial visant à aider les acteurs locaux à se saisir des concepts et du potentiel de l'industrie 4.0 pour leur développement économique²³.

En 2012, le Royaume-Uni lance le plan *Catapult* dont un axe vise à mettre en réseau des centres de recherche de pointe et des entreprises industrielles dans les domaines de la fabrication avancée, du numérique et dans les procédés industriels. En 2012, le gouvernement britannique accorde 170 millions de livres sterling à un fonds appelé *Advanced Manufacturing Supply Chain*²⁴. En 2013, il lance à son tour un exercice de prospective sur l'avenir de l'industrie du Royaume-Uni à l'horizon 2050 intitulé *Future of Manufacturing*. La Commission européenne accompagne le mouvement en Europe en lançant une initiative *Factories of the Future* en 2014, qui s'inscrit dans le cadre du programme de recherche H2020 (2014-2020).

D'autres pays européens adoptent des initiatives pour accompagner la numérisation de l'industrie. L'Italie notamment, avec son cluster *Fabrica Intelligente* créé en 2013 (47 millions d'euros) ou encore la Belgique avec son programme *Made different – Factories of the Future*, davantage axé sur la recherche²⁵. L'Union européenne contribue à structurer les initiatives nationales. Le programme Horizon 2020 du 8^e PCRD inclut une initiative *Factories of the Future* (FoF) visant à soutenir l'industrie dans le développement de technologies clefs génériques (comme l'impression 3D par exemple). Dans ce cadre, la Commission européenne s'est engagée à fournir des financements à hauteur de 1,15 milliard d'euros (sur sept ans) pour soutenir le développement de nouvelles techniques et systèmes de production dans l'industrie²⁶.

22. J. H. Ang *et al.*, « Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment », *Énergies*, 2017.

23. CESER Centre-Val de Loire, *Comprendre « l'industrie du futur » en région Centre-Val de Loire*, 2016.

24. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

25. *Ibid.*

26. *Ibid.*

L'Asie s'inscrit également dans ce mouvement de structuration. En 2014, la Corée du Sud lance son initiative stratégique *Innovation in Manufacturing 3.0*²⁷ (23 milliards de dollars) avec pour objectif de faire passer le nombre d'usines intelligentes de 500 à 10 000 d'ici 2020 et d'accompagner 100 000 PME dans leur transformation numérique²⁸. En 2015 le Japon adopte son cinquième *Science and Technology Basic Plan* qui accorde une attention particulière à la robotique dans un secteur industriel appelé à devenir un des leaders mondiaux de la *Super Smart Society*²⁹. La *Japan's National Robot Strategy* vise notamment à développer l'usage des robots dans l'agroalimentaire, les cosmétiques, la pharmacie et la sphère domestique. En 2015 la Chine lance son initiative *Made in China 2025* et son concept « Internet + » avec comme priorité une accélération de l'industrialisation du pays et une montée en gamme dans les processus de production³⁰. L'objectif avoué de la Chine est notamment de devenir le leader mondial en matière de robotisation dans le secteur des biens d'équipement³¹. En 2016 Singapour met en place un plan *Research, Innovation and Enterprise 2020* (REI 2020) pour la modernisation de l'industrie du pays. En 2016 Taïwan adopte un plan *Productivity 4.0*³². D'autres initiatives de ce type existent, notamment dans les pays émergents comme le Brésil, l'Inde ou la Turquie³³.

27. H. S. Kang *et al.*, « Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 3, n° 1, 2016, p. 111-128.

28. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

29. Y. Liao *et al.*, « Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal », *art. cit.*

30. S. Wang *et al.*, « Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook », *art. cit.*

31. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

32. J. Ang *et al.*, « Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment », *art. cit.*

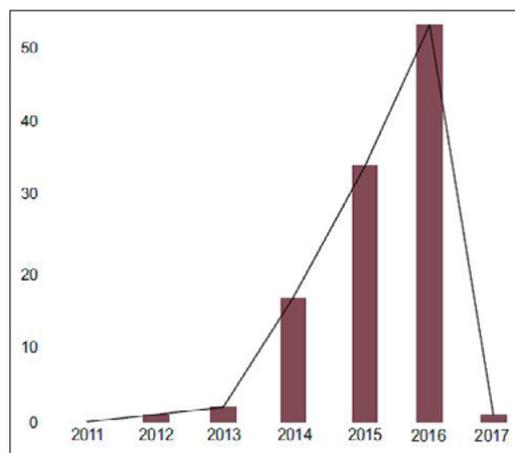
33. G. L. Tortorella et D. Fettermann, « Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 55, n° 8, 2017, p. 2975-2987.

Une thématique de recherche en forte expansion

Il convient enfin de souligner que la thématique de recherche autour de l'industrie 4.0 est relativement récente. Depuis l'apparition du terme « industrie 4.0 » en 2011, les études sur ce concept ne cessent de croître. Un travail bibliographique entrepris par Liao *et al.* (2017)³⁴ montre ainsi qu'en 2013, 5 conférences scientifiques seulement étaient consacrées à l'industrie 4.0, contre 63 en 2015. Les mêmes auteurs montrent également que 5 publications scientifiques étaient consacrées au sujet en 2013 contre 121 en 2015. Le graphique suivant indique une tendance similaire, avec une forte augmentation du nombre d'articles publiés sur le thème de l'industrie 4.0, notamment après 2013 :

Figure 5

Nombre d'articles scientifiques publiés et traitant de l'industrie 4.0



Source : Saucedo-Martinez *et al.* (2017)³⁵

34. Y. Liao *et al.*, « Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal », *art. cit.*, p. 3609-3629.

35. J. A. Saucedo-Martinez *et al.*, « Industry 4.0 framework for management and operations: a review », *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, juin 2017 (la baisse du nombre d'articles en 2017 est liée à la date de fin de collecte des données – février 2017).

2. L'INDUSTRIE 4.0 À TRAVERS TROIS NOTIONS

En dépit d'un certain foisonnement intellectuel (ouvrages, articles de presse et articles scientifiques) et la multiplication de projets typés « industrie 4.0 » portés par les pays, une définition claire et communément admise du concept peine à s'imposer. Pour mieux cerner le concept d'industrie 4.0, il nous a paru important de revenir sur trois aspects fondamentaux du concept, qui apparaissent de façon récurrente dans divers travaux.

En effet, il est possible de considérer l'industrie 4.0 comme un mouvement « poussé par la technologie » (*technology push*)³⁶ et d'en isoler trois concepts de base, fondés sur des technologies variées et pouvant se recouper, qui sous-tendent la philosophie de l'industrie 4.0.

Figure 6

L'industrie 4.0 en trois concepts de base



Source : auteurs, d'après Hofmann et Rüsçh (2017)³⁷

36. J. W. Strandhagen *et al.*, « Importance of Production Environments When Applying Industry 4.0 to Production Logistics – A Multiple Case Study », *Advances in Manufacturing*, vol. 5, n° 4, 2017, p. 344-358.

37. E. Hofmann et M. Rüsçh, « Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics », *Computers in Industry*, vol. 89, 2017, p. 23-24.

Systèmes cyber-physiques (SCP)

La notion de systèmes cyber-physique (SCP)³⁸ est centrale dans la compréhension de l'industrie 4.0, de son fonctionnement et de ses potentialités. Les SCP désignent l'intégration de processus informatiques (données, calculs, etc.) et physiques (appareils électroniques, machines-outils, etc.)³⁹. Plus spécifiquement « les systèmes cyber-physiques (SCP) regroupent des systèmes embarqués, des processus de production, des logistiques d'ingénierie, de coordination et de management, tout comme des services Internet qui utilisent des capteurs pour récupérer des données et agissent sur des processus physiques au moyen d'actionneurs. Ils sont connectés les uns aux autres via des réseaux digitaux, utilisent les données et services disponibles mondialement, et bénéficient d'interfaces hommes-machines multimodales⁴⁰ ».

Ainsi, pour Herterich *et al.*⁴¹, les SCP :

- enregistrent des données grâce à de multiples capteurs et ont une action sur les processus physiques *via* des actionneurs ;
- évaluent et enregistrent des données et interagissent entre les mondes physique et digital ;
- sont connectés les uns aux autres au sein de réseaux globaux *via* des moyens de communication (avec ou sans fils, locaux ou globaux) ;
- utilisent des services et des données disponibles globalement ;
- possèdent des interfaces hommes-machines multimodales.

38. Appelés aussi *cyber-physical systems* (CPS) ou parfois *embedded systems* (C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*, p. 8).

39. E. A. Lee, « Cyber Physical Systems: Design Challenges », *11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008.

40. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.*, p. 25.

41. M. M. Herterich, F. Uebernickel et W. Brenner, « The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 30, 2015, p. 323-328.

Les SCP constituent dans cette perspective une nouvelle « classe » de systèmes techniques qui offrent une interaction forte entre des éléments cyber/virtuel et des éléments physiques⁴². Plus largement, ils sont à l'origine de nouvelles formes d'interaction entre l'homme et les machines⁴³, mais aussi les matières premières et les processus industriels au sein de la *supply chain* qui devient de plus en plus intégrée⁴⁴.

Les SCP peuvent être décrits et étudiés à travers trois niveaux⁴⁵ : les objets physiques, la partie numérique et les services rendus.

L'idée fondamentale dans le concept de SCP est l'intégration de plus en plus poussée entre les composants physiques et numériques, qui permet d'avoir une perception quasiment instantanée des changements et évolutions d'un système dans le monde physique « réel »⁴⁶. Une déclinaison immédiate de ce concept est la possibilité de faire de la maintenance prédictive, c'est-à-dire de pouvoir évaluer quasiment en temps réel les besoins en maintenance d'un système, de façon très ciblée, grâce aux informations transmises par des capteurs et traitées par des algorithmes et moyens de calcul dédiés.

42. S. K. Kaithan et J. D. Mc Calley, « Design Techniques and Applications of Cyberphysical Systems: A Survey », *IEEE Systems Journal*, vol. 9, n° 2, 2015, p. 350-365.

43. J. Strandhagen *et al.*, « Importance of Production Environments When Applying Industry 4.0 to Production Logistics – A Multiple Case Study », *art. cit.*

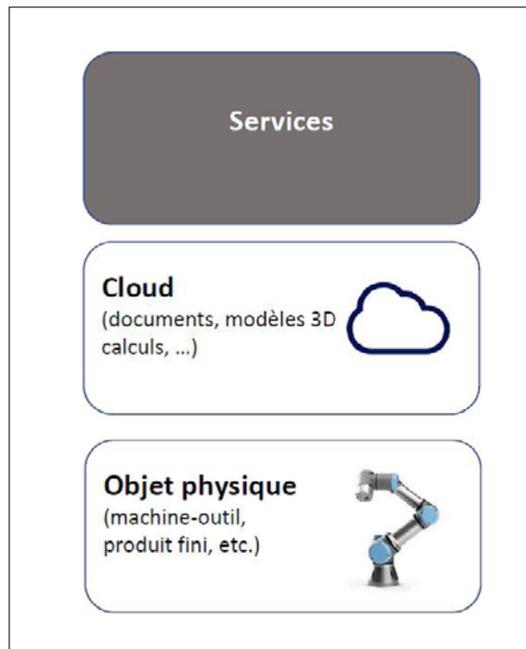
44. S. Maksuti *et al.*, « Towards Flexible and Secure End-to-End Communication in Industry 4.0 », *IEEE 15th International Conference Industrial Informatics (INDIN'2017)*, 2017.

45. R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0 – Hit or Hype? », *art. cit.*

46. J. Lee *et al.*, « Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment », *Manufacturing Letters*, vol. 1, n° 1, 2013, p. 38-41.

Figure 7

Les trois niveaux des systèmes cyber-physiques



Source : auteurs, d'après Drath & Horch (2014)⁴⁷

Un autre exemple est la création pour un système d'un « jumeau numérique », qui en est la modélisation et la représentation dans la sphère numérique, mais qui reste connecté à la sphère physique du système « réel ». Des capteurs transmettent les informations relatives à l'état du système qui sont implémentées au niveau du jumeau numérique afin de prédire, par exemple, l'évolution de ce système⁴⁸. De tels jumeaux numériques sont ainsi mis en place pour des bâtiments de la Marine nationale, mais également pour des systèmes de production (usines), que l'on pourra faire évoluer avec plus de souplesse en fonction des besoins de production.

47. R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0 – Hit or Hype? », art. cit.

48. *Ibid.*

Il découle de la notion assez générale de SCP trois autres notions, qui la recourent, la précisent et la complètent : l'Internet des objets (IoT), l'Internet des services et l'usine intelligente.

L'Internet des objets (IoT)

Fondamentalement, le concept de SCP repose beaucoup, du point de vue des technologies concernées, sur celui d'Internet des objets – *Internet of Things* (IoT), qui sera donc particulièrement développé dans cette première partie.

Pour l'Union internationale des télécommunications, l'Internet des objets est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». Une telle définition renvoie à un nombre important d'objets hétérogènes et mis en réseau⁴⁹.

La définition proposée par l'ARCEP pose le concept d'IoT au regard des enjeux en termes de technologies liées au développement des objets connectés : l'Internet des objets est un « ensemble d'objets physiques connectés qui communiquent via de multiples technologies avec diverses plateformes de traitement de données, en lien avec les vagues du cloud et du big data :

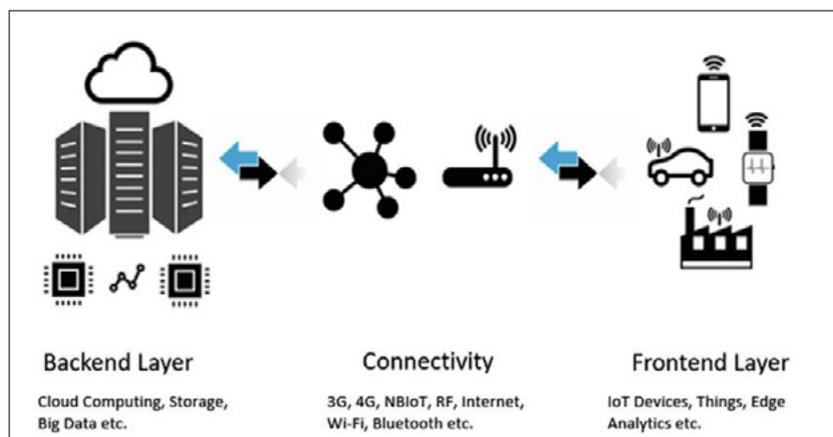
- les objets physiques possèdent des technologies embarquées de capteurs, d'intelligence et de connectivité, leur permettant de communiquer avec d'autres objets ;
- les réseaux de communications électroniques permettent de transporter les données issues des objets ;
- l'informatique, plus ou moins distribuée, apporte les outils pour le stockage, la corrélation et l'analyse de ces données. C'est d'ailleurs souvent dans ce cloud que se trouvent les processus décisionnels à même de rétroagir sur les objets physiques⁵⁰ ».

49. L. Atzori, A. Iera et G. Morabito, « The Internet of Things: A survey », *Computer Networks*, vol. 54, n°15, 2010, p. 2787-2805.

50. Livre blanc *Préparer la révolution de l'Internet des objets*, www.arcep.fr/iot.

Ainsi, l'IoT désigne de façon générale un ensemble d'objets capables de collecter des données et de les échanger via des capteurs et systèmes de mesure⁵¹, grâce à différentes technologies, dont la technologie RFID⁵². Ces objets sont connectés à une plateforme commune, ce qui les rend capables de communiquer entre eux⁵³. La figure ci-après montre un écosystème basique de l'IoT en trois couches : les objets qui collectent, les réseaux qui transmettent et les systèmes qui stockent et traitent les données.

Figure 8
Écosystème basique de l'IoT



Source : Karacay et Aydın (2018)⁵⁴

Le nombre d'objets connectés est en très forte croissance. Les prévisions de déploiement d'objets connectés à un horizon proche

51. G. Karacay et B. Aydın, « Internet of Things and New Value Proposition » (chap. 10) dans A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, op. cit., p. 173-185.

52. M. K. Lim, W. Bahr et S. C. H. Leung, « RFID in the warehouse: A literature analysis (1995–2010) of its applications, benefits, challenges and future trends », *International Journal of Production Economics*, vol. 145, n° 1, 2013, p. 409-430.

53. Ibid.

54. G. Karacay et B. Aydın, « Internet of Things and New Value Proposition » (chap. 10), art. cit., p. 175.

telles qu'établies par les cabinets spécialisés sont vertigineuses autant que dispersées – à l'horizon 2020, elles vont de 26 milliards d'objets connectés à 80 milliards, voire à plus de 150 milliards en 2025, contre 6,5 milliards d'objets connectés en 2016⁵⁵.

L'émergence du concept d'Internet des objets est intimement liée au développement de l'accès au réseau Internet, qui permet d'interconnecter à très large échelle machines ou objets, producteurs autonomes d'information. Ainsi, l'évolution en termes de potentialité offerte par les objets connectés s'appuie principalement sur quatre facteurs : miniaturisation et réduction du coût des capteurs, expansion des réseaux de communication, augmentation des capacités de calcul et de stockage et capacités de traitement des données⁵⁶.

- *Miniaturisation et réduction du coût des capteurs*

Les efforts continus de miniaturisation des capteurs ont facilité leur insertion dans les équipements. Par exemple, un smartphone incorporait en moyenne trois capteurs en 2007 (accéléromètre, proximité, lumière ambiante) contre au moins dix en 2014⁵⁷. La figure 9 illustre cette réduction de la taille des capteurs de type MEMS (*Microelectromechanical systems*) à travers l'exemple des accéléromètres.

La réduction concomitante du coût des capteurs est liée notamment à la dynamique du marché des téléphones mobiles. Par exemple, le coût unitaire des accéléromètres, utilisés dans les téléphones mobiles est passé de 14 dollars US en 2007 à seulement 0,5 dollar en 2015. Un LIDAR⁵⁸ coûtait 75 000 dollars US en 2007 contre seulement 250 dollars en 2016 avec des projections pour 100 dollars voire moins en 2021. L'évolution du coût moyen des capteurs est ainsi nettement orientée à la baisse depuis le début des années 1990 (figure 10).

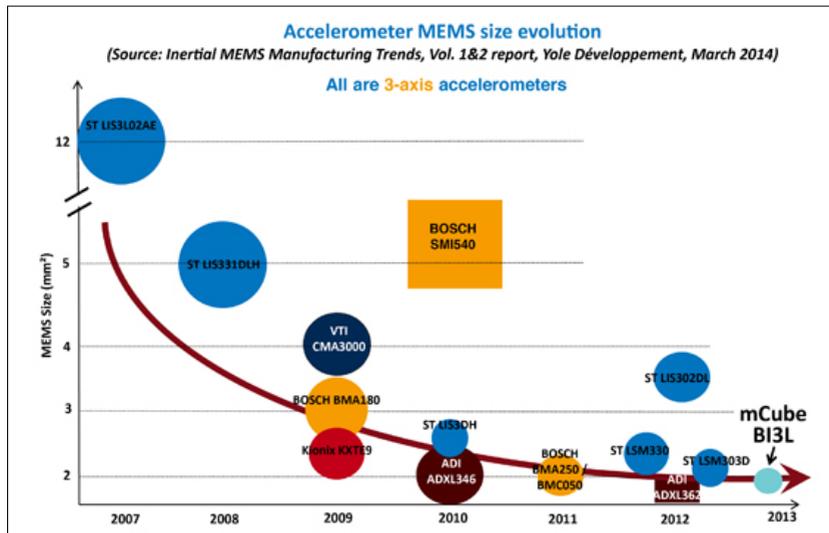
55. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit. ; M. Nemri, « Demain, l'Internet des objets », *France Stratégie*, 2015.

56. G. Karacay et B. Aydın, « Internet of Things and New Value Proposition (chap. 10) », art. cit.

57. J. Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT)*, Deloitte, 2016.

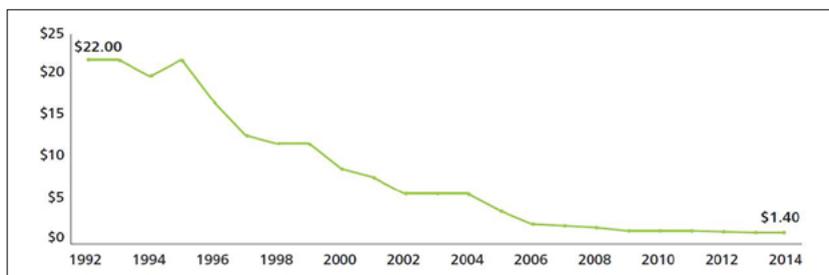
58. LIDAR (Laser detection and ranging) : appareil qui émet un faisceau laser et en reçoit l'écho (comme le radar), permettant de déterminer la distance d'un objet.

Figure 9
Taille des accéléromètres (2007-2013)



Source : Inertial MEMS Manufacturing trends, vol. 1&2, Yole department, 2014 (graphique récupéré à l'adresse suivante : <http://eecatalog.com/sensors/2014/10/02/integrated-mems-is-powering-the-Internet-of-moving-things/>)

Figure 10
Coût des capteurs 1992-2014 (dollars US)



Source : Holdowsky et al. (2016)⁵⁹

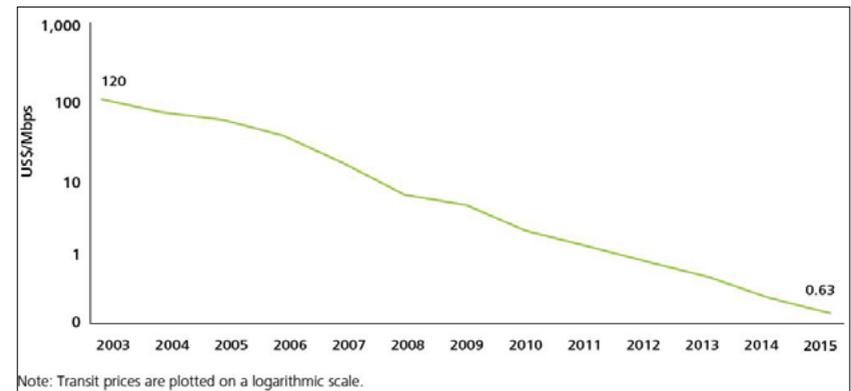
• Développement d'Internet et des réseaux de communication

Le développement de l'accès à Internet, et aux nombreux services associés, est un des moteurs du développement des objets connectés. Le taux de pénétration mondiale d'Internet (nombre d'utilisateurs ayant un accès domestique à Internet) représente en 2016 plus de 40 % de la population mondiale, contre 8 % en 2001 et 32 % en 2011⁶⁰.

Parallèlement à cette expansion, le coût d'accès à Internet a également fortement diminué, ce qui contribue d'autant au développement des objets connectés - voir figure 11, l'évolution du prix de transit par Internet aux États-Unis (échelle logarithmique)⁶¹.

Figure 11

Évolution du prix de transit par Internet aux États-Unis (dollars US/Mbps)



Source : Holdowsky et al. (2016)⁶²

59. J. Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT)*, op. cit.

60. www.internetlivestats.com/internet-users

61. J. Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT)*, op. cit.

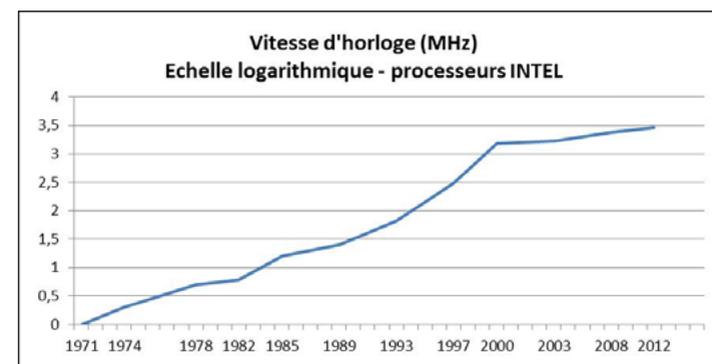
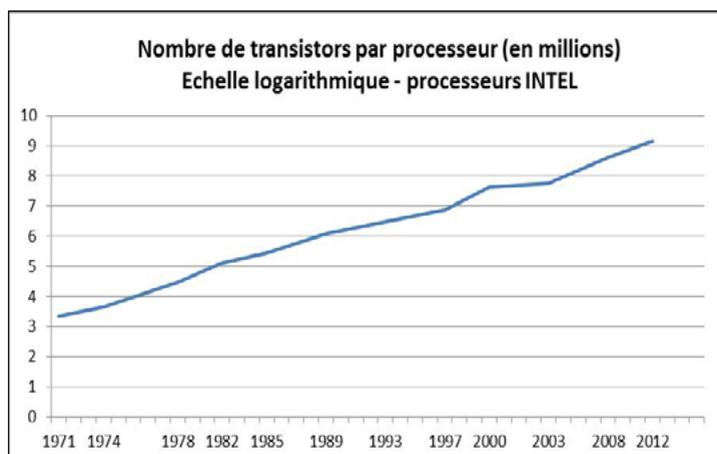
62. *Ibid.*

- *Capacités de calcul et de stockage*

L'accroissement des capacités de calcul et de stockage constitue également un facteur déterminant pour l'expansion des objets connectés, qu'il s'agisse de capacités embarquées ou de capacités délocalisées destinées au traitement de données. Ces capacités ont évolué de façon exponentielle (la fameuse loi de Moore et ses nombreuses déclinaisons), comme l'illustrent les deux graphiques (figure 12) qui présentent (en échelle logarithmique), l'évolution temporelle du nombre de transistors par processeur et de la vitesse d'horloge (données pour les processeurs Intel). Les capacités de stockage ont également suivi une évolution exponentielle, concomitamment à une baisse continue de leur coût (figure 13)⁶³.

Figure 12

Évolution des capacités des processeurs

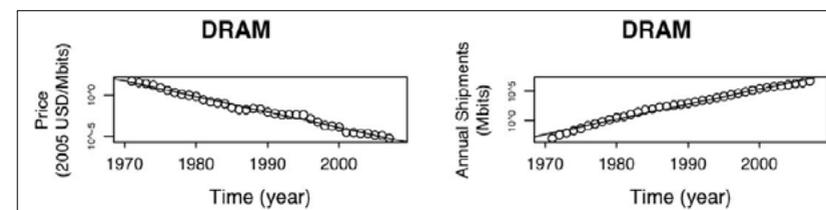


Source : auteurs, d'après Intel

(<https://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-transistors-to-transformations-brochure.html>)

Figure 13

Des capacités de stockage et de leur coût

Source : B. Nagy et al. (2013)⁶⁴

- *Capacités de traitement des données*

Parallèlement à l'accroissement des capacités électroniques de traitement de l'information, le développement et la disponibilité d'algorithmes spécifiques de traitement de l'information constituent le dernier facteur expliquant le développement de l'IoT.

63. Bela Nagy et al., « Statistical basis for predicting technological progress », *PlosOne*, 28 février 2013.

64. *Ibid.*

Si les objets connectés se développent aujourd’hui beaucoup dans la sphère domestique (domotique, loisir, santé, etc.), ils ont d’abord été utilisés dans les processus de production (gestion des outils et pièces détachées, traçabilité des produits, suivi et pilotage de la chaîne logistique). Ce sous-ensemble de l’IoT est parfois appelé Internet industriel des objets (IIoT), à savoir la mise en réseau systématique et permanente d’objets physiques participant au processus de production mais aussi de consommation (machines-outils, outillages utilisés dans le processus de production mais également produits finis) et ce sur l’ensemble du cycle de vie des produits (de l’amont à l’aval). Dans l’industrie, sur une ligne de production, chaque automate, chaque moteur, chaque variateur, peut ainsi informer les autres composants de la ligne de son état et fournir les données qui leur permettront de se paramétrer automatiquement, sans passer par un système centralisé, ce qui réduit les temps de réaction de l’ensemble de la chaîne⁶⁵. De plus, l’ensemble de la ligne de production est capable de s’autodiagnostiquer et d’effectuer des appels aux fournisseurs (matières premières, pièces détachées, services de maintenance), optimisant ainsi la *supply chain*⁶⁶. Enfin, les produits finis collectent des données sur les usagers, lesquelles peuvent être utiles aux producteurs pour fournir des services à haute valeur ajoutée autour de leurs produits.

L’IoT permet *in fine* aux organisations de développer de nouvelles capacités pour les processus, les produits et les services. Ces capacités peuvent être regroupées en quatre classes : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie⁶⁷ :

65. N. Julien et E. Martin, *L’Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

66. Par *supply chain*, nous entendons « la fonction stratégique d’intégration et d’optimisation globale des flux du fournisseur au client » (N. Julien et E. Martin, *L’Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit., p. 43). Il s’agit d’une vision étendue de la chaîne logistique d’une organisation qui aboutit au partage de l’information et des prises de décisions via notamment l’intégration des systèmes d’information (par exemple entre une usine et un fournisseur).

67. M. Porter et J. E. Heppelmann, « How smart, connected products are transforming competition », *Harvard Business Review*, vol. 92, n° 11, 2014, p. 64-88 ; M. Porter et J. E. Heppelmann, « How smart, connected products are transforming companies », *Harvard Business Review*, vol. 93, n° 10, 2015, p. 97-114.

- **Surveillance** : les capacités numériques et de connectivité sont mobilisées pour surveiller en temps réel l’état ou le fonctionnement d’un système (par exemple une usine) et son environnement extérieur. Grâce aux capteurs et aux données collectées, le système peut émettre des alertes pour avertir les utilisateurs. La surveillance systématique permet de suivre l’évolution des caractéristiques du système et de disposer d’un historique de fonctionnement. Par exemple, les voitures connectées disposent de capteurs permettant de surveiller en permanence l’état des batteries.

- **Contrôle** : le système est contrôlé par des algorithmes spécifiques. Ces algorithmes déterminent une action simple du système pour répondre aux changements de son état ou de son environnement. Cette fonction permet aussi à l’utilisateur d’interagir avec le système pour en personnaliser le comportement. Par exemple, les voitures connectées contrôlent l’intégrité du véhicule et téléchargent régulièrement des logiciels ou des données nécessaires à la correction de problèmes éventuels détectés par le véhicule ou signalés par le constructeur.

- **Optimisation** : les flux des données produites par les capteurs de surveillance, associés à la capacité de contrôle, permettent d’optimiser les performances du système. Il devient alors possible de conduire des analyses sur les données produites par les usagers et d’appliquer des méthodes de calculs – notamment de *big data analytics* – pour optimiser le système dans son ensemble. Ainsi, l’analyse de l’historique des données sur une voiture connectée permet d’établir un plan de maintenance adapté à son usage (par exemple conduite sport ou conduite en environnement urbain), voire de procéder à certaines modifications du véhicule.

- **Autonomisation** : avec cette fonction avancée, les capacités de surveillance, de contrôle et d’optimisation se combinent pour conférer de l’autonomie au système. Grâce aux techniques d’intelligence artificielle (IA), ce dernier est capable d’apprendre en exploitant les données produites par son environnement, d’autodiagnostiquer ses besoins et

de s'adapter aux préférences de l'utilisateur. Les systèmes autonomes peuvent agir en coordination, en temps réel, avec d'autres produits ou systèmes de leur environnement. Dans le cas de la voiture connectée, un certain nombre d'opérations peuvent être réalisées par le véhicule sans intervention de l'utilisateur (par exemple commande d'une pièce détachée, prise de rendez-vous pour une visite au centre de maintenance, *updating* d'un logiciel, réservation d'emplacement de parking).

De l'IoT à l'Internet des services et ses applications

L'Internet des services est constitué par les usagers (par exemple les clients), une infrastructure de communication (par exemple Internet) et les services eux-mêmes⁶⁸. Il constitue la partie complémentaire orientée « applications » de l'IoT dans la construction du concept de SCP.

La disponibilité des données et les possibilités d'analyse de ces dernières, selon des techniques analytiques fondées sur le big data et l'intelligence artificielle par exemple, offrent des opportunités de développement de nouveaux services⁶⁹, qui viennent de plus en plus en accompagnement de biens et/ou de processus de production.

Dans l'industrie 4.0, le produit devient ainsi indissociable du service, dans une logique d'économie de la fonctionnalité fondée sur la valorisation de l'usage et du service. La valorisation du produit tend alors à se fonder sur un modèle d'affaire s'appuyant sur l'exploitation et la valorisation des données des usagers, avec un couplage produit/services plus important que dans le modèle traditionnel de la production de biens. L'industrie « du futur » se caractérise par un double mouvement de continuité et de convergence entre la production de biens et les innovations

68. P. Buxmann, P. Hess et R. Ruggaber, « Internet of Services », *Business & Information Systems Engineering*, vol. 5, 2009, p. 341-342.

69. Reinhard Geissbauer *et al.*, *Industry 4.0: Building the digital enterprise*, Price Waterhouse Coopers, 2016.

de service⁷⁰ comme par exemple le réglage personnalisé du produit, de la télémaintenance, de la mise à jour fonctionnelle ou des conseils autour de l'utilisation. Certains auteurs parlent même de « méta-produits » pour désigner des produits fortement axés sur le client, « intelligents » et personnalisables, qui intègrent des unités sensorielles/informatiques et puisent de l'information distribuée dans le cloud⁷¹.

Cette dynamique s'inscrit dans une logique de « servicialisation » des produits, qui est fondée sur l'émergence de nouveaux modèles d'affaires. Dans certains cas, la frontière entre produits et services est discutable. Dans un univers connecté, la prédominance de l'information fournie par le produit ou le service connecté aura tendance à déterminer sa classification. Par exemple, un réfrigérateur « intelligent » avec une fonction d'alarme lorsque la porte est mal fermée reste un réfrigérateur (produit) alors qu'une montre connectée fournissant des informations relatives à l'état de santé d'un individu sera plutôt un service dans la mesure où l'artefact physique n'existe que pour fournir un service donné.

Les domaines d'application de ce type de relations entre objets mis en réseau sont très variés (leur description dépasse le cadre de cette étude). La figure 14 présente une vue d'ensemble de l'IoT et des industries ou domaines de l'économie et de la société qui sont concernés.

Les exemples d'applications de l'IoT et, par extension de l'Internet des services, se retrouvent dans de nombreux domaines de la vie économique et sociale.

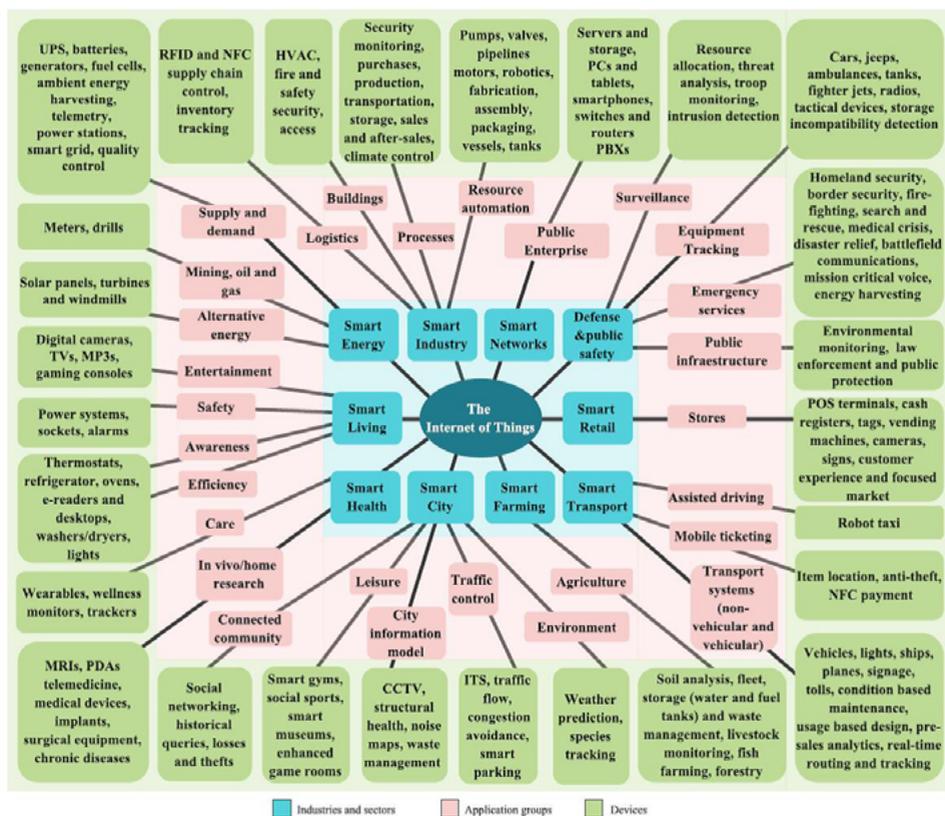
Dans le transport, la généralisation de l'usage des capteurs permet le suivi des flottes de véhicules (autonomes ou non), et parfois de les piloter à distance, ainsi que de mettre en œuvre des systèmes de maintenance prédictive.

70. P. Veltz, *La Société hyper-industrielle. Le nouveau capitalisme productif*, *op. cit.*

71. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*, p. 41.

Figure 14

Application de l'IoT, industries concernées, applications et appareils



Source: Fraga-Lamas et al. (2016)⁷²

Dans l'agriculture, des capteurs dans le sol peuvent aider un agriculteur à contrôler et suivre les paramètres physico-chimiques d'un sol, comme l'humidité, la dotation en nutriments afin de réguler si nécessaire l'arrosage ou l'apport en fertilisants supplémentaires pour optimiser la production. Dans cette logique,

72. P. Fraga-Lamas et al., « A Review on Internet of Things for Defense and Public Safety », *Sensors*, vol. 16, n° 1644, 2016.

le fabricant de véhicules agricoles John Deere propose des tracteurs connectés à Internet avec une offre de services très variés s'adressant aux agriculteurs (analyse du sol, météorologie, aide à l'irrigation, etc.)⁷³. Les drones occupent une place grandissante dans ces produits supports de services⁷⁴.

Dans la gestion urbaine, l'énergie ou la domotique, le suivi de la collecte des déchets, l'optimisation des flux pour la prévention des effets de congestion, la gestion des parkings, les transports en commun, etc. sont des exemples d'applications qui existent déjà. Elles constituent autant de marchés potentiels : *Smart Home*, *Smart Buildings* et *Smart Cities*, qui proposent à leurs clients de gérer à distance un nombre croissant d'équipements, notamment en vue de maîtriser leur consommation énergétique (économie d'énergie, amélioration du suivi des équipements et des infrastructures, etc.)⁷⁵. Dans le principe, ces services doivent bénéficier à la collectivité (usage plus efficient des ressources) et aux citoyens sur un plan individuel (gains de temps, meilleure qualité de service, nouveaux services répondant à des besoins non couverts).

Les impacts de l'IoT dans le domaine de la santé sont considérables et conduisent à transformer la production de soins *via* les nombreuses données collectées⁷⁶. Ici encore des gains économiques et de qualité de service sont attendus. La « connexion » des malades et le suivi de paramètres physiologiques permet d'éviter des visites médicales de contrôle (et des dépenses) qui deviennent superflues. Le suivi des patients en temps réel permettrait également d'optimiser l'administration de soins et les traitements (nature des traitements mais aussi les quantités de

73. M. Porter et J. Heppelmann, « How smart, connected products are transforming companies », *art. cit.*

74. G. Karacay et B. Aydın, « Internet of Things and New Value Proposition (chap. 10) », *art. cit.*

75. O. Becht et T. Gassiloud, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, *op. cit.*

76. K. Patel, *6 Benefits of IoT for hospitals and healthcare*, <https://www.ibm.com/blogs>, 2017.

médicaments administrés) tout en entraînant une réduction des risques d'erreurs humaines qui seraient liés à des mesures.

Enfin, dans le secteur de la sécurité, de nombreuses applications existent également, tant dans des domaines de la sécurité intérieure (police, maintien de l'ordre, surveillance) que de la défense⁷⁷. De plus en plus d'applications issues de ces technologies se focalisent sur des aspects opérationnels. Ainsi, début 2018, l'US Army Research a attribué 25 millions de dollars à un consortium d'universités pour développer de nouveaux services d'analyse prédictive du champ de bataille en se fondant sur des données collectées par les hommes et les matériels sur le terrain et le big data. Dans la présente étude, les applications « défense » de l'IoT auxquelles nous nous intéressons concernent plus particulièrement le MCO des équipements.

L'usine intelligente ou « smart factory »

Par usine intelligente (*smart factory*), nous entendons une unité de production industrielle combinant automatisation et processus de production s'appuyant sur les systèmes cyber-physiques ainsi que la valorisation des données sous forme de « services-produits » à destination de l'entreprise elle-même ou bien destinés à être vendus sur un marché. Elle constitue en quelque sorte l'implémentation concrète du concept de l'industrie 4.0 aux moyens de production. Dans cette perspective, l'usine du futur serait à la fois :

- Une usine connectée et pilotée par la donnée. Dans cette unité de production industrielle, les systèmes cyber-physiques communiquent entre eux à travers l'Internet des objets et l'Internet des services et assistent les opérateurs et les machines dans l'exécution de leurs tâches. Le flux des données numériques se déploie alors dans trois directions⁷⁸ :

77. P. Fraga-Lamas *et al.*, « A Review on Internet of Things for Defense and Public Safety », *art. cit.*

78. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement, op. cit.*, p. 49.

- Flux horizontal : communication entre outillages connectés pour coordonner la production ;

- Flux vertical : les capteurs dans les outillages permettent des remontées d'information vers les systèmes d'information ;

- Flux temporel : du produit vers le cloud, tout au long du cycle de vie d'un produit, c'est-à-dire de sa conception à son recyclage en passant par sa phase d'utilisation.

- Une usine flexible et performante. L'approche est systématiquement tournée vers les besoins et attentes des clients en cherchant à offrir la différenciation des produits par une configuration personnalisée⁷⁹. Les innovations tant de processus que de produit ou de service sont introduites rapidement.

- Une usine responsable. La prédominance du support numérique dans le processus de production fait tendre l'usine du futur vers le zéro papier⁸⁰. L'optimisation des ressources permise par les nouvelles technologies fait de l'usine du futur une usine plus économe en ressources : centrée sur la complémentarité entre humains et machines, elle permet d'affranchir les collaborateurs des tâches les plus pénibles ou répétitives pour mettre leurs fonctions cognitives au service de l'innovation, de la qualité et de l'adaptation.

Par-delà ces éléments de discours, l'idée sous-jacente est de disposer de moyens de production souples qui permettent une relation directe avec le client, dans l'optique de produire des « séries d'une unité », correspondant à un produit final personnalisé et entièrement adapté au besoin du client. On retrouve dans cette idée la crainte exprimée par les acteurs industriels liée à l'émergence de plateformes numériques qui occupent une position de plus en plus dominante sur le marché (Amazon e.g.), concurrence qui oblige à repenser l'intermédiation avec le client, concomitamment à une nouvelle offre de biens/services au plus près du besoin du client.

79. *Ibid.*

80. Un objectif que l'on retrouve déjà dans les processus de modernisation des usines des années 1980 – Toyotisme – mais qui s'accroît avec le développement des supports numériques de l'information.

3. ESSAI DE SYNTHÈSE ET LIEN AVEC LE MCO

Une tentative de définition

Par-delà les concepts, l'industrie 4.0 s'inscrit dans une dynamique générale qui voit l'introduction dans les processus de production d'un ensemble de technologies – souvent en cours d'émergence, parfois bien développées – dont l'usage dans la sphère productive va croissant et qui bouleverse les relations entre acteurs industriels, intermédiaires et clients.

Plus concrètement, l'étude de Mittal *et al.*⁸¹ recense pas moins de 38 technologies différentes constitutives de l'industrie 4.0, parmi lesquelles, et de façon non exhaustive : les techniques de big data, les techniques de simulation numérique, la réalité virtuelle et augmentée, la robotique, le cloud, la fabrication additive, la RFID, les techniques de RTLS⁸², les technologies de la téléphonie mobile, etc.⁸³. Toutes ces technologies peuvent être combinées et connectées via Internet (ou des techniques alternatives de connexion) ce qui assure la mise en réseau d'objets dispersés⁸⁴. Comme cela a déjà été vu, cette connexion augmente le potentiel d'ensemble des unités de production.

Au final, l'industrie 4.0 peut donc être considérée comme un terme très général – et communément admis – pour désigner des technologies et des concepts dans l'organisation de la chaîne de valeur⁸⁵. Il s'agit de l'intégration des unités de production, de la

81. S. Mittal *et al.*, « Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors », *art. cit.*

82. RTLS : *Real Time Location Systems*.

83. J. Ang *et al.*, « Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment », *art. cit.* ; M. Rüßmann *et al.*, *Industry 4.0 The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, Boston Consulting Group, 2015 ; A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, *op. cit.*

84. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*, p. 6.

85. M. Hermann, T. Pentek et B. Otto, « Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review », Working paper, 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE Computer Society, 2016.

chaîne d'offre (*supply chain*) et des services permettant la mise en place de réseaux ayant une valeur ajoutée⁸⁶.

Si l'expression « industrie 4.0 » se réfère souvent aux processus de fabrication industrielle, il convient selon nous de parler plutôt d'un mouvement affectant la chaîne de production et de consommation dans son ensemble, autrement dit l'ensemble de la chaîne de valeur. Au-delà de l'aspect uniquement productif, l'accroissement des capteurs et les possibilités d'échange en temps réel ouvrent également de nouvelles opportunités dans la définition de produits et services.

Au sein des usines intelligentes, les systèmes cyber-physiques contrôlent et gèrent des processus physiques, créent une copie virtuelle du monde physique et prennent des décisions de façon décentralisée. À travers l'Internet des objets, ces mêmes systèmes cyber-physiques communiquent, à la fois entre eux et avec les opérateurs humains. Enfin, *via* l'Internet des services, des services internes à l'organisation et aussi interorganisations sont proposés et utilisés par l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, de l'amont à l'aval.

Les apports du numérique à cette numérisation de la chaîne de valeur peuvent ainsi se décliner selon trois axes interconnectés :

Axe 1 : Processus de production. L'introduction des technologies du numérique rend les processus plus flexibles et reconfigurables aux variations de la demande. Les décisions de production s'adaptent en temps réel grâce aux machines autonomes et la communication entre machines et systèmes cyber-physiques.

Axe 2 : Produits. Les produits connectés permettent la collecte de données en temps réel. Ces données peuvent être analysées immédiatement et permettre aux moyens de production (machines-outils, process) de s'adapter de manière autonome, ou être utilisées ultérieurement, en vue d'adapter les produits existants à leur environnement d'utilisation ou pour développer de nouveaux produits ou services.

86. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*

Axe 3 : Service. Les données issues du processus de production, d'une part, et générées par les usagers, d'autre part, sont valorisées dans des services qui s'appuient sur des techniques de traitement de données (big data par exemple.) Ces services, parfois innovants, deviennent le fondement de nouveaux modèles d'affaires des entreprises engagées dans l'industrie 4.0.

Que permet l'industrie 4.0 ?

La littérature s'accorde pour dire que les technologies mobilisées dans l'industrie 4.0 permettent de développer/renforcer l'interopérabilité, la virtualisation, la décentralisation, les capacités en temps réel, ainsi que la modularité.

- **Interopérabilité.** Grâce à la mise en réseau des moyens de production, des produits et des services, les différents acteurs de la chaîne de valeur augmentent leur potentiel d'interopérabilité. Fondamentalement, les équipements industriels ne sont pas différents de ce qu'ils étaient il y a encore quelques années. Mais par rapport à l'industrie plus traditionnelle, la rupture introduite par l'industrie 4.0 repose sur le fait que les technologies du numérique ont changé l'interaction des équipements entre eux (machines-outils, outils, objets), des hommes avec les équipements mais aussi des hommes entre eux. La systématisation du numérique dans l'industrie 4.0 présente les caractéristiques d'une révolution transverse.
- **Virtualisation.** Par virtualisation on entend ici le fait que les systèmes cyber-physiques sont reliés à des usines virtuelles et des modèles de simulation, dans le sens où une véritable « copie numérique » du monde réel est réalisée (par exemple une maquette numérique de l'usine, d'un équipement, d'un produit mis sur le marché). En sens inverse, les systèmes cyber-physiques sont capables de contrôler des processus physiques (conception, production, distribution voire commercialisation), donc d'implémenter dans le réel ce qui aura été simulé dans la sphère numérique.

- **Décentralisation.** Les capacités de calcul et les systèmes d'intelligence artificielle augmentent l'autonomie des équipements et la capacité des organisations à prendre des décisions de façon décentralisée. Seules les décisions les plus stratégiques (management stratégique par exemple) resteraient centralisées. Il en résulte une meilleure prise en compte des besoins des clients, une rapidité d'exécution (moins d'intermédiaires) et une réduction des coûts de transaction.

- **Capacités d'analyse en temps réel.** L'activité des équipements et des opérateurs est en permanence mesurée et analysée. Les données sont collectées et analysées en temps réel, ce qui accroît la réactivité d'ensemble du système. Par exemple, en cas de panne d'une ligne de production, le système peut réagir et mettre en service une autre ligne de production ou commander directement un service de maintenance.

- **Flexibilité, modularité, agilité.** La généralisation d'interfaces communes doit permettre des échanges (ou ajouts) de modules de production de type *plug and play*. L'usine intelligente est donc plus réactive lors des fluctuations de la demande ou des changements de caractéristiques des biens produits. Les termes « customisation de masse » sont souvent mis en avant pour désigner ce phénomène. Ceci suppose néanmoins des interfaces communes et une certaine standardisation des logiciels et des équipements, ce qui est loin d'être acquis⁸⁷.

Au final, l'industrie 4.0 est un processus transverse de numérisation de la chaîne de valeur qui modifie profondément les processus de production mais aussi les produits et services produits par les entreprises. Fondamentalement, il s'agit de développer une chaîne de production autonome, dynamique et flexible, intégrant les technologies de l'information et de la communication (TIC) les plus récentes pour rendre possible une production de masse de produits hautement différenciés⁸⁸. Les TIC en parti-

87. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, op. cit.

88. G. Tortorella et D. Fettermann, « Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies », art. cit.

culier permettent l'interconnexion complète de toutes les opérations – production, maintenance, consommation – dans une logique holistique⁸⁹.

Certains auteurs vont même jusqu'à évoquer un concept de mise en réseau de systèmes industriels dans lesquels les machines pourraient interagir entre elles sans contrôle humain⁹⁰. Grâce à l'optimisation des processus – et donc des gains de productivité et des économies – permise par l'adoption d'un ensemble de technologies, l'industrie 4.0 vise ambitieusement à « produire des séries de taille 1 à des coûts équivalents à ceux de la production de masse⁹¹ ».

Compte tenu de l'évolution technologique, l'intégration des concepts de l'industrie 4.0 arrivera inévitablement, qu'on le souhaite ou non⁹². Plus qu'un positionnement stratégique, la transition vers l'usine du futur va certainement devenir un investissement nécessaire. Tous les secteurs de l'industrie seront concernés, certes à des degrés variables. Les effets attendus d'une telle évolution technologique sont difficiles à mesurer, a fortiori d'un point de vue global (par exemple un pays dans son ensemble). Néanmoins, quelques études prospectives se sont essayées à chiffrer les effets que l'on peut attendre de la mise en œuvre de ces technologies.

Ainsi, une étude du cabinet BCG⁹³ publiée en 2015 estime que l'application des principes et des technologies sur lesquelles se fonde l'industrie 4.0 permettrait aux systèmes productifs dans l'industrie d'être 30 % plus rapides et 25 % plus efficaces. Une autre étude, réalisée par l'entreprise Bosch en 2016, montre que la mise en place des technologies de « l'usine

89. J. Saucedo-Martinez *et al.*, « Industry 4.0 framework for management and operations: a review », *art. cit.*

90. D. Ivanov *et al.*, « A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0 », *International Journal of Production Research*, vol. 54, n° 2, 2016, p. 386-402.

91. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, *op. cit.*, p. 9.

92. R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0 – Hit or Hype? », *art. cit.*

93. M. Rüßmann, *et al.*, *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, *op. cit.*

connectée » pourrait accroître la productivité de 30 %⁹⁴. L'usine intelligente de Siemens, à Amberg (Allemagne), a automatisé ses processus à 75 % avec une réduction de ses coûts de 25 %⁹⁵. Dans le secteur aéronautique, le groupe Airbus attend à partir de 2025, une réduction globale du temps de cycle de production de 50 %⁹⁶.

Industrie 4.0 et MCO

Compte tenu de la nature hybride du MCO – entre produit industriel et service – il nous a paru intéressant d'interroger en quoi certaines des technologies ou concepts décrits précédemment sont susceptibles de s'appliquer au MCO des matériels de défense et quels seraient les impacts à envisager.

C'est le point de départ de cette étude, qui n'a cependant pas la prétention d'étudier l'implémentation de l'ensemble des technologies de l'industrie 4.0 dans le MCO. En effet, sur la base des technologies identifiées comme constitutives de l'industrie 4.0, nous avons identifié quatre « grappes de technologies » principales, qui regroupent différentes technologies offrant un ensemble cohérent de fonctionnalités. C'est sur la base de ces grappes de technologies que s'articule l'étude.

L'étude vise à comprendre et à analyser l'impact de ces 4 grappes de technologies sur l'organisation du MCO, et plus précisément sur les trois « grands métiers » du MCO : la production, la logistique et la gestion administrative (voir tableau 3, p. 27).

- La dimension technique et productive concerne la production de biens (par exemple de pièces détachées) et de services (par exemple exécution des tâches de maintenance, services

94. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*, p. 28.

95. <https://www.cgi.fr/blog/secteurs/trente-pourcent-d-augmentation-de-la-productivite-attendue-avec-usine-connectee>.

96. Olivier James, « Pas à pas, Airbus déploie son (incroyable) usine du futur », *L'Usine digitale*, 9 juin 2015, source : <https://www.usine-digitale.fr/editorial/pas-a-pas-airbus-deploie-son-incroyable-usine-du-futur.N334092>.

d'ingénierie). Ainsi, l'introduction de machines d'impression 3D va modifier la façon d'organiser la production et les métiers associés (travail davantage axé sur la machine et son pilotage que l'objet produit). La production croissante de données par les plateformes va engendrer le développement de nouveaux services de maintenance.

- Les technologies de l'industrie 4.0 vont avoir un effet sur la dimension logistique qui est une composante fondamentale de l'activité MCO. Ainsi, l'automatisation des processus de production va simplifier la logistique interne aux unités de production (usines, centres de maintenance) et le suivi numérique des flux (par exemple avec la technologie RFID) permet d'optimiser le suivi des livraisons.

- Par dimension « gestion administrative », nous entendons ici l'ensemble des activités concernant la définition, le suivi et le pilotage des contrats de MCO. Par exemple, la technologie (notamment la collecte massive de données) modifie le contenu des contrats, ce qui entraîne une complexité croissante et donc un besoin différent en termes de ressources humaines pour suivre ces contrats.

Dans la suite de l'étude, en gardant ces trois dimensions à l'esprit, nous nous intéresserons aux effets des quatre grappes de technologies sur le MCO et l'ensemble de son organisation.

II. IOT ET OBJETS CONNECTÉS DANS LE MCO DES MATÉRIELS DE DÉFENSE

Les technologies sous-jacentes à l'Internet des objets ont déjà été évoquées plus haut, nous n'y reviendrons donc pas. Dans cette partie, nous traiterons d'abord de l'intérêt que présentent l'IoT et les objets connectés dans le MCO des matériels de défense (§ 1) ; puis nous détaillerons les différentes limites que l'on peut rencontrer dans l'implémentation de ces technologies dans les processus de MCO (§ 2) ; enfin nous reprendrons ces éléments dans une synthèse globale (§ 3).

1. INTÉRÊT DE L'IOT ET DES OBJETS CONNECTÉS DANS LE MCO DES MATÉRIELS

Notre travail de terrain permet d'identifier les principales applications de l'IoT au MCO des matériels de défense. Ces applications concernent l'exploitation des données pour optimiser la maintenance (maintenance prévisionnelle parfois aussi appelée prédictive), la gestion de la documentation et le suivi de configuration des matériels, la logistique avec la gestion des biens et des pièces détachées, mais aussi la gestion de l'outillage sur les sites de maintenance.

Exploitation des données pour optimiser la maintenance

- *Principes généraux*

Par application de l'IoT au MCO, nous entendons l'utilisation d'équipements connectés, à savoir des matériels de défense (plateformes et systèmes embarqués) instrumentés avec un dispositif de collecte d'informations et de traitement de données, lesquelles peuvent être transmises à un centre de traitement des données. Différents systèmes de collecte de données (capteurs) sont placés sur des matériels de défense, des pièces détachées ou des outillages servant à la maintenance. Ces données

– potentiellement fournies en très grandes quantités et rassemblées dans un *data lake* – sont analysées et traitées grâce à des techniques de calcul fondées sur des algorithmes (big data¹ pour l'analyse d'un très grand nombre de données), dans l'objectif de résoudre voire d'anticiper des problèmes (pannes, défauts, contrôle qualité, localisation d'objets, etc.). De façon générale, cette collecte et ce traitement systématisés des données visent à améliorer le processus de production dans son ensemble. Un des grands enjeux de l'IoT appliqué au MCO est ainsi l'exploitation et les modalités de la mise en œuvre des données collectées par l'ensemble des capteurs embarqués à bord des matériels pour optimiser leur maintenance.

Il existe différentes approches de la maintenance : corrective, préventive, CBM (*Condition Based Maintenance*) et prévisionnelle².

La maintenance corrective est exécutée après détection d'une panne. Elle est par définition non anticipée et l'immobilisation du matériel dépend de l'ampleur de la panne. La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés avec pour objectif de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Il s'agit d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation en fonction de logiques calendaires (par exemple une visite tous les 6 mois ou toutes les 200 heures de vol) ou cycliques (par exemple le nombre de démarrage/arrêt d'un équipement). Dans la mesure où l'on cherche à éviter le plus possible les actions de maintenance corrective, la maintenance préventive est l'approche traditionnelle et dominante dans la maintenance.

1. Par big data, nous entendons « la capacité à collecter, stocker et traiter en temps réel des flux très importants de données de nature diverse en vue de leur appliquer toute sorte de traitements analytiques et statistiques avancés qui relèvent de l'intelligence artificielle (analyse prédictive, *machine learning*, *deep learning*, etc.). Ces traitements puissants visent à révéler des informations difficilement détectables par les voies traditionnelles et susceptibles de créer de la valeur » (N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit., p. 21).

2. Les définitions que nous proposons sont fondées sur la norme NF EN 13306 X 60-319, juin 2011.

En revanche, avec la multiplication de capteurs et systèmes de mesure installés dans les matériels de défense, la *Condition Based Maintenance* (CBM) et la maintenance prévisionnelle se développent. La CBM est une forme de maintenance préventive fondée sur une surveillance du matériel et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement. La surveillance se fait via des capteurs et appareils de mesures embarqués à bord des matériels. La maintenance prévisionnelle³ est une CBM exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. Cette forme de maintenance peut être considérée comme une extension de la CBM dans le sens où, au suivi des paramètres significatifs construits sur des grandeurs instrumentées, est intégré un pronostic pour favoriser une logique anticipative. Ce pronostic est réalisé à partir du traitement des données collectées et potentiellement avec des techniques de *big data analytics*.

Les matériels instrumentés sont souvent qualifiés de HUMS ou *Health and Usage Monitoring System*. Le terme HUMS fait alors référence à toute fonction implémentée sur un matériel (aéronef, véhicule blindé, navire, moteur...) et permettant d'enregistrer et de traiter des informations – en temps réel ou en différé – relatives à l'état de « santé », de performance et de potentiel du matériel.

Les apports des technologies de l'IoT, ou plus exactement du *big data analytics*, vont s'exercer à deux niveaux :

Premier niveau : faire de la maintenance optimisée et individualisée. En mesurant plus précisément les cycles des équipements, les données collectées vont permettre la mise en place de solutions de maintenance plus personnalisées et individualisées, en fonction des besoins de l'utilisateur, selon les types de matériel voire de leurs conditions d'emploi (par exemple un blindé en activité en zone désertique ne nécessite pas le même niveau de service de MCO qu'en métropole, un avion de chasse en mission de reconnaissance avec des vols « à plat » n'utilise pas son potentiel aussi vite qu'un avion en mission d'assaut, etc.). Mettre en place une maintenance optimisée et individualisée consiste à

3. Parfois aussi appelée maintenance prédictive par abus de langage.

éviter la sur-maintenance, par exemple en augmentant le temps d'utilisation d'un matériel pour un même niveau de maintenance. L'analyse approfondie des données collectées permet de mieux mesurer les cycles d'exploitation des équipements et donc de s'écarter des logiques purement calendaires qui prévalent aujourd'hui dans le MCO des matériels de défense.

Deuxième niveau : faire de la maintenance prévisionnelle en anticipant les aléas pour ne plus les subir. L'idée est que le besoin de maintenance (plans d'entretien) doit être défini suivant le résultat de l'exploitation des données générées par un équipement durant son utilisation, et non plus par une documentation (papier ou électronique) qui prédétermine les rythmes et les modalités des opérations de maintenance. L'analyse statistique des données générées par un équipement facilite la détection en amont d'éventuelles anomalies et de risques de panne. Il s'agit alors de sortir de la maintenance statistique « traditionnelle » en adaptant la production de MCO à l'utilisation réelle des flottes et parcs de matériels. Par exemple, actuellement, les protocoles de maintenance, fondés sur des lois statistiques et des intervalles de confiance, imposent souvent de changer des éléments d'un matériel (équipements, pièces ou composants) au bout d'un certain nombre d'heures d'utilisation. Un suivi strict de ces règles peut conduire à changer des éléments avant qu'ils n'aient montré de réels signes de fatigue.

Une analyse fondée sur la collecte de données réelles et précises peut permettre au contraire d'intervenir au bon moment, avant la panne et au moment du seuil de rupture ou de défaillance d'un élément⁴. La maintenance prévisionnelle a alors pour but d'agir sur l'élément défaillant (équipement, composant) au plus près de sa période de dysfonctionnement. En traitant de très nombreux cas, il devient possible de prédire à quel moment la panne surviendra et ainsi de prévoir le remplacement de l'équipement concerné au plus près de ce moment. L'objectif est de réduire le nombre de pannes et le temps d'immobilisation des

4. Ceci suppose toutefois une adaptation du cadre réglementaire car certains programmes de maintenance sont imposés par le régulateur (c'est notamment le cas des flottes d'avions civils en France).

matériels (et donc d'augmenter leur disponibilité) tout en espaçant la fréquence des interventions (réduction des coûts). Il s'agit à la fois d'augmenter le temps d'utilisation d'un matériel (avec une marge de sécurité) juste avant la défaillance prévisible d'un équipement, et d'allonger les cycles de maintenance, grâce à une meilleure appréciation de la probabilité d'occurrence de faits techniques. Ainsi, grâce aux données collectées et aux capacités de calcul (algorithmes), il devient possible de définir les moments les plus appropriés pour faire entrer un équipement donné en maintenance. Cette prévision permet de lisser (au niveau macro) les cycles de maintenance au sein d'une flotte et de coordonner les mêmes cycles. L'enjeu associé est une meilleure gestion des effets de « files d'attente », coûteux en termes opérationnels (indisponibilité des matériels) mais aussi financiers (traiter l'urgence, heures supplémentaires, commandes de pièces détachées dans l'urgence, etc.).

Un MCO orienté par les données revient *in fine* à passer d'une situation, où l'on couvre le risque de défaillance par des plans de maintenance déterminés à l'avance, à une situation dans laquelle industriels et usagers viendraient dimensionner l'activité de MCO au plus près des marges de risque, afin notamment d'éviter une sur-maintenance.

Il y a ensuite deux grandes façons d'envisager le traitement des données :

Premièrement, la maintenance prévisionnelle peut être effectuée grâce à des traitements statistiques s'appuyant sur une comparaison entre les paramètres de fonctionnement de l'équipement et une base de données historique dans laquelle sont stockées, sur l'ensemble des matériels similaires et sur plusieurs années, toutes les données relatives aux paramètres d'un matériel donné (et de ses équipements). On compare ce qui se produit en cours d'utilisation avec les comportements des autres équipements, y compris dans les mêmes conditions (vitesse, lieu, etc.). Il s'agit donc d'une comparaison entre des paramètres réels et des paramètres historiques, réels eux aussi. Cette approche permet de détecter les dérives et les dysfonctionnements des équipements en les comparant les uns aux autres.

Deuxièmement, la maintenance prévisionnelle peut être réalisée en comparant les paramètres réels relevés sur le matériel à ceux de son jumeau numérique, c'est-à-dire la réplique virtuelle d'un système physique. Ce dernier peut être un équipement embarqué (par exemple, moteur d'avion ou de blindé, train d'atterrissage, radar, sonar) ou un système d'armes modélisé dans son ensemble (par exemple frégate, hélicoptère, etc.). Un jumeau numérique (ou double numérique) est un modèle logiciel dynamique d'un objet ou d'un système physique qui repose sur des données de capteurs⁵. Cette représentation fonctionnelle de l'ensemble des équipements constitutifs d'un matériel permet aux ingénieurs d'étudier comment se comporte un matériel en condition d'utilisation en détectant des problèmes éventuels et en testant ou simulant son comportement à partir de scénarios⁶. En implémentant les jumeaux numériques et en créant un modèle virtuel du système, les opérateurs de maintenance peuvent recevoir des alertes, des prévisions ou même des plans complets d'actions de maintenance. Grâce aux capteurs, il est possible de comparer les données recueillies sur le système à celles du jumeau numérique, ce dernier étant « soumis » grâce à la simulation aux mêmes conditions de fonctionnement (températures, durées de vol pour un avion, changements de régime moteur, etc.). Si les deux ensembles de données ne correspondent pas, une opération de maintenance peut être effectuée sur le système physique. Selon le cabinet IDC, les entreprises qui

5. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

6. Pour cela les ingénieurs compilent des milliers de points de données spécifiques à chaque actif au cours de la phase de conception et de production. Ceux-ci sont ensuite utilisés pour construire une réplique numérique de l'actif qui le suit et le surveille en temps réel, en fournissant les informations essentielles tout au long de son cycle de vie. Par exemple, pour un moteur, cela peut être la température du moteur, la pression ou encore le débit d'air. Le jumeau numérique peut aussi être utilisé à d'autres fins que la maintenance à différentes étapes du cycle de vie d'un matériel. Il peut s'agir d'une aide à la conception et au développement d'un produit (simulation de variantes d'un prototype par exemple), à la prise de décision en phase de production, la cyberdéfense d'un matériel (des paramètres s'écartant du fonctionnement nominal d'un matériel peuvent par exemple être la conséquence d'une cyberattaque) ou encore le démantèlement.

investissent dans des jumeaux numériques devraient voir une amélioration de 30 % des temps de cycles de processus critiques, dont les processus de maintenance⁷.

Ces approches mobilisant les technologies de l'IoT vont enregistrer plusieurs types de données :

- 1) Des données de conception du produit décrivant comment celui-ci est conçu chez l'industriel (constructeur, numéro de série, etc.).
- 2) Des données de type carnet matriculaire assurant le suivi de l'équipement sur son cycle de vie (à savoir quand une opération de maintenance a été faite, à quel moment un équipement a été embarqué à bord, avec quelle configuration, etc.). À ces données structurées, peuvent être ajoutées des données non structurées. Par exemple, des analyses sémantiques peuvent être utilisées pour faire remonter des informations qualitatives (comptes rendus de faits techniques, souvent rédigés sous forme de texte libre qui mentionnent des bruits, des odeurs, etc.) potentiellement utiles pour mettre en évidence des accumulations de problèmes ou des corrélations.
- 3) Des données relatives aux paramètres de fonctionnement du matériel que l'on peut capter et enregistrer lorsqu'un matériel est en mission ou en exercice pour les traiter ultérieurement.

L'IoT offre ainsi un important potentiel en termes d'innovation de services, dans une logique de système produit-service - ou « servicisation⁸ » qui a déjà été décrite plus haut. La collecte de données devient un élément fondamental dans le développement de services autour des matériels industriels vendus (plateformes complètes, moteur ou système embarqué). Ces services se développent tout particulièrement sur des

7. A. Bekrar, « Comment la technologie du jumeau numérique "disruptera" l'aviation civile en 2018 » (tribune libre), *Air & Cosmos*, n° 2590, 12 avril 2018, p. 29.

8. A. Rymaszewska, P. Helo et A. Gunasekaranb, « IoT powered servitization of manufacturing - an exploratory case study », *International Journal of Production Economics*, vol. 192, 2017, p. 92-105.

équipements critiques, c'est-à-dire des équipements dont les pannes peuvent engendrer des ruptures d'exploitation des matériels (par exemple les moteurs). Les industriels mettent ainsi en place des stratégies d'exploitation des données et développent de plus en plus des « solutions » (logiciels, prestations) pour traiter ces données en élargissant leur gamme de services.

Cette dynamique s'observe dans l'industrie aéronautique, notamment l'industrie civile. C'est tout particulièrement le cas des motoristes aéronautiques (par exemple Pratt & Whitney, GE, Rolls-Royce ou Safran), qui investissent « en interne » dans la digitalisation, rachètent des entreprises spécialisées dans le traitement de données ou établissent des partenariats pour développer des solutions de MCO moteur personnalisées et fondées sur des données produites par les plateformes. Par exemple, Rolls-Royce et Microsoft ont signé en 2016 un partenariat sur la transmission et l'analyse des données issues des moteurs Trent, soit environ 500 gigaoctets par vol à analyser⁹. Safran a créé un département transverse au sein du groupe sur le thème du big data (Safran Analytics). En 2017, Boeing a investi dans SparkCognition, une start-up d'intelligence artificielle qui développe des algorithmes permettant de prédire à quel moment les turbines et les pompes d'un moteur peuvent casser.

Dans la maintenance aéronautique civile, les logiciels de maintenance prédictive se développent sur la base d'algorithmes élaborés par les *data scientists*¹⁰ des entreprises se positionnant sur les marchés de maintenance. Par exemple, le logiciel Prognos développé par Air France Industries KLM E&M permet de suivre plus de 1 200 moteurs (dont les CFM 56 et G90, PW4000, GEnx, GP7200, Trent XWB et Trent 1000) pour le compte d'une

9. P. A. Goujard, « Aviation militaire : un client pour les mégadonnées ? », *Air & Cosmos*, n° 2546, mai 2017, p. 41.

10. Un *data scientist* possède des compétences en statistiques, traitement de données et programmation informatique. Il met en œuvre un ensemble de techniques d'analyse, dont les algorithmes, pour décrire, expliquer, prédire et prescrire à partir des données collectées (S. Chignard et L. D. Benyayer, *Datanomics. les nouveaux business models des données*, FYP éditions, 2015, p. 26).

trentaine de compagnies aériennes clientes¹¹. Le logiciel a permis de limiter les temps d'immobilisation en réduisant notamment les interventions de maintenance non programmées, qui engendrent régulièrement des retards et des annulations avec des coûts pour les compagnies¹². De façon générale, une étude publiée par le cabinet de consulting Oliver Wyman montre que pour 35 % des compagnies utilisatrices, cela leur permet une réduction du coût de maintenance et pour 63 % une amélioration de la fiabilité de la flotte.

Ces dispositifs ne concernent cependant pas que la maintenance des moteurs. Safran et Michelin ont ainsi développé un « pneu connecté » en insérant dans un pneu des puces RFID¹³, qui transmettent via une application développée sous Android des variables comme la température du pneu, son identité, sa pression, etc. Le dispositif permet aux pilotes ou aux équipes de techniciens de contrôler l'état des pneus à tout moment, voire à distance, et d'économiser du temps et de la main-d'œuvre par rapport à une situation où un technicien utilise un manomètre qu'il doit brancher manuellement sur une valve.

• Exemples d'application

Dans le MCO des matériels militaires, on peut faire remonter l'introduction de ce type de dispositif de collecte des données au crash d'un hélicoptère Chinook le 6 novembre 1986 en mer du Nord¹⁴. Un défaut de maintenance ayant conduit à une panne

11. Y. Cochenec et J-B. Héguay, « Au-delà de la maintenance prédictive », *Air & Cosmos*, n° 2563, 29 septembre 2017, p. 34-38.

12. « Certaines pannes récurrentes figuraient dans le top 5 des causes de retard pour l'Airbus A380 avant la mise en place de la maintenance prédictive. Depuis que Prognos a été mis en œuvre, elles n'y apparaissent plus » (interview de Rodolphe Parisot, directeur des opérations - *Business Unit* moteurs chez Air France Industries (AFI) pour Y. Cochenec et J-B. Héguay, « Au-delà de la maintenance prédictive », *art. cit.*, p. 36).

13. S. Frachet, « Michelin et Safran roulent connectés », *Air & Cosmos*, n° 2555, juillet 2017, p. 29.

14. W. Arnaud, « De la maintenance curative à la maintenance prévisionnelle. Des dispositifs de surveillance intégrés : les HUMS », *CAIA*, n° 109, juin 2016, p. 26-27.

du rotor de l'appareil, le constructeur (Boeing) aurait proposé d'installer un capteur de suivi du rotor pour mettre en place des opérations de maintenance préventive.

Le principe s'est ensuite progressivement généralisé dans le milieu aéronautique à partir du début des années 1990. Aujourd'hui, une de ses versions les plus développées se retrouve dans le système de maintenance du F-35, qu'il nous a paru utile de développer ici. ALIS (*Autonomous Logistics Information Systems*) est l'équipement fondamental du soutien du F-35. Il intègre une large gamme de fonctionnalités comprenant notamment les opérations, la maintenance, l'analyse prédictive, la chaîne d'approvisionnement, les services de soutien à la clientèle, la formation et les données techniques. Un environnement d'information unique et sécurisé – et géré par Lockheed Martin – fournit aux utilisateurs des informations à jour sur l'un de ces domaines en utilisant des applications Web sur un réseau distribué. Lorsque l'appareil est en vol, l'équipement est conçu pour fournir des informations logistiques au sol concernant les séquences de maintenance à effectuer au retour de mission, les différents équipements nécessaires aux interventions de maintenance et les pièces à remplacer si nécessaire.

Même si le degré d'intégration ne va pas aussi loin que dans le cas du F-35, on retrouve des dispositifs similaires sur la plupart des matériels en service (ou en cours de développement) dans les armées françaises : avions modernes (Rafale, A400M, NH90), blindés (VBMR, Griffon), navires (futurs FTI par exemple).

Les flottes « modernes » sont particulièrement concernées par le développement, l'implémentation et le potentiel de ces techniques. Mais il est également possible d'envisager l'usage de ces techniques d'exploitation de données sur des flottes « matures ». Dans ce cas, il s'agit surtout de s'appuyer sur le big data pour simplifier les plans d'entretien, non pas en ajoutant des capteurs mais en utilisant les historiques de maintenance des appareils (par exemple, l'enregistrement de 30 ans d'opérations de maintenance pour le Mirage 2000 représente un volume important d'informations) pour ensuite les corrélérer avec des occurrences de pannes, de faits techniques, d'observations diverses. L'analyse

quantitative doit ici servir à statuer, sur la base de mesures réelles, sur une éventuelle révision des pas de maintenance par rapport aux décisions initiales lors de la mise en service du matériel et, le cas échéant, à apporter des arguments auprès de l'autorité de maintenance.

Dans le domaine terrestre, Arquus [ex-RTD] développe un système de « e-soutien » en HUMS en intégrant aux véhicules des systèmes de détection et de diagnostic dès leur conception¹⁵. Dans le cadre du programme Scorpion, les véhicules produits par Nexter Systems seront dotés de capteurs permettant la maintenance prédictive des matériels.

La DGA a réalisé une étude en deux volets sur l'évaluation de l'utilisation des HUMS pour les matériels terrestres. Une première étude (ETO PROPHÈTE) vise ainsi à estimer le potentiel des HUMS pour les flottes de véhicules terrestres, notamment en termes de MCO. Une expérimentation a été faite sur 4 types de véhicules (VBCI, PVP, AMX10-RC et VAB Top), en cherchant à identifier les organes, composants ou fonctions prioritaires pour une instrumentation, par exemple la qualité de l'huile moteur, le niveau des batteries ou les chocs au niveau de la tourelle. L'étude a démontré que la transmission de données entre un véhicule et un organe centralisé était techniquement réalisable. Si les premiers résultats semblent valider l'intérêt de ces technologies pour optimiser les stocks de pièces de rechange, une meilleure utilisation des ressources (moyens techniques de MCO et personnels), une réduction du coût du soutien¹⁶, il est néanmoins encore trop tôt pour conclure formellement. Aussi, une deuxième étude (VÉRITÉ) est en cours qui vise à estimer financièrement la plus-value des HUMS en testant un modèle économique fondé sur l'exploitation des données. Il s'agit notamment de changer d'échelle avec davantage de véhicules équipés et des volumes plus importants de données à traiter. Notons qu'en 2018, les États-Unis ont lancé une expérimentation similaire de

15. E. Levacher, « Le feu sacré des armes », *Revue Défense Nationale*, n° 803, octobre 2017, p. 78-82.

16. W. Arnaud, « De la maintenance curative à la maintenance prévisionnelle. Des dispositifs de surveillance intégrés : les HUMS », *art. cit.*

maintenance prévisionnelle à partir de données collectées sur plusieurs blindés M2 et M3 Bradley « instrumentés ». Au-delà de la démonstration de la possibilité d'instrumenter des blindés relativement anciens, l'ambition est en outre de traiter directement les données par intelligence artificielle (IA).

Le MCO naval met également en place des projets de maintenance prévisionnelle pour réduire le nombre et la durée des cycles d'entretien programmé, et donc en maîtriser les coûts¹⁷. L'intérêt de ces techniques réside dans le fait que c'est en bonne partie la configuration des théâtres d'opération qui détermine la nature et l'intensité des opérations de MCO. La température de l'eau, sa salinité ou l'état de mer varient beaucoup d'un théâtre à l'autre, ce qui affecte différemment les navires. Notons que la collecte de données en masse est surtout envisagée sur les navires construits depuis les années 2000.

La nouvelle frégate Belh@rra de Naval Group est ainsi le premier navire à héberger de façon native, i.e. dès sa conception, un système d'I-maintenance¹⁸. Ce système donnera à l'équipage une vision centralisée et permanente de l'état de l'ensemble des équipements du navire, information qui peut être envoyée à un centre de traitement des données, situé à terre, qui regroupera les états précis et à jour de tous les navires de la flotte. L'idée est de mettre en place une maintenance prédictive en mutualisant les données et les retours sur expérience de l'ensemble des navires pour accroître la disponibilité et limiter les coûts de maintenance. Des dispositifs similaires visant à faciliter la collecte de données de fonctionnement du navire et leur traitement sont prévus sur les futures frégates de taille intermédiaire (FTI)¹⁹. Sur ces navires de dernière génération, il y aura une omniprésence de systèmes connectés et interactifs, tant pour les opérations que

17. J. Marilossian, *Rapport d'information n° 277 sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. V, *Défense, préparation et emploi des forces : marine*, Assemblée nationale, 2017, p. 29.

18. H. Boy, « La frégate "Belh@rra" pour le programme FTI », *Revue Défense Nationale*, n° 806, janvier 2018, p. 23-25.

19. G. Carnoix et N. du Chéné, « Le programme FTI et le renouvellement de la composante frégates à l'ère numérique », *Revue Défense Nationale*, n° 806, janvier 2018, p. 13-17.

pour la conduite de la plateforme et sa maintenance. Intégrée dès la phase de conception, la maintenance de ces navires connectés devrait permettre à l'équipage de mieux gérer les pannes et d'effectuer facilement les mises à jour²⁰.

- *Un retour sur expérience détaillé : le cas des hélicoptères américains*

Dans ce domaine relativement nouveau où les analyses chiffrées et quantifiées sont rares, le retour sur expérience des Américains concernant la *Condition Based Maintenance* des hélicoptères militaires est instructif²¹. Aux États-Unis, une réflexion sur la mise en place de ce type de dispositifs implémentés dans les hélicoptères a été lancée au début des années 2000, avec une première expérimentation de grande ampleur réalisée à partir de 2005-2006. Face au coût d'entretien croissant des appareils, les Américains ont cherché à passer d'une maintenance préventive planifiée à une maintenance préventive mais sur condition réelle des appareils. La plupart des hélicoptères les plus modernes (UH-60 Black Hawk, AH-64 Apache, CH-47 Chinook) ont été équipés d'instruments d'analyse pour constituer une base de données reflétant l'état réel des flottes, notamment concernant le vieillissement de certaines pièces et l'opérationnalité de certaines fonctions. Un dispositif de maintenance préventive s'est mis en place progressivement et a permis de réduire les coûts, d'accroître la disponibilité et d'augmenter la sécurité des vols.

Le dispositif a également permis de conserver des pièces en service plus longtemps, engendrant ainsi des économies sur les pièces détachées, avec une réduction des commandes de pièces détachées qui varie de 31 à 47 % selon les types d'appareils. Le dispositif a également permis de réduire le nombre des interventions (économie en termes de main-d'œuvre). Par exemple, le volume d'opérations de maintenance planifiée a été réduit de 73 % sur le CH-47 Chinook et les pas de maintenance ont

20. Source : <https://www.meretmarine.com/fr/content/exclusif-belharra-la-nouvelle-fregate-de-4000-tonnes-de-dcns>.

21. E. Merck, « Condition Based Maintenance : l'US Army aviation à la recherche de l'intelligence des coûts », *Revue d'information de l'ALAT*, n° 25, juin 2015, p. 60-62.

été étendus. L'opération de maintenance des 200 heures de vol s'est transformée en visite d'inspection et les opérations initialement prévues à 200 heures ont été reportées à 400 heures. Sur l'Apache, la visite de la boîte de transmission principale (avec dépose) a été repoussée de 1 000 à 1 500 heures de vol. Plus significatif, les extensions de la plage de vol de certaines pièces se sont amplifiées de 250 heures au minimum par pièce et jusqu'à un maximum de 11 500 heures pour certaines pièces.

Un accroissement moyen de 11,8 % de la disponibilité technique opérationnelle pour l'ensemble des parcs équipés a été constaté. La sécurité globale des vols s'est également accrue, grâce à la détection de défaillances imminentes de pièces nécessaires à la sécurité en vol.

Globalement, l'expérience américaine montre que l'adoption du système CBM, la constitution, le suivi et l'exploitation de la base de données ont permis une amélioration de la situation²². Les effets vont au-delà de cette situation statique (i.e. baisse des coûts, amélioration de la disponibilité) puisque le fait de disposer de données sur les parcs permet également de faire de l'optimisation intertemporelle de flottes et d'estimer plus précisément les dates de retrait des flottes anciennes (hélicoptères Kiowa par exemple). L'approche permet aussi d'estimer plus précisément la rentabilité de certains *retrofits* d'appareils (en comparaison par exemple avec l'achat d'un appareil neuf) ou encore de comparer plus précisément différents modes de gestion (par exemple lors de l'examen d'une externalisation envisagée pour une flotte).

En synthèse, avec la généralisation du recours aux HUMS, le MCO des matériels tend vers une logique d'individualisation des opérations de maintenance, ce qui constitue un potentiel d'amélioration notable de la gestion des flottes (RETEX sur l'expérience américaine des hélicoptères et les premiers retours de l'étude PROPHÈTE). Cette tendance offre aussi un potentiel de développement pour les prestataires de services avec la création de nouveaux services globaux (comme la gestion de flotte par exemple).

²². *Ibid.*

Gestion de la documentation et actualisation des configurations des matériels

• Principes

Les technologies issues de l'IoT vont faciliter la gestion de la documentation de maintenance et les mises à jour des configurations des matériels. Aujourd'hui, une tendance forte est à la dématérialisation de la documentation dans le MCO, tant pour les matériels aéronautiques, terrestres que navals. On évolue d'une documentation « papier » (anciens matériels) à une documentation électronique qui peut être accessible sur un ordinateur ou une tablette.

Les technologies numériques contribuent à « rendre vivante » cette documentation. En effet, les matériels les plus modernes (A400M, NH90, Tigre, Rafale, FREMM, bientôt Griffon) ont un cycle de mise à jour de leur documentation – y compris la documentation électronique – qui ne correspond pas toujours au même rythme que celui de l'évolution des matériels. Par exemple, pour l'hélicoptère NH90, les versions les plus récentes de l'appareil peuvent incorporer des éléments qui ne sont pas exactement dans la même configuration que celle stipulée dans la documentation initiale, laquelle demeure le document de référence pour le suivi des matériels sur le terrain par les opérateurs de maintenance. Dans le cas des matériels aéronautiques, un tel décalage peut poser des problèmes en termes de navigabilité, dont l'acceptation implique une stricte conformité entre ce qui est indiqué dans la documentation technique et les équipements réellement installés sur l'appareil.

Une amélioration de la mise à jour de la documentation utilisée sur le terrain par les opérateurs nécessiterait ainsi des données dématérialisées (ce qui serait rendu possible par les informations RFID transmises par les équipements), un échange de données fluidifié et sécurisé, et surtout une connexion accrue entre le bureau d'études (conception) et le service de maintenance. Ce type de dispositif est également envisagé dans le domaine naval : depuis le début de l'année 2018, avec son projet d'I-maintenance, Naval Group est en mesure de déployer

des puces spécifiques sur les pièces d'un navire, comportant un lien automatique vers la documentation technique pertinente.

- *Exemples*

À l'appui de la démarche de suivi de la documentation et des configurations décrite ci-dessus, nous présentons à titre d'exemples deux dispositifs développés par la SIMMT et en service dans l'armée de terre, qui sont intéressants.

Le dispositif DEDAL²³ vise à déporter la fonctionnalité de saisie des informations liées aux opérations de maintenance en traversées d'atelier. Le dispositif est constitué de bornes polyvalentes qui permettent à un opérateur de maintenance d'avoir accès au plus près des équipements à toutes les informations nécessaires pour la maintenance (par exemple l'état des travaux en cours, les dernières opérations effectuées, le potentiel kilométrique de certains éléments, le nombre de tirs effectués par le système d'armes, etc.). Cet accès s'effectue via le système d'information du MCO terre, SIM@T, et grâce à l'identifiant unique de chaque véhicule contenu dans sa puce RFID. DEDAL est déployé à titre expérimental depuis octobre 2017, pour une durée d'un an, dans deux régiments du matériel : le 8^e RMAI (Versailles) et le 6^e RMAI (Gresswiller)²⁴.

Cet accès à l'information numérisée permet d'éviter des pertes de temps liées au transport des documentations papier d'un bureau à l'atelier. D'autre part, les opérations sur borne permettent de comptabiliser automatiquement le temps de travail effectif consacré à chaque opération et offrent un gain de temps considérable, évitant aux maintenanciers de se diriger systématiquement vers le chef d'atelier, seul à disposer d'un ordinateur pour la saisie de l'ensemble des données.

ICAR²⁵ est un dispositif qui permet une identification automatique du matériel et une remontée d'informations sans saisie (puce RFID) via un appareil de type smartphone ou tablette. Ainsi, plutôt que de faire de la saisie de données concernant un

matériel entrant en atelier (dans un bureau déporté par exemple), le dispositif permet, grâce à son application NOMAD développée en partenariat avec Sopra Steria, d'apporter le système d'information au plus près du matériel. Le dispositif est déployé depuis juillet 2017 dans neuf régiments (dont le 501^e régiment de chars de combat) et une base aérienne²⁶.

Ainsi, l'information est automatiquement enregistrée, sans perte de temps de saisie et surtout elle est beaucoup plus fiable qu'avec des saisies manuelles. En effet, les erreurs de saisie manuelle, et parfois de ressaisie informatique, sont fréquentes. En outre, la saisie manuelle prend du temps (coûts supplémentaires) et détourne des personnels qualifiés de tâches plus productives (coût d'opportunité) – ce sont souvent des mécaniciens très qualifiés qui effectuent ces tâches de saisie. Le dispositif est expérimenté par étapes : certaines fonctions liées au recueil de données ont déjà été testées, comme le chargement sur tablette de la volumineuse documentation technique propre à chaque matériel (auparavant consultable uniquement sur poste fixe) ou encore l'identification du matériel avec géolocalisation.

L'intérêt de l'outil va au-delà de la simplification de la gestion de la documentation. En effet, à terme, l'ambition de l'armée de terre est de développer les capacités de stockage de données, de traiter ces dernières à l'aide de techniques du *big data analytics* dans l'objectif de mettre en place une maintenance prévisionnelle. Il est notamment prévu que les informations sur l'état des matériels pourront être partagées avec les industriels pour la partie traitement, afin de déterminer quels actes de maintenance – industrielle ou étatique – doivent être effectués.

Logistique et gestion des pièces détachées

La logistique vise à planifier, faire circuler et contrôler les flux de biens, de leur point de production à leur point de consommation. L'optimisation de la chaîne logistique nécessite de pouvoir

23. Déploiement d'écrans digitaux pour les activités de maintenance en ligne.

24. Source : <https://www.ttu.fr/armee-de-terre-vers-la-maintenance-2-0/>.

25. Interface de connexion automatique pour le recueil de données technico-logistiques des matériels terrestres.

26. <https://www.ttu.fr/armee-de-terre-vers-la-maintenance-2-0/>.

prévoir, stocker, identifier, tracer, déplacer et distribuer les biens selon l'évolution de la demande.

L'IoT présente de nombreux atouts pour améliorer le fonctionnement de la chaîne logistique du MCO et plus particulièrement la gestion logistique des biens (GLB). Cette dernière impose de faire des inventaires au sein des structures de soutien (SIMMAD, SIMMT et SSF). En effet, chaque année le ministère perd ou casse des matériels ou des équipements. La traçabilité et la localisation des équipements deviennent ainsi un enjeu de performance. En particulier, le développement de la technologie RFID devrait engendrer des économies sur les inventaires, avec moins de personnels nécessaires et surtout une gestion et une valorisation des stocks quasi instantanées.

Cet enjeu est important car les autorités en charge du MCO doivent exécuter des inventaires précis et estimer la valeur des actifs pour des volumes importants (des milliers de matériels, des millions d'équipements et de pièces détachées). Notamment, le ministère des Finances et la Cour des comptes ont reproché à la SIMMAD de ne pas pouvoir mesurer précisément (et de façon suffisamment régulière) la valeur de son patrimoine (1 200 appareils qui sont dans les armées et font partie du patrimoine de l'État, 450 000 références et 75 millions d'articles). Le ministère des Finances souhaiterait ainsi disposer d'un inventaire tous les ans alors que la SIMMAD ne peut, compte tenu des contraintes logistiques, mais aussi de coûts, en faire qu'un tous les trois ans. Le même type de problématique se retrouve à la SIMMT qui gère plus de 4 millions d'équipements dont environ 172 000 ont une valeur unitaire supérieure à 10 000 euros.

Les systèmes d'information actuellement en service ne permettent pas de disposer d'une valeur fiable du patrimoine. D'une part, compte tenu de l'intensité des OPEX (donc de la demande en MCO), les stocks varient rapidement et avec une ampleur parfois importante. D'autre part, sous la pression opérationnelle, des données insérées dans les SI peuvent être de mauvaise qualité. Il est difficile dans ces conditions d'évaluer la qualité des pièces sur le plan technique (pièce en bon état ou pas) et réglementaire (respect des conditions de navigabilité).

Avec la technologie RFID, il devient possible d'« interroger » les équipements à distance et de disposer d'un certain nombre d'informations normées qui permettent d'accélérer les inventaires. Concernant les inventaires dans le domaine aéronautique, les gains estimés sont de l'ordre de 300 % avec une augmentation de la fiabilité de la donnée²⁷, et la possibilité de refaire facilement l'inventaire si ce dernier n'est pas satisfaisant.

Une approche transverse a été adoptée entre les différents services de MCO. Un mode de codage normé a été fixé entre les divers services de soutien, de sorte que, même si la SIMMT utilisait un lecteur différent de celui de la SIMMAD, les informations contenues dans les puces peuvent être lues indifféremment par chacun des acteurs. La définition des normes de codage a d'ailleurs été l'un des premiers travaux réalisés au sein du ministère, afin d'éviter des multiplications de normes entre milieux et entre armées. Cette codification présentant aussi un intérêt pour les industriels, un partenariat a été lancé avec Thales pour que ce dernier « puce » les équipements aux normes du MCO.

La généralisation de cette technologie devrait procurer d'autres avantages comme la traçabilité totale des flux, avec des estimations des délais d'acheminement ou de réparation, un historique des conditions de transport et de stockage (particulièrement importante pour certaines pièces détachées), une dématérialisation des documents administratifs, des économies sur la saisie des références. Enfin, cet allègement de la dimension administrative/logistique permettrait aux opérateurs qualifiés (mécaniciens, techniciens) de se focaliser sur des tâches productives pour lesquelles la valeur ajoutée est plus grande que de la saisie de données (par exemple, diagnostic, réparation, etc.).

Le développement des technologies de l'IoT contribuerait ainsi à mieux répondre aux attentes de la Cour des comptes et du ministère des Finances sur la traçabilité et la comptabilité des pièces, mais aussi à celles des états-majors qui demandent un meilleur suivi de la performance des structures de soutien, les gains de performance dans la logistique devant plus globalement améliorer celle de la chaîne de soutien, grâce notamment

27. En effet, les erreurs sont courantes lors des saisies manuelles.

au raccourcissement des délais d'acheminement des pièces et de réalisation de leur inventaire.

Traçabilité et suivi des outillages connectés

Une autre fonctionnalité permise par l'IoT est la traçabilité des outillages. Cette application se développe rapidement dans l'industrie, par exemple chez Airbus Helicopters qui a mis en place dans les ateliers de production un étiquetage de l'outillage avec des puces RFID. Ces puces, qui équipent notamment les outillages en libre service, permettent de connaître précisément leur parcours, leur utilisation et surtout de vérifier très rapidement ceux qui ne figurent pas dans l'inventaire ou ne sont pas rangés à la bonne place.

L'offre en matière d'outils connectés se développe progressivement, notamment grâce à des PME qui proposent de nouveaux produits et services. Récemment, Nexess, une société créée en 2007 à Sophia Antipolis dans les Alpes-Maritimes, a créé une armoire à « outils intelligents », dont la traçabilité est assurée par technologie RFID²⁸. D'un point de vue pratique, un badge permet à l'utilisateur d'ouvrir l'armoire pour emprunter ou remettre un outil. Les portes se verrouillent ensuite et un inventaire automatique du contenu est réalisé. Ceci permet de savoir instantanément quel opérateur a pris un outil, à quel moment et où se trouve précisément l'outil en question. Ce genre de dispositif a été mis en place chez Safran. Un autre exemple concerne la start-up Uwinloc, hébergée au Biz-Lab d'Airbus, dont le système d'étiquettes connectées de très petites tailles équipe un hangar logistique d'Airbus à Hambourg²⁹. À l'atelier industriel aéronautique de Bordeaux, la mise en place d'armoires intelligentes est à l'étude, soit par détection via des puces RFID, soit par reconnaissance optique³⁰.

28. D. Gallois, « Le futur de l'industrie passe par les innovations militaires », *Le Monde Économie*, 24 novembre 2016.

29. L. Baritou d'Armagnac, « Fournisseurs de solutions. Des solutions "made in Haute-Garonne" », *Air & Cosmos*, n° 2524, 25 novembre 2016, p. 36.

30. Source : *Avenue A*, le magazine de l'Atelier industriel de l'aéronautique de Bordeaux, n° 69, novembre 2017, p. 8.

La traçabilité des outillages présente plusieurs avantages. Premièrement, en associant un outil à une opération de maintenance – ou un ensemble restreint d'opérations – elle permet la traçabilité des opérations de maintenance et de disposer d'un historique précis des opérations. Outre le gain de temps dans le suivi de la maintenance (tout le dispositif est automatisé et informatisé), elle est indispensable pour respecter les normes de navigabilité (dans l'aéronautique plus particulièrement) et plus généralement pour faciliter le contrôle qualité.

Deuxièmement, dans les ateliers de production ou de maintenance, les technologies de géolocalisation permettent de savoir très précisément où sont localisés les outils, ce qui constitue une forme d'assistance et permet à l'opérateur de maintenance de gagner du temps. Cette capacité permet aussi d'économiser le rachat d'un outil en cas de perte et de faciliter l'inventaire des outillages, étant donné qu'il est possible de comptabiliser des outils de façon automatique et de manière quasi instantanée.

Troisièmement, les outils connectés permettent d'éviter d'égarer des outils dans un appareil lors des opérations de maintenance (*Foreign Object Damage* – FOD), ce qui limite fortement le risque d'accident, donc de compromettre la mission (interruption du service), et qui évite de revenir sur l'appareil ultérieurement³¹ (immobilisation de ce dernier) ou d'acheter un nouvel outil (économie). Dans l'aéronautique tout particulièrement, la problématique de corps étrangers dans les matériels révisés est un sujet sensible qui a récemment été mis en avant dans les questions de sécurité des vols³². Les conséquences sont aussi économiques et financières, les coûts directs et indirects des dommages causés par les FOD pour l'industrie aérospatiale (européenne et américaine) sont estimés à environ 10 milliards d'euros par an³³.

31. Bien entendu dans le cas où le FOD n'entraîne pas la destruction du matériel lors d'un accident.

32. Source : *Avenue A*, op. cit., p. 8.

33. Source : <http://www.air-cosmos.com/stanley-cribmaster-propose-au-secteur-aerospatial-une-nouvelle-generation-de-gestionnaire-d-outils-109335>.

À terme, les technologies de l'IoT et notamment l'étiquetage avec des puces RFID devraient assurer une traçabilité exhaustive de l'utilisation des outils, ainsi que de répondre aux exigences de lutte anti-FOD et de faciliter les inventaires avec historicisation des usages (et des conditions d'usage).

2. LIMITES ET FREINS DE L'IOT DANS LE MCO DES MATÉRIELS DE DÉFENSE

L'implémentation des technologies de l'IoT dans le MCO ne va pas forcément de soi. Elle rencontre en effet un certain nombre de freins ou de limites qui sont analysées dans ce chapitre. Notamment, alors que la valeur ajoutée de l'IoT dans le MCO réside en grande partie dans les données, leur collecte, leur structuration et leur exploitation sont des enjeux très importants pour les acteurs publics comme pour les industriels du secteur.

Transmission et stockage des données

Les matériels connectés produisent énormément de données, et ce de façon croissante en fonction des générations d'équipements. Un Rafale génère 4 kilobits de données par vol contre environ 200 gigabits pour un A400-M. Une telle quantité de données, multipliée par le nombre d'appareils en service et par le nombre de vols, pose des difficultés pour la mise en place des technologies liées à l'IoT, à la fois à court et à long terme.

À court terme, le principal problème technique est celui de la transmission des données. En effet, les données transmises pour la maintenance par les matériels en service, notamment lorsque ces derniers sont utilisés en opération, vont être « en concurrence » avec celles concernant la conduite des opérations. De fait, la disponibilité de bande passante pour la transmission de données via des canaux sécurisés est limitée. Face à la croissance du volume des données, la prévention de la saturation des réseaux nécessite l'adoption de bonnes pratiques pour la transmission. Ainsi, pour un système comme un porte-avions, les données concernant la maintenance des appareils sont transmises plutôt

la nuit, c'est-à-dire lors de périodes « plus calmes » du point de vue du rythme des opérations. Cette logique de partage des canaux de transmission entre besoin opérationnel et besoin de soutien limite fortement le potentiel de maintenance en temps réel des matériels.

Il convient notamment de s'assurer que la capacité globale de transmission des données (i.e. de l'infrastructure de transfert des données) soit dimensionnée pour suivre à la fois la croissance du volume de données transmises par équipement et celle des flottes équipées de technologies IoT (i.e. au global la croissance du volume total de données). Cette dimension doit naturellement être prise en compte dans la politique d'acquisition de matériels, en anticipant l'accroissement nécessaire des capacités de traitement et de transmission de données par les équipements futurs, dans l'objectif d'assurer un potentiel optimal de l'usage des objets connectés.

À plus long terme, la question du stockage apparaît primordiale. En effet, les données générées doivent pouvoir être stockées afin d'être éventuellement utilisées ultérieurement dans une perspective d'exploitation grâce aux technologies du big data, sous forme de données variées, en quantité importante et avec un historique sur le temps long. Ceci implique de mettre en place une infrastructure de stockage idoine et de définir parallèlement une politique de gestion du stockage des données. Cette problématique dépasse néanmoins largement le cadre du secteur de la défense, elle concerne toutes les industries utilisant ces technologies numériques et met en exergue la nécessité d'une stratégie d'optimisation de la collecte, du stockage et du traitement des données. En 2015, l'association américaine des industriels du semi-conducteur anticipait ainsi qu'en 2040, les besoins en espace de stockage au niveau mondial (lesquels sont naturellement corrélés au développement du numérique, de l'IoT, du big data et de l'intelligence artificielle) excéderaient la production disponible globale de silicium³⁴.

34. C. Villani, *Donner un sens à l'intelligence artificielle : pour une stratégie nationale et européenne*, rapport sur l'intelligence artificielle, La Documentation française, 2018, p. 123.

Sécurisation des données

L'augmentation du nombre de matériels connectés et la systématisation de la collecte, du stockage, de l'analyse et de l'exploitation de données numériques, ainsi que leur échange et transfert sur des réseaux de communication, exposent les utilisateurs à un large spectre de risques, que ceux-ci soient la conséquence d'actes intentionnels ou de vulnérabilités accidentelles. La multiplication des flux et des stocks de données pose la question centrale de la sécurisation des données.

D'abord, pour des raisons économiques, les données collectées sont souvent centralisées. De telles infrastructures de collecte peuvent être qualifiées d'infrastructures critiques, du fait que la concentration sur un site unique accroît la vulnérabilité globale du système de MCO. Pour des raisons tant stratégiques et pragmatiques, il pourrait être pertinent d'envisager une décentralisation du stockage de données.

Par ailleurs, les données produites par un matériel militaire comportent des informations sensibles voire stratégiques (par exemple les données issues des avions concourant à la dissuasion nucléaire). Leur sécurisation est une condition *sine qua non* pour garantir la disponibilité, la confidentialité, l'intégrité, la fiabilité et la traçabilité des données exploitées, ainsi que la sécurité des informations communiquées. Le cryptage des données collectées peut être envisagé, mais il entraîne des contraintes qui doivent être prises en compte en amont de la conception des matériels.

Les matériels connectés (prise USB embarquée, port OBD de diagnostic, identifiant RFID, etc.) sont également sources de failles potentielles, lesquelles peuvent divulguer des informations sensibles sur un matériel ou son utilisateur. Dans un cas extrême, l'exploitation de ces failles peut conduire à la manipulation voire à la prise de contrôle à distance d'un matériel. La sécurisation des capteurs collectant les données est ainsi un enjeu très important.

Traitement et interprétation des données

La multiplication des capteurs embarqués et la production de données engendrent une complexité technique supplémentaire

sur les plateformes qui a des répercussions sur la maintenance, en particulier dans les premières années d'exploitation. Ainsi, dans la maintenance des avions les plus modernes (qui peuvent être considérés comme des « serveurs volants »), les logiciels de détection de pannes occupent une place importante et une exploitation optimale de leur capacité est parfois longue à obtenir. En effet, les capteurs provoquent régulièrement de « fausses pannes » (qui sont déclarées comme pannes par le logiciel), dont la vérification – souvent manuelle – entraîne des coûts additionnels, de même que les mises à jour des logiciels.

En 2016, 60 % de la flotte américaine actuelle de F-35 a été clouée au sol pour des problèmes persistants de logiciel³⁵. En raison du nombre de « fausses pannes », le F-35 a été qualifié de « non mature » à ses débuts par certains utilisateurs³⁶. Malgré les récentes mises à jour des systèmes d'autodiagnostic, le problème des « fausses pannes » semble toujours être une préoccupation majeure en 2018³⁷. Le cas du F-35 est encore une fois particulièrement emblématique mais des cas de « fausses pannes » similaires ont également été observés sur des matériels français (Rafale et Tigre dans leurs premières années de service notamment).

Ensuite, le développement des technologies de maintenance prédictive présente le risque de la surabondance d'informations, un grand volume de données étant produit alors que seule une faible partie est exploitée, comme le montre le tableau 4.

En complément de l'exemple précédent, Airbus a réussi à connecter 2 500 équipements sur l'A350. Or, seuls une quarantaine d'équipements sont réellement suivis en MCO prévisionnel, l'objectif à terme étant de suivre environ 80 équipements³⁸. De

35. O. Zajec, « Hyperconnectivité et souveraineté : les nouveaux paradoxes opérationnels de la puissance aérienne », *Défense et sécurité internationale*, 55 (HS), août-septembre 2017.

36. Anthony Angrand, « Offensive de charme pour le F35 », *Air & Cosmos*, n° 2552, 15 juin 2017, p. 100.

37. https://www.military.com/daily-news/2018/03/02/only-half-f-35s-available-flight-program-head-says.html/amp?twitter_impression=true.

38. Auteurs, d'après des informations recueillies auprès de la DMAé [ex-SIMMAD].

fait, la tendance actuelle (et ce de l'aveu de la plupart des acteurs du MCO rencontrés) est plutôt à (sur)équiper des matériels en capteurs et à accumuler des données, sans toujours savoir quoi en faire, ni même en avoir défini préalablement le besoin exact.

Tableau 4
Quatre niveaux de données (cas de l'A400M)

Niveaux	Nature de la donnée	Illustration (A400M - par vol)
Niveau 1 : flux générés (capteurs)	Ce qu'il est possible d'avoir	200 gigabits
Niveau 2 : flux enregistrés	Ce que l'on peut exploiter	45 gigabits
Niveau 3 : flux exploités	Ce que l'on peut exploiter de façon intelligente car les données sont de bonne qualité	10 gigabits
Niveau 4 : flux utiles pour la maintenance	Ce qui est réellement exploitable pour la maintenance	0,1 gigabits

Source : auteurs, d'après informations recueillies auprès de la DMAé [ex-SIMMAD]

Au-delà de la seule collecte des données, un travail d'identification et de mise en forme des données potentiellement utiles est indispensable pour pouvoir réellement les valoriser dans la maintenance.

Il faut d'abord disposer d'une puissance de calcul suffisante pour traiter les données. Ce constat dépasse largement le seul cadre de la maintenance pour rejoindre par exemple les problématiques liées aux simulations numériques, qu'elles soient militaires ou civiles. Dans ce domaine, les dirigeants du GENCI³⁹ observent la difficulté, en France, à répondre aux besoins scientifiques et industriels actuels (et encore plus à ceux à venir), avec potentiellement un risque de décrochage technologique⁴⁰. Les experts relèvent notamment que l'essor du big data et de

39. GENCI : Grand équipement national de calcul intensif.

40. O. Becht et T. Gassiloud, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, op. cit.

l'intelligence artificielle ne devrait qu'accroître la demande en termes de capacités de calculs, face à une offre limitée.

Ensuite, la solution technique ne constitue pas en soi un moyen suffisant pour déterminer et exploiter les données utiles. Ceci nécessite également des personnels capables de faire « le tri » dans les données, tout en étant appuyés par la technique. Dans les années à venir, un des enjeux relatifs à l'interprétation des données sera de disposer de suffisamment de personnels formés aux diagnostics de pannes, dont l'origine est essentiellement d'ordre informatique, mais surtout aux techniques d'analyse de données. L'ergonomie des interfaces va progressivement se simplifier et permettre aux utilisateurs (techniciens, maintenanciers, logisticiens, mécaniciens) de s'affranchir de certaines exigences techniques, notamment en ce qui concerne l'informatique (codage par exemple). De nouveaux métiers se développent et vont devenir fondamentaux pour savoir traiter les données produites par les matériels dans les années à venir.

De nouvelles compétences deviennent ainsi indispensables, comme celles des *data scientists*, mais également des *data engineers* (chargés de mettre en place des plateformes spéciales destinées à stocker un très grand volume de données, afin de pouvoir par la suite les traiter par lots, en temps réel), des cognitivistes (pour penser l'ergonomie des bases de données et de leur exploitation), des *data stewards* (coordinateurs de données et administrateurs des *data lake*, ils sont à l'interface entre le métier – mécanicien, électronicien –, et les *data scientists*), des chefs de projet IoT ou encore des ingénieurs cybersécurité.

Ces nouvelles compétences nécessitent une adaptation en amont des cursus de formation, un des enjeux majeurs est en effet de former des profils techniques pointus mais aussi capables de résoudre des problèmes complexes et transverses⁴¹. Au-delà des connaissances techniques liées aux outils numériques, certaines compétences transversales et de savoir-être (*soft skills*) seront cruciales. Elles relèveront à la fois du savoir-être (créativité, autonomie dans la conduite de projets, compétences relationnelles,

41. Magnus Kuchler et Svan Thurban Cederlöf, *Digitalization in industrial products Harnessing the power of digital*, Ernst & Young, 2016.

etc.) et de savoir-faire transversaux (management, leadership, maîtrise des langues étrangères, etc.)⁴².

Pour disposer de ces spécialités, le domaine de la défense va se retrouver en concurrence avec les autres secteurs civils. Ainsi, dans le domaine aéronautique, les métiers liés à l'exploitation et à l'analyse des données sont concurrencés par les secteurs de la banque, de la finance et de l'assurance. Par exemple, lorsque Safran a créé Safran Analytics en 2015, il a été confronté à la concurrence avec le secteur bancaire pour le recrutement de *data scientists*⁴³. À nouveau, le problème dépasse largement le cadre du MCO des matériels de défense puisqu'en 2018, il devrait manquer 190 000 *data scientists* aux États-Unis⁴⁴.

Enfin, par-delà les « métiers de la donnée », il convient de souligner que cette concurrence avec le secteur privé existe plus largement pour certains métiers rares ou très qualifiés (mécaniciens spécialisés, linguistes...)⁴⁵, ce qui pose la question de l'attractivité des carrières du secteur public si celui-ci souhaite développer, renforcer voire simplement maintenir ces compétences.

La question de la maîtrise des données : qui possède quoi ?

Un des enjeux majeurs dans le MCO est la « maîtrise de la donnée ». Pour maximiser le potentiel utile des données et pouvoir les exploiter, il est nécessaire de rassembler les données dans un ensemble unique et cohérent que l'on appelle couramment le *data lake* (lac de données). L'enjeu d'une exploitation « intelligente » des techniques de traitement repose donc sur une mise en cohérence de la collecte, du stockage et de l'organisation des données.

42. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit., p. 51.

43. F. Payen, « Ingénieurs et chercheurs. Comment les industriels recrutent-ils ? », *Air & Cosmos*, n° 2583, février 2018, p. 1422.

44. A. Dyèvre, M. de Maupeou et F. Richard-Tixier, « Enjeux stratégiques du Big Data pour la Défense. Possibilités offertes aux armées et enjeux de l'exploitation des données », *Notes stratégiques*, CEIS, juin 2017, p. 32.

45. J. Puyeu et F. André, *Rapport d'information n° 718 en conclusion des travaux d'une mission d'information sur l'exécution de la loi de programmation militaire 2014-2019*, op. cit.

La question sous-jacente à cette mise en cohérence est celle de la propriété des données, qui touche à des enjeux d'ordre industriel et stratégique. L'ensemble des acteurs – usager/client, plate-formiste/systémier et équipementier – sont conscients de la valeur de la donnée et peuvent chercher à s'approprier tout ou partie de cette dernière.

Du côté de l'utilisateur (les armées en l'occurrence), si certaines données peuvent être partageables, un certain nombre d'informations sont sensibles, voire confidentielles (par exemple les données qui permettent de retracer précisément la localisation d'un matériel).

Un préalable est de cartographier l'ensemble des systèmes embarqués à bord d'un matériel afin de connaître précisément la nature des données qui sont transmises, tâche qui n'est pas forcément facile dans la mesure où de nombreux équipements à bord de matériels s'apparentent à des boîtes noires sur lesquelles les industriels interviennent en cas de besoin.

Ensuite, lorsque la décision de transmettre des données bien identifiées est prise, la mise en place des protocoles de nettoyage/assainissement de ces données est nécessaire de manière à rendre ces dernières « neutres » en termes de date et de lieu. Il s'agit, par exemple, de faire en sorte que des informations géographiques potentiellement utiles à l'industriel pour la maintenance ou la conception de futurs matériels (température, humidité, etc.) soient transmises sans révéler pour autant la localisation exacte des matériels⁴⁶. Dans le cas du F-35 américain, les *Mission Data Files* apportent au constructeur Lockheed Martin des données permettant certes d'optimiser l'appareil et son utilisation, mais aussi un nombre considérable d'informations sensibles concernant la sécurité nationale du pays utilisateur, lequel ne souhaite pas forcément les partager avec les États-Unis. La Norvège – qui

46. Cela est par exemple possible en transformant des informations quantitatives en observations qualitatives (froid/chaud, désert/pas désert, jour/nuit). L'exercice est toutefois difficile car bon nombre de données collectées sur un matériel n'ont d'intérêt du point de vue de l'exploitation que lorsqu'elles sont corrélées avec la position de ce dernier. Par exemple, les données d'un monitoring de coque sur un navire ont le plus de potentiel lorsqu'elles sont corrélées avec des données météo et la géolocalisation du navire.

a commandé 40 appareils « ferme » et 12 en option – a ainsi des interrogations sur l'exploitation des données transmises par ses équipements à l'industriel, ce qui illustre le double enjeu de la sécurisation et du filtrage du flux de données produites par un appareil en mission.

Du côté des industriels, on observe ces dernières années un effacement progressif de la frontière entre les produits et les services⁴⁷, parmi lesquels on retrouve essentiellement la maintenance, mais aussi le conseil en ingénierie et la formation, les modèles d'affaires industriels évoluant plus généralement vers une logique de services. Dans cette perspective, les données constituent un support de service qu'il est possible de valoriser auprès du client. La plate-forme et les services fondés sur l'exploitation des données sont dissociables par les constructeurs. Sur la plupart des matériels de défense, les droits d'accès aux données produites par la plate-forme sont contrôlés par le constructeur⁴⁸, par exemple aux États-Unis les données sont généralement contrôlées par les constructeurs de plateformes (Boeing ou Lockheed Martin par exemple) ou les motoristes (Pratt & Whitney, General Electric, Safran) qui sont parmi les entreprises les plus avancées en termes d'exploitation et de valorisation des données. Dans le cas du F-35, la plupart des pays clients s'interrogent d'ailleurs sur le *business model* de Lockheed Martin, l'écosystème opérationnel et industriel du F-35 fonctionnant sur

47. Cette tendance a été identifiée relativement tôt dans l'industrie aéronautique civile et plus particulièrement dans les moteurs, éléments critiques des appareils, relativement coûteux et relativement bien implémentés en capteurs et technologies numériques. Par exemple, chez le motoriste Rolls-Royce, on peut faire remonter cette prise en compte de l'effacement de la frontière produit/services au milieu des années 1990 avec le programme *TotalCare* (A. Angrand, « Turboréacteurs. Rolls-Royce développe le moteur intelligent », *Air & Cosmos*, n° 2591, 20 avril 2018, p. 30). Depuis, l'intégration produit/services n'a fait que s'accroître avec les avancées dans le numérique et le développement des techniques d'analyses de données.

48. Généralement l'intégrateur final (ex. Naval Group pour une frégate), mais la question est plus complexe dans la mesure où certains systèmes embarqués (ex. un sonar) peuvent fonctionner comme des boîtes noires du point de vue de l'intégrateur final et donc les données générées par ce système peuvent être contrôlées par l'équipementier (ex. Thales).

un modèle analogue à celui des GAFA⁴⁹, avec la mise en place d'un environnement global captif qui tend à empêcher les clients – pour des raisons techniques ou juridiques – de s'émanciper du contrôle du constructeur. La question devient particulièrement problématique lorsqu'il s'agit de matériels indispensables à l'exercice de la souveraineté nationale.

Cet écosystème captif pose également la question de la possibilité de changer de prestataire dans les marchés de MCO, l'industriel assurant le soutien d'un matériel n'étant pas toujours celui qui l'a fabriqué. Par ailleurs, un prestataire peut très bien changer d'un marché à l'autre, ce qui soulève le problème de la « transférabilité » des données du constructeur initial au prestataire du soutien, voire d'un prestataire à l'autre. Un centre de stockage étatique centralisant les données et les mettant à la disposition des industriels, comme des usagers, constitue un exemple de solution permettant de se prémunir contre ce risque.

Ensuite, s'il est admis que les données doivent être partagées, la question de l'échange de données entre utilisateurs et industriels, donc de leur structuration, se pose. Sur ce volet, les systèmes d'information logistiques (SIL) constituent « l'épine dorsale » du MCO au sens où ils vont permettre de structurer un MCO qui reposera largement sur la collecte et l'exploitation des données. Un préalable à l'exploitation des données produites par des matériels consiste à définir des SIL rationalisés et communs entre industriels et acteurs étatiques.

Il s'agit premièrement de définir un SIL unique par milieu (rationalisation), notamment pour le MCO aéronautique qui doit gérer des données issues des SIL des trois armées. Le problème ne se pose pas en ces termes pour le MCO terrestre et le MCO naval.

Deuxièmement, il s'agit de faire en sorte que les industriels soient capables d'échanger des données avec les armées et la DGA (normalisation). Un des risques identifiés par les acteurs est que chaque industriel vende son propre système, avec un niveau d'intégration des données spécifique, qui est rarement celui utilisé par les structures de soutien comme la SIMMT, la

49. Le terme GAFA est un acronyme formé par la première lettre du nom des quatre entreprises américaines Google, Apple, Facebook et Amazon.

SIMMAD, le SSF ou encore les forces armées. Pour que les structures de soutien parlent le « même langage » que les industriels, les contrats de MCO doivent prévoir en amont la structuration des données entre l'industriel et les structures de soutien, donc la structuration des SIL associés qui doivent pouvoir échanger (idéalement) des données : automatiquement (de façon quasi synchrone), selon les mêmes standards et avec la même structuration/définition des données.

À titre d'illustration, la SIMMAD (actuelle DMAÉ) a décidé de s'appuyer sur une norme civile d'échange de données de l'aéronautique, la PLCS (*Product Life Cycle Support*)⁵⁰, qui propose un outil d'échange de données normalisé où les acteurs s'accordent sur l'objet : la DEX⁵¹. Il y a une DEX pour un équipement et lorsqu'un équipement est transféré d'un SIL à un autre, les données contenues dans la DEX l'accompagnent. Cela permet d'adopter une interface d'échange unique pour tous les industriels, au lieu d'une interface d'échange par industriel. L'évaluation d'un tel dispositif est en cours par les acteurs du soutien (aéronautique notamment), mais cela serait avantageux a priori sur le plan économique (norme civile moins coûteuse et utilisée partout dans le milieu aéronautique), avec de plus une compatibilité avec les standards OTAN (norme STANAG).

La double logique de rationalisation (système unique par milieu) et de normalisation (simplification et standardisation des procédures) est d'ailleurs bien prise en compte par le MINARM, on la retrouve dans la politique générale du MCO, qui précise que :

« Un SIL unique sera mis à disposition du réseau des acteurs de chaque MCO de milieu pour assurer notamment la gestion logistique de l'ensemble des biens confiés à la maîtrise d'ouvrage déléguée. Les interfaces avec les systèmes de l'industrie ou des

50. La norme PLCS est issue de la norme ISO STEP (ISO 10303-239) qui a pour but de faciliter et standardiser la communication entre les systèmes d'information.

51. Une DEX peut être vue comme une sorte de « capsule » contenant un certain nombre d'informations ordonnées et normées (par exemple donnée 1 code fabricant, donnée 2 le *part number*, etc.).

maîtres d'œuvre industriels étatiques doivent être développés et la cohérence avec la fonction "acheminement et soutien aux opérations" garantie. En matière de traçabilité logistique, la dématérialisation des informations systématiquement recherchée et sécurisée. La qualité des données du MCO fait également l'objet d'une attention particulière⁵². »

Cet effort de rationalisation/normalisation va nécessiter un travail d'ingénierie contractuelle conséquent. Ainsi, si les véhicules du programmes Scorpion sont dotés de dispositifs permettant de collecter des données produites par l'utilisateur, leur exploitation n'a pas encore fait l'objet de contrats⁵³ : « Nexter doit encore convaincre la DGA de sa capacité à anticiper le MCO de façon pertinente à partir des données récoltées. » Cet exemple résume bien les difficultés anticipées dans la mise en place de ces « nouveaux modes » de MCO. Les contrats de MCO seront certainement plus complexes à définir, voire à mettre en œuvre et à piloter, ce qui va notamment exiger plus de personnels spécialisés sur ces questions.

Enjeux opérationnels liés aux données

Au-delà des questions industrielles et économiques qui motivent l'utilisation des données produites par les matériels pour le MCO, se posent aussi des questions d'ordre opérationnel.

En effet, tous les matériels connectés émettent des données ce qui, d'une façon ou d'une autre, implique de se dévoiler, en contradiction avec la discrétion requise pour la plupart des opérations militaires (au moins en ce qui concerne les créneaux confidentiels). La transmission des données devra s'effectuer en toute discrétion, et probablement en décalé pour ne pas révéler la position ni l'heure (et la date) à laquelle un matériel se trouve en service. Dans cette perspective, la mise en place de canaux de

52. Source : MINARM/EMA/DGA, *Politique générale du maintien en condition opérationnelle des équipements de défense sur leur cycle de vie*, op. cit., p. 8.

53. T. M. Gassiloud, *Rapport d'information sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. IV : *Défense, préparation et emploi des forces : forces terrestres*, Assemblée nationale, 2017, p. 45.

transmission différents, dès la conception d'une plate-forme, peut être envisagée. À titre anecdotique – mais qui reste en lien avec les objets connectés et la transmission de données – la position de militaires américains s'entraînant dans des bases très protégées a pu être détectée en suivant la concentration d'utilisateurs d'une application de course à pied que les militaires utilisaient sur leurs montres connectées⁵⁴. De même, pour éviter un déni de service, il convient d'éviter que la donnée pour le MCO ne vienne à primer sur celle dédiée à l'opération. La donnée – incluant la maintenance – tend à prendre de plus en plus d'importance dans les phases opérationnelles et dans la chaîne de commandement.

Par ailleurs, un certain nombre d'acteurs du MCO craignent que les systèmes de maintenance prévisionnelle enlèvent de la marge de manœuvre aux personnes en charge de la gestion des matériels, notamment sur le terrain. Il peut par exemple exister des contradictions entre un système de maintenance recommandant un acte de maintenance dans 20 heures et un chef d'équipage militaire décidant de planifier une opération dans 12 heures. Dans ces cas, qui décidera de l'emploi, ou non, du matériel concerné ?

Enfin, une autre préoccupation, à plus long terme, est le risque de perte de savoir-faire en matière de maintenance, plus particulièrement pour le diagnostic de pannes. En effet, le recours accru et systématique aux systèmes prédictifs, ainsi que la surconfiance dans ces systèmes, peut conduire petit à petit à des pertes de savoir-faire en ce qui concerne l'analyse des différents paramètres de fonctionnement d'un matériel. *In fine*, le risque est de ne plus être capable d'intervenir dans des situations dégradées, notamment en situation de combat.

Comme dans la question de l'automatisation des matériels sur le champ de bataille, la préoccupation dans le MCO est que le décideur en dernier ressort reste bien l'homme. Les systèmes de remontée des informations peuvent en effet devenir des entraves à la conduite des opérations (cette préoccupation ressort du travail

54. O. Becht et T. Gassiloud, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, op. cit., p. 65-66.

de terrain mené lors de cette étude), l'idée générale étant que le système formule des propositions, mais ne « prenne pas de décision ».

3. SYNTHÈSE DES INTÉRÊTS/LIMITES

L'Internet des objets ainsi que les technologies qui lui sont associées (notamment le *big data analytics*) doit permettre de faire la bonne opération de maintenance sur un matériel, au bon moment, en faisant en sorte que le temps d'indisponibilité soit le plus réduit possible. Aujourd'hui, concernant l'IoT et l'exploitation des données dans le MCO dans l'armée française, un constat partagé semble être qu'il y a plus de « potentiel » que de « réalisé ». La plupart des acteurs du MCO en sont encore à des stades exploratoires de type POC (*proof of concept*) ou POV (*proof of value*). L'aspect exploratoire est encore plus présent dans les applications du big data à la maintenance que certains acteurs du MCO n'hésitent pas à qualifier de « balbutiantes ».

Néanmoins, le sujet est à l'étude avec des résultats prometteurs. Si nous prenons les études actuelles pilotées par le SMCO à la DGA⁵⁵, sur les technologies issues de l'industrie 4.0 avec application dans le MCO des matériels, sur 18 études pour la période 2016-2021, 13 concernent la thématique des objets connectés, le traitement des données et la structuration des données dans le but d'améliorer le MCO des matériels.

Sur ces 13 études, 10 abordent uniquement la thématique des données, de leur structuration et exploitation dans une logique d'IoT (les 3 autres études abordant également des sujets comme l'impression 3D ou la réalité augmentée). Enfin, tous les milieux sont concernés par ces études, ce qui témoigne du caractère transverse de la question.

55. C'est-à-dire au niveau de la politique stratégique et des politiques de programme.

Tableau 5

Études entreprises par la DGA et traitant de l'IoT dans le MCO

	Milieu	Descriptif du projet
1	Naval	État des lieux.
2	Naval – mais réflexion sur potentiel d'application aux autres milieux	Expérimentation maintenance prédictive.
3	Naval	Étude de besoin (opportunité gain) de maintenance prédictive.
4	Naval	Étude de besoin (opportunité gain) de téléassistance.
5	Naval	Schéma directeur relatif à l'implémentation de la maintenance prédictive et de la télémaintenance.
6	Naval	Améliorer la transmission de données entre SSF et la DGA pour optimiser la gestion des pièces de rechange.
7	Naval	Mettre en place un système de soutien logistique intégré (SLI) partagé.
8	Terrestre	Étude de faisabilité des HUMS dans les matériels terrestres (PROPHÈTE).
9	Terrestre	Tester la viabilité du modèle économique de PROPHÈTE (VÉRITÉ).
10	Aéronautique	Étude sur les conditions de la mise en place du big data. Apport du big data dans le MCO et notamment sur la <i>supply chain</i> . Benchmark/RETEX avec le secteur civil pour éclairer les applications possibles du big data au MCO.
11	Aéronautique	PEA. Développement d'une architecture de collecte et traitement de données pour optimiser le fonctionnement des moteurs d'hélicoptères.
12	Aéronautique	Développement de nouvelles technologies et de nouveaux outils pour la surveillance, le diagnostic et la maintenance des voilures tournantes avec un focus sur les turbomoteurs d'hélicoptères.
13	Aéronautique	Opération d'expérimentation réactive. Traitement optimisé pour le soutien opérationnel complexe d'aéronefs. Essai d'application d'une solution logicielle (OPÉRA), développée pour un grand avionneur européen, au traitement des données d'une flotte d'aéronefs militaires.

Source : auteurs, d'après données SMCO (DGA)

Cet effort en termes de veille et de prospective montre l'importance accordée à la thématique. Les études concernent aussi bien le potentiel du *big data analytics* dans le MCO aéronautique, que les problématiques de télémaintenance dans le naval, la structuration des données ou encore l'intérêt des HUMS dans le MCO des matériels terrestres.

Une des conséquences directes de l'intégration de l'IoT dans le MCO est un effort nécessaire sur les phases en amont pour intégrer ce dernier dans la conception, à la fois dans les dimensions techniques (hardware et software) mais aussi l'usage (qui traite la donnée ? comment la traiter ? etc.). L'implémentation de matériels connectés s'accompagne d'une augmentation de la complexité des systèmes dans les phases en amont (R&D et conception) : la phase de conception doit anticiper l'installation de capteurs, de dispositifs de collecte, de dispositifs de stockage de données, de connectiques pour utilisation locale ou via communication satellitaire. Par ailleurs, compte tenu de l'évolution rapide des TIC, cette phase doit également intégrer des possibilités d'évolution des capteurs, systèmes de collecte, etc.

Globalement, les industriels semblent être particulièrement pro-actifs dans la proposition de ce type de solutions, même si cela n'est pas le cas de tous. Si les initiatives entreprises par les différents acteurs témoignent du potentiel de ces technologies pour réduire ou contenir les coûts des matériels de défense et accroître leur disponibilité, des freins ou limites existent également.

Une vision synthétique des intérêts et des limites de l'intégration des technologies liées à l'IoT dans le MCO des matériels de défense est proposée dans le tableau 6.

Tableau 6

Intérêts/limites de l'IoT dans le MCO des équipements de défense

Intérêts	Limites/freins
<ul style="list-style-type: none"> • Aller vers des solutions de maintenance individualisées via les HUMS (<i>Health and usage monitoring systems</i>) à partir des données produites par les matériels. Réduction des coûts et amélioration de la disponibilité. • Possibilité d'une exploitation systématisée et à grande échelle de données non structurées (information de nature qualitative dans les comptes rendus de faits techniques). • Optimisation des flux logistiques dans la gestion logistique des biens et aussi dans la gestion des pièces détachées (traçabilité des flux, localisation des pièces, inventaires facilités). • Amélioration de la gestion de l'outillage : a) traçabilité et localisation des outils et b) traçabilité des procédures de maintenance. • Amélioration de la gestion de la documentation et du suivi des configurations des équipements et des matériels. • Économies de papier et réduction des délais dans les processus de maintenance. • Flux de revenus plus réguliers pour les industriels. Développement de <i>Business models</i> fondés sur les services (maintenance et formation). • Instrument de puissance : la maîtrise des données nécessaires à la maintenance est un instrument d'influence de long terme sur le pays qui achète les matériels dans le cadre de l'exportation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Transmission des données. • Stockage des données : coût, faisabilité technique. L'accumulation de données est coûteuse. • Sécurisation des données : risque cyber (cyberattaque) et risques de géolocalisation des matériels lors des missions. • Risques de déni de service (saturation des réseaux de communication) • Risques de pertes de compétences en matière de maintenance sur le long terme. • Traitement des données. La diversité des données combinée au volume des données nécessite des traitements spécifiques (<i>big data analytics</i>). Le rythme de production devrait suivre le rythme des techniques de traitement. • Importance de la formation dans un domaine où l'offre reste relativement rare et où les besoins sont croissants et tirés par d'autres secteurs (finance, banque, santé, marketing, etc.). • Accès aux données : asymétries d'information qui se creusent entre industriels constructeurs et services étatiques. Question de la transférabilité des données d'un prestataire à l'autre. • Contraintes techniques : exemple puces RFID spécifiques pour des supports métalliques. • Écosystèmes plus complexes. Nécessité d'une appropriation par les personnels en charge de la maintenance voire de l'utilisation dans les forces. Nécessité d'investir dans la formation des personnels. • Complexité des marchés associés à ce type de prestations. • La multiplication des capteurs et des systèmes de collecte entraîne une augmentation de l'électronique de puissance, un alourdissement des matériels, des coûts supplémentaires en termes de gestion/maintenance des capteurs.

Source : auteurs

III. IMPRESSION 3D ET MCO

Dans cette partie, nous traiterons de la technologie de l'impression 3D et de son application potentielle au MCO des matériels de défense. Ce nouveau processus de production affecte de manière transverse l'ensemble de la *supply chain* avec de nombreuses conséquences sur la production, la logistique mais aussi la conception et l'innovation relatives aux pièces détachées et aux équipements. Toutes ces conséquences affectent également le MCO. Une première partie présentera de façon assez générale les processus d'impression 3D (§ 1). Ensuite nous nous intéresserons au potentiel d'application de l'impression 3D dans le MCO des matériels de défense (§ 2). Une troisième partie détaillera les limites que l'on peut rencontrer dans l'implémentation de l'impression 3D dans le MCO (§ 3). Enfin, nous proposerons une synthèse des intérêts et limites de l'impression 3D dans le MCO (§ 4).

1. PRINCIPE DES PROCESSUS D'IMPRESSION 3D

• *Définition et fonctionnement*

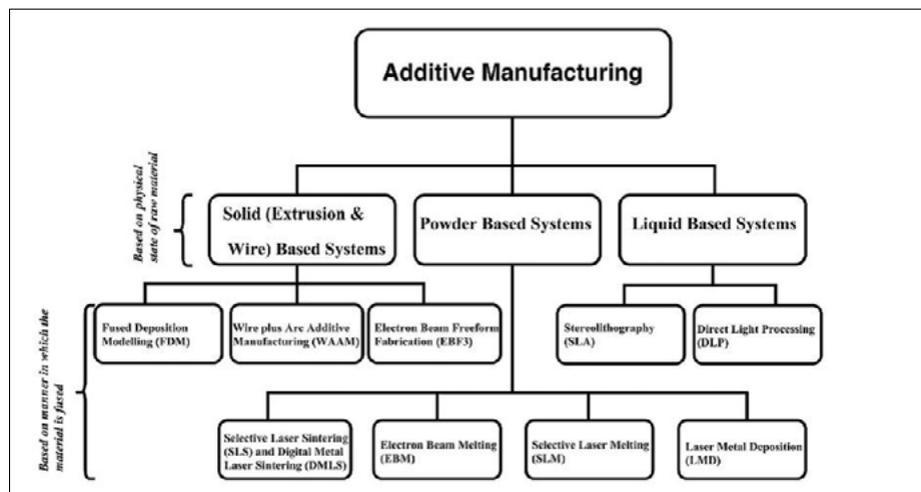
L'impression 3D ou fabrication additive est définie dans la norme ISO 17-296:2 2015 comme « un procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèles en 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme ». L'impression 3D regroupe plusieurs procédés de fabrication assistée par ordinateur, et définis par les organismes de normalisation nationaux ou internationaux¹. Une

1. La norme ISO 17-296:2 2015 distingue 7 familles de procédés. Lorsqu'on regarde la littérature, il y a cependant plus de 7 procédés qui sont recensés (voir par exemple Sunil C. Joshi et Abdullah A. Sheikh, « 3D printing in aerospace and its long-term sustainability », *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, n° 4, 2015, p. 175-185, qui en recensent 9 différents). Pour une présentation technique plus détaillée des différents procédés d'impression 3D, se référer à Philip Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, Rocket, 2017 (annexe 1) ; Joel Rosenberg

vision schématique des principaux processus d'impression 3D peut être proposée dans la figure suivante :

Figure 15

Les principaux processus d'impression 3D



Source : Joshi et Sheikh (2015), p. 177²

et al., *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^e siècle*, CCI Paris Île-de-France - Conseil général de l'armement, 2015 ; Anne-Françoise Obaton et al., « Fabrication additive : état de l'art et besoins métrologiques engendrés », *Revue française de métrologie*, vol. 1, n° 41, 2016, p. 21-36 ; Martin Baumann et al., « The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 102, janvier 2016, p. 193-201 ; ou Omer F. Beyca et al., « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13) dans A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, op. cit., p. 217-234. Pour un focus récent sur les processus d'impression 3D métallique, voir Jean Guilhem, « Tendances. Festival de procédés en additif métallique », *Air & Cosmos*, n° 2597, juin 2018, p. 28-30.

2. S. Joshi et A. Sheikh, « 3D printing in aerospace and its long-term sustainability », art. cit., p. 177.

Il existe un lien très fort entre le procédé et la matière première utilisée pour l'impression³. Sans entrer dans le détail, distinguons les trois grands types de procédés :

- Le premier procédé est fondé sur une matière solide qui est chauffée pour être fondue puis déposée couche par couche. Cette technique, qui est souvent considérée comme la méthode la plus basique, repose généralement sur trois éléments principaux : un plateau d'impression sur lequel est imprimé la pièce, une bobine de filament qui sert de matériau d'impression et une tête d'extrusion. Pour résumer, le filament est entraîné et fondu par l'extrudeur de l'imprimante, qui dépose le matériau de manière précise couche par couche sur le plateau.

- Le deuxième procédé est fondé sur des poudres. Il est plus particulièrement utilisé dans l'impression de pièces métalliques. La matière première, sous forme de poudre métallique, est injectée dans une buse pour former un jet homogène. La poudre est fondue – par un laser dans la technologie SLM (*Selective Laser Melting*) ou par un faisceau d'électron dans la technologie EBM (*Electron Beam Melting*) – puis déposée pour former une couche. L'objet se crée ainsi par couches successives. Les techniques à base de poudre sont particulièrement préconisées pour la réparation de pièces métalliques⁴, l'ajout de fonctions ou la fabrication de matériaux à gradients.

- Le troisième procédé, le plus ancien, est fondé sur une matière liquide qui est solidifiée. Dans ce procédé, les modèles 3D sont généralement fabriqués à partir d'une résine liquide qui se solidifie lorsqu'elle est exposée à des rayons ultraviolets (UV).

3. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *Revue Défense Nationale*, avril 2018, p. 93-97.

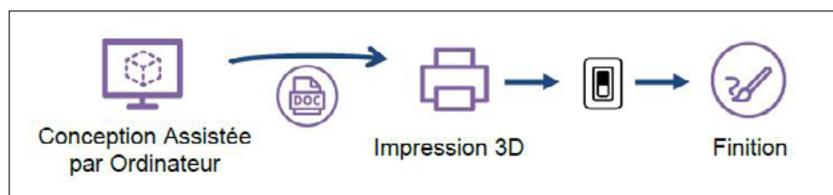
4. Par exemple, la technologie *Cladding* ou LMD (*Laser metal Deposition*) est utilisée par l'entreprise Chromalloy pour les rechargements métalliques des pièces usées des réacteurs d'avions (J. Guilhem, « Tendances. Festival de procédés en additif métallique », art. cit., p. 29).

Ces différents procédés ont pour point commun la mise en forme d'une pièce par ajout de matière avec un empilement de couches successives (fabrication additive de type *bottom-up*), contrairement par exemple aux procédés traditionnels dans l'industrie qui procèdent par enlèvement de matière (fabrication soustractive de type *top-down*)⁵.

La fabrication d'une pièce par impression 3D se déroule, de façon schématique, en trois phases : la modélisation de l'élément à fabriquer par la création d'un modèle 3D avec un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAD, ou *Computer Aided Design*)⁶, dans un format informatique standardisé (STL, ou *Standard Tessellation Language*, ou tout autre format de fabrication additive) ; la prise en compte du fichier par le système d'impression 3D (ou « imprimante ») ; puis le processus de fabrication (ou « impression ») par couches successives, qui, dans la plupart des cas, est achevé par une ou plusieurs étapes de finition.

Figure 16

Les trois étapes de l'impression 3D



Source : ADEME⁷

5. Par exemple la fabrication métallique traditionnelle se fait par ébauche à partir d'un bloc de métal, puis par usinage progressif.

6. Conception assistée par ordinateur (CAO).

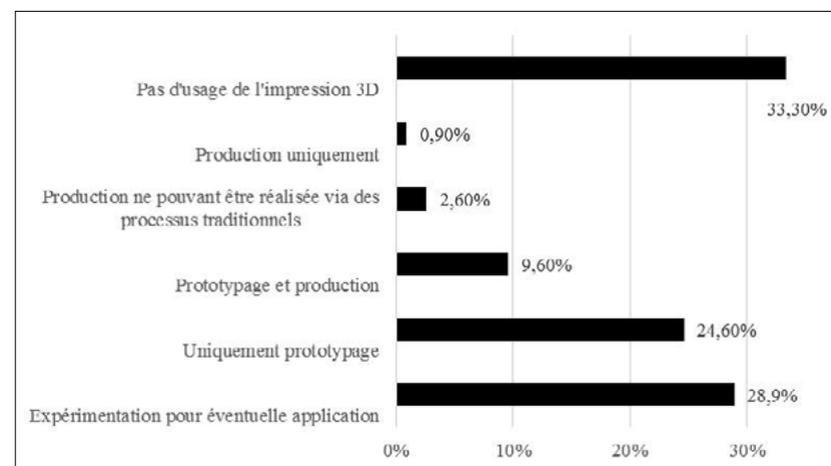
7. O. Jan et al., *Encourager la réparation via l'utilisation de l'impression 3D et des espaces de fabrication numériques : État des lieux et pistes d'actions*, ADEME, 2017, p. 17.

Diffusion et applications industrielles

L'impression 3D n'est pas à proprement parler une technologie nouvelle. Elle est en effet utilisée depuis les années 1980⁸, dans l'industrie, notamment aéronautique et spatiale, à des fins de prototypage rapide. La première impression 3D métallique date de 1995⁹. L'emploi de l'impression 3D pour le prototypage est encore très répandu, comme le montre une étude du Cabinet PwC réalisée sur 120 entreprises américaines du secteur manufacturier et publiée en 2016 :

Figure 17

Résultats de l'étude de PwC sur l'usage de l'impression 3D dans l'industrie



Source : auteurs, d'après Curran (2016)¹⁰

8. Le premier brevet d'impression 3D est français et il a été enregistré en juillet 1984 pour le compte de CILAS ALCATEL. En août 1984, aux États-Unis, l'Américain C. Hull dépose le brevet sur la technique de stéréolithographie (SLA). Ce brevet donnera non seulement le nom de l'extension du fichier d'impression .stl qui s'impose comme un standard, mais donnera aussi naissance à l'entreprise leader 3D Systems qui lance en 1988 son imprimante SLA-250.

9. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

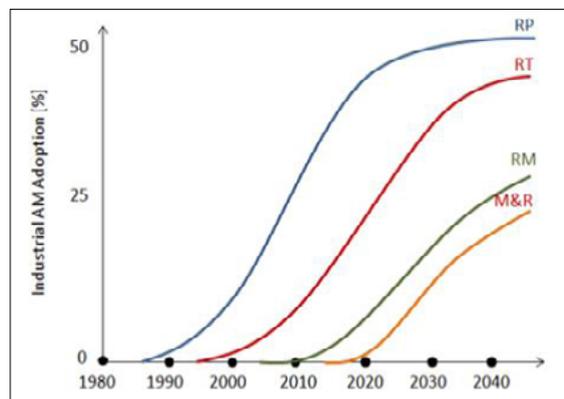
10. C. Curran, *The Road Ahead for 3D Printing*, Price Waterhouse Cooper - PwC Next in Tech, 2016.

La figure 18 présente une mise en perspective chronologique des différents usages de l'impression 3D des années 1980 avec une projection au-delà de 2040.

Historiquement le prototypage rapide (*Rapid Prototyping* – RP) est le premier champ d'application de l'impression 3D, suivi de près par la fabrication accélérée d'outillages (*Rapid Tooling* – RT)¹¹. Depuis les années 2010, les domaines d'application dans la production de pièces et composants de produits se développent (*Rapid Manufacturing* – RM). En particulier, l'industrie s'intéresse à la production de pièces complexes en petites séries en *Rapid Manufacturing*¹². Concernant la maintenance (*Maintenance and Repair* – M&R), on constate que les applications n'en sont qu'à une phase de « décollage », mais avec des perspectives annoncées comme prometteuses¹³.

Figure 18

Chronologie d'adoption des usages de l'impression 3D



Source : Sisca et al. (2016)¹⁴

11. C. Barrat, *3D printing: second edition*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, 308 p.

12. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

13. W. E. Frazier, « Metal Additive Manufacturing: A Review », *JMEPEG*, vol. 23, n° 6, 2014, p. 1917-1928.

14. F. G. Sisca et al., « Additive Manufacturing as a strategic tool for industrial competition », s.l., 2016.

De nombreux procédés se sont développés permettant progressivement le traitement d'une gamme de matériaux de plus en plus large : polymères, céramiques, composites, métaux, multi-matériaux, matériaux à gradients¹⁵. Au début, les pièces produites étaient uniquement en matière plastique, puis la production de pièces en matériaux céramiques, composites puis en métal s'est progressivement développée. En particulier, les problèmes de robustesse qui rendaient les pièces en composites incapables de rivaliser avec les pièces issues de processus de production traditionnels (découpe et usinage dans la masse ou fonderie par exemple) ont progressivement été résolus.

Les progrès des techniques d'impression 3D et surtout des matériaux ont progressivement amené les pièces obtenues par fabrication additive à développer des propriétés mécaniques proches de celles des pièces obtenues par les processus traditionnels. Aujourd'hui l'impression 3D des polymères (composites) est assez bien maîtrisée. L'additif métallique associant mécanique et métallurgie reste encore expérimental¹⁶ avec toutefois une forte croissance du nombre de fabricants de systèmes d'impression 3D métalliques ces dernières années, notamment en Europe¹⁷.

Aujourd'hui, la plupart des pays industrialisés et émergents investissent massivement dans l'impression 3D¹⁸. En France, elle se positionne comme un axe majeur du développement de « l'Industrie du futur ». De fait, les champs d'application de cette technologie se développent dans de nombreux domaines : médical (planification d'intervention chirurgicale, réalisation de prothèses personnalisées), les biotechnologies (impression de tissus biologiques, de matériaux « biocompatibles »), le design ou l'enseignement¹⁹. Dans l'industrie

15. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

16. J. Guilhem, « Fabrication additive : addimadour : objectif grandes structures », *Air & Cosmos*, n° 2557, juillet 2017, p. 16-17.

17. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (2/2) », *Revue Défense Nationale*, mai 2018, p. 51-57.

18. *Ibid.* ; D. G. Schniederjans, « Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis », *International Journal of Production Economics*, 183 A, 2017, p. 287-298.

19. O. Beyca, G. Hancerliogullari et I. Yazici, « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13), *art. cit.*

on retrouve l'impression 3D pour la fabrication de pièces, de prototypes, la fabrication d'outillages, la réparation de pièces ayant subi des dommages ou de l'usure, l'aide visuelle pour la production ou la formation, modèles d'exposition (non fonctionnels), production d'outillages spécifiques, moules pour réaliser des pièces via des processus « traditionnels », etc.²⁰. Cette liste n'est pas exhaustive, elle vise simplement à montrer la grande diversité des champs d'application de l'impression 3D dans l'industrie.

Dans le secteur de la défense, nombre d'industriels ont déjà recours à ces procédés, en particulier les motoristes de l'aéronautique, qui sont particulièrement avancés dans la mise en œuvre de l'impression 3D. C'est le cas notamment de Pratt & Whitney (pièces du moteur du F-35 notamment), de Rolls-Royce (pièces de moteurs de jets commerciaux)²¹, de Safran pour le moteur Leap (par exemple les injecteurs)²², de GE Aviation (le turbopropulseur ATP devrait inclure jusqu'à 35 % de pièces fabriquées en impression 3D)²³.

2. INTÉRÊTS DES PROCESSUS D'IMPRESSIION 3D DANS LE MCO

Nous examinons dans ce chapitre les avantages qu'offre l'impression 3D par rapport aux processus classiques (par exemple usinage pour le métal ou collage pour les composites) dans le MCO.

Innovation de produit

En premier lieu, les processus d'impression 3D favorisent l'innovation de produit. En effet, ces processus autorisent la « mise en avant » de la fonctionnalité dans la création d'un produit tout en effaçant – partiellement – la contrainte industrielle. Ils offrent la

20. J. Rosenberg, P. Morand et D. Turcq, *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^e siècle*, op. cit. ; O. Beyca, G. Hancerliogullari et I. Yazici, « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13), art. cit.

21. « 3D printing, entering the jet age », *The Economist*, 7 mars 2015, p. 68.

22. P. Langlois, « Imprimantes 3D : vers une révolution logistique ? », *Défense et sécurité internationale*, septembre 2013, n°95, p. 73 ; A. Angrand, « A320 neo. Concentré de technologies pour le LEAP-1A », art. cit., p. 320.

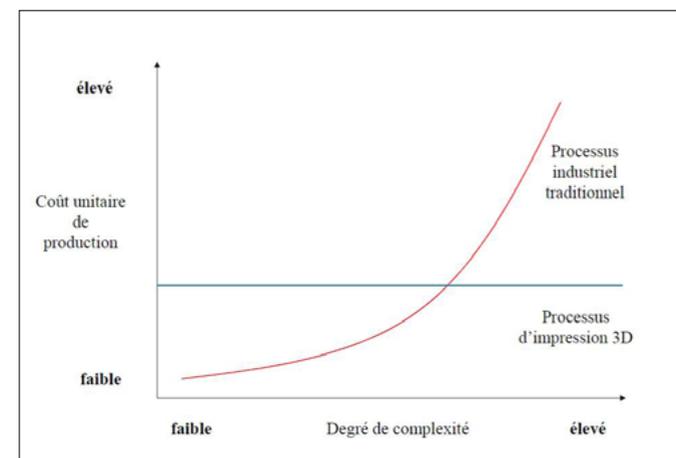
23. Source : *Air & Cosmos*, n° 2522, 11 novembre 2016, p. 7.

possibilité d'optimiser la topologie des pièces en rendant possible la fabrication de pièces à la géométrie complexe, au design bio-inspiré et monolithique (i.e. d'une seule pièce) dans des matériaux parfois complètement nouveaux²⁴. Avec ces processus, il devient possible de produire des pièces qui seraient impossibles à réaliser sur le plan technique avec des processus traditionnels.

Sur un plan économique, l'impression 3D offre également la possibilité de faire des produits complexes à coût marginal constant, ce qui est qualifié de *complexity for free*²⁵. Ces processus permettent en effet de générer des formes de pièces et des combinaisons de matériaux impossibles à réaliser en processus industriel classique ou alors à un coût marginal fortement croissant.

Figure 19

Relation entre coût unitaire et degré de complexité



Source : auteurs, adapté de Von Tell (2017)²⁶

24. M. Baumers, C. Tuck et R. Hague, « Realised levels of geometric complexity in additive manufacturing », *International Journal of Product Development*, vol. 13, n° 3, 2011, p. 222-244 ; R. Hague, S. Mansour et N. Saleh, « Material and design considerations for rapid manufacturing », *International Journal of Production Research*, vol. 4, n° 22, 2004, p. 4691-4708.

25. P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, op. cit.

26. *Ibid.*, p. 24.

Cette possibilité technique ouvre la voie à des matériaux ayant des propriétés nouvelles et uniques ainsi qu'à davantage de spécification des pièces et systèmes adaptés au plus près des besoins sur le terrain (par exemple des matériaux complètement nouveaux sur des drones ou des matériaux navals aux propriétés acoustiques nouvelles)²⁷.

Ces nouveaux matériaux peuvent être plus résistants, ce qui accroît la durée de vie des pièces et limite *in fine* les opérations de maintenance liées à leur remplacement. Par exemple, InssTek Korea et Z3Dlab France proposent un matériau pour des pièces conçues en impression 3D qui est 100 % inerte et 50 % plus résistant que le titane, les pièces réalisées à partir de ce matériau ayant une durée de vie 30 % plus longue²⁸. Depuis 2015, InssTeck reconditionne des moteurs GE de Boeing F-15K (avion de chasse équipant les forces aériennes sud-coréennes) et l'intervention de maintenance qui porte sur l'usure des disques de turbine a nettement diminué les coûts de MCO par rapport aux réparations conventionnelles²⁹.

La diversité des matériaux de l'impression 3D ouvre un potentiel technique important dans la maintenance. Concernant les pièces métalliques par exemple, l'impression 3D va permettre de réparer des matériaux qui ne sont actuellement pas soudables ou en limite de soudabilité³⁰, ce qui permet d'envisager de réparer des pièces dont les options de réparation sont aujourd'hui inexistantes. Dans une perspective plus « futuriste », on parle également d'impression 4D, i.e. une impression 3D dont le produit est évolutif dans le temps, grâce à l'utilisation de matériaux dits « évolutifs³¹ ». Cette technologie permettrait aux matériaux et aux structures des pièces de s'adapter à des contextes d'emploi différents, suivant

27. E. Lundquist, « Adaptive manufacturing and 3D printing. The art of the previously not possible », *Naval Forces*, n° 6, 2014, p. 43-45.

28. A. Angrand, J. Guilhem et R. Noyé, « L'impact à venir de la fabrication additive », *Air & Cosmos*, n° 2518, 2016, p. 33-40.

29. *Ibid.*

30. A. Angrand, « Fabrication additive. Les commandes de vol maintenant en imprimé 3D », *Air & Cosmos*, avril 2017, n° 2544, p. 30-31.

31. J. Choi *et al.*, « 4D Printing Technology: A Review », *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, n° 4, 2015, p. 159-167.

l'évolution de certains facteurs, en réagissant par exemple aux changements de luminosité, de chaleur, d'hygrométrie, etc.³². La structure de telles pièces ne sera donc plus fixe mais à géométrie variable dans le temps, ce qui pourrait accroître les performances opérationnelles mais aussi optimiser la durée de vie des pièces et *in fine* réduire les besoins de maintenance³³.

Enfin, d'un point de vue plus orienté « atelier », l'impression 3D offre la possibilité de créer de nouveaux outils, plus performants et plus ergonomiques. Par exemple, une clé plate de 17, en fibre de longue de carbone et Nylon serait 9 fois moins lourde qu'une clé en métal, avec des avantages comme la non-conductivité, une créativité de formes (angles particuliers, poignées ergonomiques) permise par la fabrication additive³⁴. De façon générale, ce type de procédé de production va favoriser la personnalisation des outillages, ce qui peut contribuer à améliorer la productivité dans les ateliers et à réduire certains risques, celui des troubles musculosquelettiques (TMS) notamment³⁵.

Gain de masse

L'impression 3D permet de réaliser des pièces de formes complexes, qui contiennent moins d'éléments que les pièces classiques (dont les composants doivent être assemblés entre eux). Simplifier

32. B. Ehrwein et L. Archambault, « Les enjeux de l'impression 3D et l'évolution vers l'usine innovante et l'impression 4D ? » (tribune libre), *Air & Cosmos*, n° 2590, 13 avril 2018, p. 34-35.

33. L'armée américaine s'intéresse particulièrement à cette technologie pour la mise au point de combinaisons de camouflage intelligentes, s'adaptant à l'environnement et aux impacts.

34. Agnès Baritou d'Armagnac, « Fabrication additive. Feelobject 3D veut séduire l'aéronautique », *Air & Cosmos*, n° 2557, juillet 2017, p. 27.

35. Les troubles musculosquelettiques (TMS) regroupent un ensemble d'affections de l'appareil locomoteur (muscles, os, tendons et nerfs). En France, les TMS ont représenté 42 000 maladies professionnelles en 2016 soit 87 % des maladies reconnues. Les TMS sont une source de désorganisation majeure pour les entreprises et peuvent entraîner une baisse de performance (notamment baisse de la productivité et de la qualité) et avoir un impact majeur en ce qui concerne l'absentéisme et le turn-over (source : N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit., p. 35).

les pièces ou les rendre plus résistantes peut également simplifier leur maintenance ou réduire le besoin en maintenance.

L'impression 3D permet aussi de produire des pièces avec des gains de masse significatifs, de l'ordre de 50 à 75 % par rapport à des pièces réalisées au moyen des technologies traditionnelles (usinage, fonderie, électroérosion)³⁶. Une pièce composée de plusieurs éléments peut ainsi être remplacée par une pièce relativement plus légère composée d'un seul bloc ou d'un nombre relativement restreint d'éléments. Sur l'avion de chasse américain F-18, un conduit lié au système de contrôle de l'environnement est ainsi passé d'un assemblage de 16 pièces à une pièce unique³⁷. Dans le secteur civil, le support de la caméra de queue de l'A350 XWB d'Airbus est devenu une pièce unique (contre un assemblage de 30 composants auparavant)³⁸.

Ces gains de masse et de résistance sont particulièrement recherchés dans l'aéronautique pour accroître la performance d'assemblages complexes et réduire les coûts d'exploitation. Le F-35 contient près de 1 000 pièces fabriquées en impression 3D³⁹. Chez Safran, les carters des Leap-1A, 1B et 1C produits par CFM sont réalisés en matériaux composites tissés en 3D, ce qui permet d'abaisser la masse de chaque aube à 5 kg (contre 11 kg pour les modèles en titane)⁴⁰. La fabrication de charnières pour l'A320 via l'impression 3D a permis un gain de masse de 55 % par rapport au procédé traditionnel⁴¹.

On retrouve ces procédés de fabrication dans d'autres domaines que l'aéronautique. Ainsi, chez Renault Trucks, l'impression 3D a permis de réduire le nombre de composants du

36. A. Angrand, « Fabrication additive. Les commandes de vol maintenant en imprimé 3D », *art. cit.* ; M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

37. T. Johnston, T. D. Smith et J. L. Irwin, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat*, RAND Corporation, 2018.

38. J. Guilhem, « Structures complexes. Additif métal pour l'A350 XWB », *Air & Cosmos*, n° 2582, février 2018, p. 35.

39. J. Bauer et P. Malone, « Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing », *ICEAA 2015*, 2015.

40. A. Angrand, « A320 neo. Concentré de technologies pour le LEAP-1A », *art. cit.*

41. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

moteur DTI 5 de 25 %, soit 200 pièces en moins sur un moteur qui pesait à l'origine 525 kg pour 840 pièces⁴². Le gain de masse total est de 120 kg avec une simplification d'ensemble de la structure du moteur et potentiellement de sa maintenance. Dans le sport mécanique, domaine où la recherche de gain de masse est également fondamentale, des processus en impression 3D permettent de produire une boîte de vitesse de Formule 1 avec des gains de masse de près de 20 – 25 % par rapport à des processus traditionnels et des gains de volume de l'ordre de 20 %⁴³.

Production à la demande

Dans la chaîne de production, les processus d'impression 3D pourraient permettre des gains de temps en réduisant les délais de mise à disposition, avec une production plus proche, voire directement sur les lieux d'utilisation. L'idée serait de mettre en place de « mini-usines déportées », à proximité par exemple des théâtres d'opération militaires, qui seraient capables de fabriquer un certain nombre de pièces détachées ou de composants. La fabrication sur place permettrait une plus grande réactivité dans la production et l'acheminement des pièces détachées, ce qui serait particulièrement utile dans les cas où la demande de pièces détachées est localisée loin du site de production d'origine. Cette possibilité serait d'autant plus intéressante que l'impression 3D permet la production de séries courtes, voire à l'unité. Dans un contexte opérationnel, l'avantage serait de réduire la vulnérabilité des convois logistiques, qui sont également coûteux en ressources humaines, matérielles et énergétiques⁴⁴.

Dans cette perspective, la NASA a mis en place un démonstrateur d'imprimante 3D pour fabriquer des pièces dans la station

42. Source : « Renault Trucks allège ses moteurs grâce à l'impression 3D », *L'Usine nouvelle*, 26 janvier 2017.

43. N. Guo et M. C. Leu, « Additive manufacturing: technology, applications and research needs », *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, n° 3, 2013, p. 215-243.

44. O. Becht et T. Gassiloud, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, *op. cit.*

spatiale internationale⁴⁵. La fabrication de munitions directement sur les théâtres d'opération par impression 3D est également recherchée⁴⁶. L'US Army a ainsi déployé en 2012, en Afghanistan, trois conteneurs hélicoptables dotés d'une imprimante 3D et permettant de fabriquer sur place des pièces détachées pour des armes légères⁴⁷. Les cas d'application relevés concernent aussi la maintenance, notamment en opérations extérieures. En 2014, l'US Navy a embarqué sur un porte-avion une imprimante 3D dans le cadre d'un atelier pour présenter au personnel embarqué – militaires et maintenanciers – le potentiel d'applications de ce type de processus dans le MCO naval. L'Europe n'est pas en reste, avec l'Agence européenne de défense (AED) qui a récemment financé un démonstrateur d'impression 3D mobile (*Additive Manufacturing feasibility study and technology demonstration*)⁴⁸. En mai 2017, le dispositif a fait un vol à bord d'un C-130 espagnol, validant ainsi ses capacités de déploiement potentiel sur un théâtre d'opération⁴⁹.

Économiquement, ce type de solution géographiquement plus décentralisée permettrait de réduire les coûts de stockage⁵⁰. D'abord, les pièces détachées et composants ne seraient plus stockés physiquement mais « numériquement », avec des économies potentielles sur le transport (puisque l'envoi d'un fichier numérique se fait à un coût plus réduit et beaucoup plus rapidement que l'envoi d'une pièce de rechange « physique »). *In fine* cela permettrait une amélioration du ratio disponibilité/coût par une mise à disposition immédiate au plus près du besoin, avec très peu de temps d'immobilisation.

45. E. Lundquist, « Adaptive manufacturing and 3D printing. The art of the previously not possible », *art. cit.*

46. P. Langlois, « Imprimantes 3D : vers une révolution logistique ? », *art. cit.*, p. 72-73.

47. *Ibid.*, p. 73.

48. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (2/2) », *art. cit.*

49. Source : B. Gilson, « Union européenne. Ouverture du centre européen de transport technique », *Air & Cosmos*, n° 2551, 19 juin 2017, p. 18.

50. P. Liu *et al.*, « The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis », *Production Planning & Control*, vol. 25, n° 13-14, 2014, p. 1169-1181.

Gestion des obsolescences

Les processus d'impression 3D offrent des facilités pour la fabrication de pièces détachées en petites quantités – voire à l'unité – et en particulier les pièces obsolètes (pièces orphelines). Un scanner en trois dimensions permet de réaliser un fichier numérique qui est ensuite envoyé à une imprimante 3D⁵¹. Il devient alors plus facile d'un point de vue technique, mais aussi plus rentable d'un point de vue économique, de reproduire une pièce en série limitée à partir de son fichier numérique que de relancer une ligne de production (qui parfois n'existe plus si le constructeur d'origine a disparu ou ne produit plus la pièce en question). Pour beaucoup de pièces issues de matériels relativement anciens, les moules de fonderie n'existent plus⁵². Ces processus pourraient permettre une meilleure maîtrise de l'obsolescence des pièces sur les matériels et ainsi engendrer des économies substantielles sur le MCO et sa chaîne logistique.

Quelques exemples permettent d'illustrer l'intérêt de l'impression 3D pour la gestion des obsolescences. Dans le secteur aéronautique civil, Airbus a créé des pièces de rechange en impression 3D pour l'A310 (entré en service en 1983), pièces non disponibles aujourd'hui dans les circuits commerciaux traditionnels. Dans le MCO militaire, depuis 2001, Boeing conçoit des pièces en impression 3D pour le F/A-18E/F Super Hornet, notamment pour fabriquer des pièces détachées conçues dans les années 1980⁵³. Le F-18 compte ainsi plus de 100 pièces fabriquées en impression 3D⁵⁴. Récemment, c'est dans l'US Navy que ce type de processus a été utilisé pour fabriquer des pièces de rechange pour les cartes de circuits

51. T. Johnston, T. Smith et J. Irwin, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat*, *op. cit.*

52. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (2/2) », *art. cit.*

53. N. Brown, M. Malenic et W. Huw, « Make and mend: the revolutionary promise of 3-D printing », *Jane's International Defence Review*, octobre 2014, p. 62.

54. J. Bauer et P. Malone, « Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing », *art. cit.*

obsolètes des missiles Tomahawk⁵⁵. L'armée de l'air israélienne utilise l'impression 3D pour réparer des pièces de F-16 datant des années 1980. Dans l'armée britannique des commutateurs radio du cockpit du Panavia Tornado sont produits en impression 3D⁵⁶.

En s'inspirant de ce qui se fait à l'étranger, l'impression 3D pourrait être utilisée sur les matériels français les plus anciens comme par exemple les C-135 (plus de 50 ans d'âge moyen), pour lesquels les industriels ne produisent plus certaines pièces de l'appareil et où chaque changement de pièces implique une coûteuse fabrication sur mesure⁵⁷. Les cas des avions C-160, des C-130 ou encore des hélicoptères Gazelle pourraient aussi être soulignés. Dans le naval certaines pièces très spécifiques des moteurs des navires les plus anciens pourraient être intéressantes à produire en impression 3D. La démarche peut aussi être envisagée dans le cas de pièces de petites séries, pour lesquelles les machines-outils existent chez l'industriel mais qui ne sont pas produites en continu (par exemple certaines pièces du moteur du Mirage 2000 chez Safran).

Rapidité et flexibilité dans la production

Les processus d'impression 3D offrent a priori une plus grande rapidité de fabrication en comparaison avec les processus traditionnels. Les gains de temps sur les prototypes en métal produits en impression 3D sont estimés entre 40 et 80 % par rapport aux processus industriels traditionnels⁵⁸. Par exemple, avec

55. <http://www.marinecorpstimes.com/news/your-marine-corps/2016/04/30/here-s-how-marines-are-using-3-d-printing-to-make-their-own-parts/>.

56. S. Trimble, « Analysis: what is the future for 3D printing in aerospace? », *Flight International*, 2014, n° 966.

57. J.-C. Larssonneur, *Rapport n° 277 au nom de la commission de la défense nationale et des forces armées sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. VII, *Défense équipement des forces – dissuasion*, Assemblée nationale, 2017.

58. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.* ; T. Johnston, T. Smith et J. Irwin, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat*, *op. cit.*

une technologie « traditionnelle » comme la fonderie, il faut en moyenne entre 6 et 12 semaines pour développer et fabriquer un moule et obtenir une première pièce, alors qu'en fabrication additive ce temps varie de 48 heures à 2 semaines⁵⁹.

Dans une logique commerçante, cela permet une réduction du délai de mise sur le marché (*time-to-market*). N. Guo et M. C. Leu⁶⁰ soulignent l'importance de ces gains de temps dans la conception de moteurs pour les véhicules de sport mécaniques, un domaine où la réactivité compte pour espérer remporter des compétitions. Ceci peut aussi s'avérer être un facteur fondamental dans le MCO où le temps a une valeur économique mais aussi stratégique⁶¹. Enfin les processus d'impression 3D offrent davantage de flexibilité et de gain de temps dans la mesure où une même machine peut produire différents types de biens, avec un temps de reconfiguration plus court que les machines-outils traditionnelles⁶².

Des exemples issus de l'aéronautique civile permettent d'illustrer cet argument. Sur l'A350 XWB, un support de la caméra de queue en impression 3D est aujourd'hui constitué d'une pièce unique produite en 19 heures par l'entreprise Sogeti High Tech, contre un assemblage de 30 composants auparavant produits en 70 jours⁶³. Chez Airbus, la réalisation de *brackets*⁶⁴ métalliques imprimés en 3D pour les A350 (déjà utilisée pour les appareils d'essais) va être employée pour les appareils de série afin de pallier les ruptures éventuelles d'approvisionnement⁶⁵.

59. A. Angrand, « Fabrication additive. Les commandes de vol maintenant en imprimé 3D », *art. cit.*

60. N. Guo et M. C. Leu, « Additive manufacturing: technology, applications and research needs », *art. cit.*

61. J. Droff, *Le facteur spatial en économie de la défense : application au maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense*, *op. cit.*

62. P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, *op. cit.*

63. J. Guilhem, « Structures complexes. Additif métal pour l'A350 XWB », *art. cit.*

64. Crochets de fixation métalliques employés par centaines sur des appareils de la taille d'un A350.

65. Source : <https://www.usine-digitale.fr/editorial/pas-a-pas-airbus-deploie-son-incroyable-usine-du-futur.N334092>.

La réactivité du MCO pourrait donc être augmentée grâce aux processus d'impression 3D. Chez les Marines américains, un ventilateur de turbine d'un char M1 Abrams coûte plus de 1 400 dollars dans un processus d'acquisition et de fabrication traditionnel, avec un délai de 18 mois de livraison, contre seulement 300 dollars et 7 jours pour une pièce fabriquée par impression 3D⁶⁶. Les processus d'impression 3D permettent aussi d'éviter de commander des kits (souvent onéreux) lorsqu'un élément tombe en panne, comme dans le cas des interphones des hélicoptères des Marines américains⁶⁷. Sur la plupart des hélicoptères de transport il existe des interphones actionnés par un bouton en plastique qui, malmené en opération, tend à casser relativement souvent. Le système d'approvisionnement traditionnel du Pentagone n'autorise pas le remplacement du seul bouton mais oblige à changer l'interphone avec sa façade complète, sachant que le système en entier coûte 11 000 dollars alors que le bouton d'interphone peut être imprimé pour 2 cents.

Ces deux exemples peuvent sembler anecdotiques à première vue, mais ils s'inscrivent dans un mouvement d'équipement global des forces par les Marines qui ont de plus en plus recours à cette technologie de l'impression 3D. Ainsi, en 2018, on recensait 69 imprimantes 3D réparties dans les principales branches des US Marines (maintenance, infanterie et aéronaves).

Enfin, soulignons que cette situation n'est pas propre aux Marines. Par exemple, au sein de l'US Air Force certaines pièces mettent près d'un an et demi avec des processus traditionnels⁶⁸. Au sein de l'US Army, elle aussi confrontée aux mêmes problèmes, l'impression 3D progresse également via le dispositif expérimental *Rapid Fabrication via Additive Manufacturing on the Battlefield* (RFAB) qui, depuis la fin de l'année 2017, produit des pièces détachées pour les blindés sur les théâtres d'opération.

66. <https://breakingdefense.com/2018/03/marines-love-affair-with-3d-printing-small-is-cheap-beautiful/>.

67. <https://breakingdefense.com/2018/03/marines-love-affair-with-3d-printing-small-is-cheap-beautiful/>.

68. <https://www.defenseone.com/business/2018/05/us-air-force-waiting-year-parts-it-could-3d-print/148565/>.

Économie de matériaux

Par rapport aux processus de production traditionnels, l'impression 3D, en fonctionnant par addition progressive de matière, va permettre d'optimiser la quantité de matières premières utilisées⁶⁹. Le processus permet notamment de réduire les pertes de matière liées à l'usinage des pièces⁷⁰, avec des économies qui peuvent être conséquentes. Pour la fabrication industrielle « traditionnelle » de certaines pièces à partir de blocs d'aluminium, les pertes s'élèvent souvent à plus de 50 %⁷¹ et dépassent parfois les 80 %⁷². N. Guo et M. C. Leu⁷³ soulignent le cas d'une production de pièces mécaniques automobiles en impression 3D (supports de suspension et arbres d'entraînement) permettant d'économiser jusqu'à 90 % de matériaux par rapport à un processus traditionnel. La fabrication pour Airbus de charnières pour l'A320 en impression 3D a permis un gain de matière de 75 % par rapport à un procédé traditionnel⁷⁴.

Outre la dimension environnementale, cette technologie permet des économies sur les volumes en matières premières et par conséquent sur l'achat, le stockage et le recyclage de ces dernières. Pour l'impression 3D utilisant des métaux spécifiques comme l'Inox, le titane, l'Inconel ou le nickel qui sont très coûteux, les espérances de gain sur la matière première peuvent potentiellement être importantes⁷⁵. De plus, l'automatisation (complète ou partielle) des processus de production en

69. S. L. N. Ford, « Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness », *Journal of International Commerce and Economics*, 2014.

70. O. Beyca, G. Hancerliogullari et I. Yazici, « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13), *art. cit.*

71. P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, *op. cit.*, p. 30.

72. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

73. N. Guo et M. C. Leu, « Additive manufacturing: technology, applications and research needs », *art. cit.*, p. 229.

74. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, *op. cit.*

75. J. Guilhem, « Additif titane. Oerlikon et Boeing veulent standardiser », *Air & Cosmos*, n° 2585, 9 mars 2018, p. 18 ; J. Guilhem, « Tendances. Festival de procédés en additif métallique », *art. cit.*

impression 3D limite les pertes en matériaux et les gaspillages liés aux erreurs humaines⁷⁶.

« Innovation RETEX »

En mettant à la disposition des usagers des possibilités de fabrication de pièces détachées, l'impression 3D pourrait aussi faciliter les retours sur expérience (RETEX) sur des équipements en service et les innovations incrémentales à partir des systèmes existants (nouvelles pièces plus adaptées que les pièces d'origine aux usages du moment, nouveaux blindages sur des zones exposées mais non anticipées en usine, etc.). Certains vont même jusqu'à imaginer la création de systèmes entiers complètement adaptés au terrain et à ses spécificités⁷⁷. Cette possibilité rejoint celle qui permet de réaliser des produits hautement différenciés grâce à l'impression 3D, donc de générer plus de valeur pour le client final (customisation de masse)⁷⁸. En se focalisant davantage sur les applications d'un produit plutôt que sur la faisabilité, l'impression 3D permet d'ouvrir un « champ des possibles » et d'une certaine manière de se départir d'un certain nombre de contraintes techniques et industrielles⁷⁹.

Les processus d'impression 3D pourraient notamment faciliter l'insertion de l'utilisateur dans le processus d'innovation⁸⁰, une

76. V. Petrovic *et al.*, « Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies », *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 4, 2011, p. 1061-1079.

77. Notamment en ce qui concerne les drones de petites dimensions, pour lesquels les processus d'impression 3D s'avèrent très intéressants du fait de leur capacité à produire précisément de très petits éléments.

78. H. Wong et D. Evers, « Enhancing responsiveness for mass customization strategies through the use of rapid manufacturing technologies » dans T. C. Edwin Cheng et Tsan-Ming Choi (eds.), *Innovative quick response programs in logistics and supply chain management*, Heidelberg, Springer, 2010, p. 205-226.

79. N. Brown, M. Malenic et W. Huw, « Make and mend: the revolutionary promise of 3-D printing », *art. cit.*, p. 65.

80. F. T. Piller, C. Weller et R. Kleer, « Business Models with Additive Manufacturing - Opportunities and Challenges from the Perspective of Economics and Management » dans C. Brecher (ed.), *Advances in Production Technology*, Springer, 2015.

tendance aujourd'hui bien documentée dans la littérature en économie de l'innovation et dont la mise en œuvre concrète est de plus en plus aisée en raison de l'évolution technologique⁸¹. La mise à jour du fichier numérique en cas de modification des spécifications serait plus facile que la modification d'une ligne de fabrication. Par exemple, pour les pièces métalliques complexes (les « forgés complexes »), la fabrication additive permet de « corriger » une pièce à partir du modèle 3D modifié sans avoir à refaire un moule ou redéfinir un programme d'usinage. La capacité à procéder à une adaptation du matériel à la demande et aux besoins conjoncturels, peut également présenter un avantage opérationnel.

On peut imaginer un processus en deux temps. D'abord, un groupe d'utilisateurs d'un véhicule militaire dessine une pièce d'un véhicule (par exemple protection, blindage...) et contribue à la réalisation rapide d'un prototype grâce à ce type de procédé. Ensuite l'industriel produit la pièce à plus grande échelle. Cette façon de fonctionner a déjà été testée par les États-Unis avec les *Field Deployable Hydrolysis Systems* (FDHS), systèmes qui ont servi à traiter et à détruire les armes chimiques en Syrie en 2013⁸². Plus récemment, en France, le CEPA (Centre d'expérimentation pratique et de réception de l'aéronautique navale) a conçu en utilisant l'impression 3D un rack destiné à stocker des bouées acoustiques sur les Atlantiques 2⁸³. Le processus d'impression a ainsi permis de concevoir une pièce parfaitement adaptée aux caractéristiques de l'appareil.

81. E. von Hippel, S. Ogawa et J. P. J. De Jong, « The Age of the Consumer-Innovator », *MIT Sloan Management Review*, vol. 53, n° 1, 2011, p. 31.

82. N. Brown, M. Malenic et W. Huw, « Make and mend: the revolutionary promise of 3-D printing », *art. cit.*, p. 61.

83. E. Huberdeau, « CEPA. 100 ans d'expertise aéromaritime », *Air & Cosmos*, n° 2518, 14 octobre 2016, p. 17-19.

3. LIMITES ET FREINS À L'ADOPTION DES PROCESSUS D'IMPRESSION 3D DANS LE MCO

Si les processus d'impression 3D comportent de nombreux avantages dans les processus de production et dans le MCO, des limites ou freins à leur adoption subsistent encore.

Les limites économiques

En premier lieu le coût des systèmes d'impression 3D. Il convient de parler de « systèmes », car l'impression 3D ne se limite pas aux seules machines de fabrication, elle inclut aussi tout leur environnement en amont (les matériaux, les technologies, les recherches, etc.) et en aval (la production de pièces, les services, les formations)⁸⁴. Sans aller aussi loin, de façon schématique, considérons que le processus nécessite de combiner une imprimante 3D avec des matières premières (par exemple les poudres) et des techniciens et/ou ingénieurs. Le coût combiné de ces trois éléments peut jouer en défaveur de l'adoption de la technologie.

En effet, les imprimantes 3D – notamment les imprimantes industrielles – restent relativement onéreuses aujourd'hui, de même que les matières premières qui les alimentent⁸⁵. De façon générale, l'utilisation de matériaux encore « non standards » – par rapport à des processus industriels conventionnels – entraîne un coût supplémentaire⁸⁶. Les poudres notamment doivent être disponibles⁸⁷, et lorsqu'elles le sont, elles doivent l'être en quantité suffisante et de bonne qualité (taille, forme des grains, défauts, etc.). Plus généralement se pose la question de la sécurisation des approvisionnements et la recherche d'une garantie de prix

84. J. Rosenberg, P. Morand et D. Turcq, *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^e siècle*, op. cit.

85. P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, op. cit.

86. R. Hague, S. Mansour et N. Saleh, « Material and design considerations for rapid manufacturing », art. cit.

87. L. E. J. Thomas-Seale et al., « The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry », *International Journal of Production Economics*, vol. 198, 2018, p. 104-118.

concurrentiels dans une industrie relativement jeune et en plein essor. Enfin, les pièces produites par des processus d'impression 3D nécessitent souvent des traitements post-production (par exemple un traitement thermique, un traitement de surface, un usinage conventionnel de finition, etc.) qui peuvent s'avérer coûteux et prendre du temps⁸⁸.

Si la partie mise en œuvre du processus d'impression 3D nécessite une main-d'œuvre relativement peu qualifiée, ce n'est pas le cas de l'ensemble du processus. Aussi, en dépit d'une certaine forme d'automatisation apparente, les processus d'impression 3D sont (et resteront probablement) relativement intenses en main-d'œuvre⁸⁹. Cette main-d'œuvre est plutôt d'un niveau de qualification élevé car les procédés sont relativement complexes et loin de l'image *click-and-go* que l'on peut en avoir parfois⁹⁰. Il faut notamment beaucoup de travail en amont pour préparer les fichiers d'impression⁹¹, du personnel qualifié pour réaliser l'entretien des imprimantes 3D mais également du personnel qualifié pour l'ensemble des tâches post-impression qui sont parfois des tâches de précision (par exemple usinage, ébavurage, lissage, etc.). Par ailleurs, les entreprises sont confrontées à une rareté relative des personnels compétents sur ces domaines techniques. Conscient de ces problématiques de main-d'œuvre, le groupe Safran a par exemple créé un centre d'apprentissage formant aux techniques d'impression 3D à Bondoufle près d'Évry dans l'Essonne⁹².

Néanmoins, l'argument selon lequel les coûts de mise en œuvre de ces systèmes jouent en défaveur de l'adoption des processus d'impression 3D est à nuancer.

88. M. Baumers et al., « The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push », art. cit.

89. S. H. Khajavi, J. Partanen et J. Holmström, « Additive manufacturing in the spare parts supply chain », *Computers in Industry*, vol. 65, n°1, 2014, p. 50-63.

90. P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, op. cit.

91. En revanche, une fois que le travail a été réalisé, il est répliquable à coût marginal nul.

92. J. Boquet, « Ressources humaines. L'impact de la digitalisation chez Safran », *Air & Cosmos*, n° 2550, juin 2017, p. 28.

D'abord parce qu'à périmètre comparable, les systèmes d'impression 3D sont généralement moins coûteux que l'achat de forges ou de machines-outils qui servent à façonner les pièces dans une approche industrielle classique⁹³. En particulier, ces processus permettent de réduire un certain nombre d'étapes par rapport aux processus traditionnels (par exemple, dans les processus métalliques, la fabrication du brut, le stockage lors des étapes intermédiaires, l'ébauche, la finition, l'assemblage dans le cas de pièces composées de plusieurs éléments, etc.). Ainsi, l'exemple d'impression 3D WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) montre qu'il est possible de réduire les coûts de production jusqu'à 60 % par rapport aux façonnages conventionnels⁹⁴.

Ensuite, parce que les estimations actuelles ne tiennent pas compte des rendements croissants d'adoption et des économies d'échelle à venir sur ces systèmes d'impression 3D, dont le prix ne cesse de baisser depuis la fin des années 1980 (cf. figure 20).

Tout dépendra donc des économies d'échelle et des rendements croissants liés à l'adoption des machines d'impression (ainsi que leurs *inputs*). Concernant la main-d'œuvre, l'automatisation complète ou partielle vient certes limiter le coût de main-d'œuvre mais elle demeure peu envisageable dans le cas du MCO⁹⁵.

Nous l'avons vu précédemment, dans une logique de production personnalisée à la demande et sur le lieu d'emploi, l'utilisation de moyens de production davantage distribués spatialement pourrait réduire les frais d'entreposage (par exemple suppression des gros entrepôts). En revanche, la contrepartie par rapport à un système centralisé est la multiplication des sites de production. Le caractère rentable ou non des processus d'impression 3D dépend donc, en partie, du coût unitaire des machines d'impression 3D.

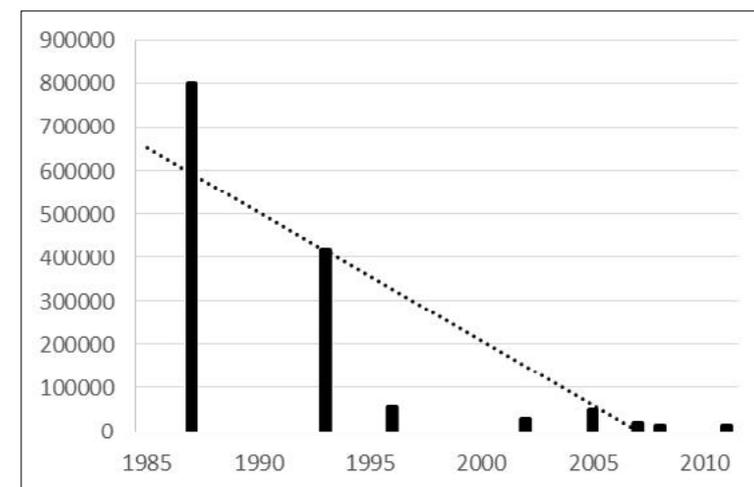
93. E. Lundquist, « Adaptive manufacturing and 3D printing. The art of the previously not possible », *art. cit.*

94. J. Guilhem, « Production. Additif métal pour structures massives », *Air & Cosmos*, n° 2591, 20 avril 2018, p. 31.

95. La question de l'automatisation des tâches de MCO est développée davantage dans la cinquième partie de cette étude.

Figure 20

Évolution du prix des imprimantes 3D industrielles (1985-2011)



Source : Accenture Analysis, <http://www.miningmagazine.com/future-of-mining/future-of-mining-sustainability/3d-printing-reshaping-the-mining-landscape/>

Une des limites les plus fortes du modèle économique de l'impression 3D est que ces processus ne sont généralement pas adaptés pour des volumes de production importants⁹⁶. La figure 21 compare, de façon théorique, le coût unitaire des processus traditionnels avec celui des processus d'impression 3D.

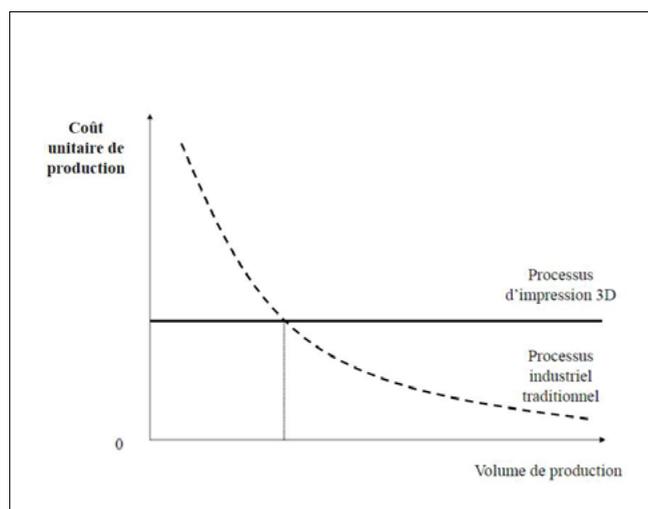
Avec les processus traditionnels, les machines sont amorties sur un volume de production plus important et certains coûts (main-d'œuvre, matières premières notamment) varient moins que proportionnellement avec le volume de production. En conséquence, les coûts unitaires tendent à diminuer avec

96. O. Beyca, G. Hancerliogullari et I. Yazici, « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13), *art. cit.* ; M. Ruffo et R. Hague, « Cost estimation for rapid manufacturing simultaneous production of mixed components using laser sintering », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, n° 11, 2007, p. 1585-1591 ; P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, *op. cit.*

les quantités produites (économies d'échelle). En revanche, les processus d'impression 3D possèdent certaines caractéristiques industrielles comme l'absence d'outillages, de moules ou de processus industriels intermédiaires qui font que les économies d'échelle ne peuvent pas faire pleinement effet comme dans les processus traditionnels⁹⁷. De plus, la décentralisation géographique des processus de production au plus près des lieux de demande viendrait également jouer comme un frein aux économies d'échelle⁹⁸. Cette logique fait que le coût unitaire ne varie plus – ou plus exactement varie moins fortement – en fonction des volumes par rapport aux processus conventionnels.

Figure 21

Comparaison des coûts unitaires de production en impression 3D et en production traditionnelle



Source : auteurs

97. M. Baumers *et al.*, « The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push », *art. cit.*

98. R. A. D'Aveni, « 3-D printing will change the world », *Harvard Business Review*, vol. 91, n° 3, 2013, p. 34 ; I. J. Petrick et T. W. Simpson, « 3D printing disrupts manufacturing – How economies of One create New rules of competition », *Research-Technology Management*, vol. 56, n° 6, 2014, p. 12-16.

Néanmoins, cette représentation que l'on retrouve couramment à propos des processus d'impression 3D est fortement simplifiée.

- D'abord parce que les économies d'échelle, même si elles seraient plus limitées qu'avec les processus de production conventionnels, existent aussi avec l'impression 3D⁹⁹. Elles sont en effet liées à certains facteurs de production indivisibles (imprimantes, logiciels ou main-d'œuvre) ou encore aux achats en masse de matériaux (poudres par exemple).
- Ensuite et surtout parce que l'impact des économies de gamme permises par l'emploi d'une même machine peut être bien plus important en termes de réduction du coût unitaire. Nous l'avons vu, les processus d'impression 3D sont flexibles et permettent de fabriquer des typologies de pièces différentes tout en gardant des coûts de changement de série réduits (*complexity for free*). L'impression 3D, en autorisant plus de variétés avec la même machine, implique une production plus diversifiée par machine et donc une réduction des coûts unitaires.

La littérature semble montrer que, lorsque les volumes de production ne sont pas trop importants, les processus d'impression 3D peuvent être compétitifs par rapport aux processus de production conventionnels¹⁰⁰. Par ailleurs, le coût de la technologie se réduit au fur et à mesure de la multiplication des imprimantes et de l'amélioration de leurs performances. Il est alors fort probable que de plus en plus d'entreprises envisagent l'impression 3D pour des productions à plus grande échelle. Ainsi, dans une

99. M. Baumers *et al.*, « The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push », *art. cit.*

100. E. Atzeni et A. Salm, « Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, n° 9-12, 2012, p. 1147-1155. C'est d'ailleurs ce critère de faible volume, combiné avec les nouvelles propriétés et les gains de masse qui expliquent le succès de ces processus de production dans le secteur aérospatial. Ainsi, le vaisseau spatial Orion, commandé par la NASA, comptera à bord plus d'une centaine de pièces réalisées en fabrication additive et produites par Lockheed Martin (J. Guilhem, « La fabrication additive gagne l'espace lointain », *Air & Cosmos*, n° 2597, juin 2018, p. 33).

étude réalisée par PWC en 2015 et portant sur 120 entreprises industrielles américaines, plus de la moitié estiment que les processus d'impression 3D seront utilisés pour des productions à grande échelle¹⁰¹.

Contraintes et freins d'ordre technique

Ces procédés sont récents et le recul technologique reste encore insuffisant¹⁰². Aujourd'hui, la plupart des procédés existants nécessitent des conditions de fonctionnement contraignantes (par exemple chambre sous vide, atmosphère contrôlée, stabilisation de la plate-forme sur laquelle est installée la machine) et des servitudes relativement contraignantes (par exemple concernant l'approvisionnement en matériaux, des hottes d'aspiration car les procédés dégagent des vapeurs toxiques, une alimentation en énergie sécurisée et continue pour ne pas interrompre le procédé).

Cela n'est pas toujours compatible avec l'environnement d'un théâtre d'opération (par exemple, il peut être difficile d'obtenir des conditions optimales pour produire une pièce à la demande pour un blindé en panne au milieu du désert). De même, les mouvements des navires (roulis) limitent les possibilités de produire les pièces à bord (notamment pour les procédés par tissage). Bien entendu, cet argument ne s'applique pas au cas de la production d'éléments chez l'industriel sur un site de production en métropole. Pour ces raisons, il est fort probable que les processus d'impression 3D sur les théâtres d'opération se développent plus rapidement dans des environnements relativement protégés comme des bases projetées par exemple.

Il existe également des limites liées à la qualité des pièces produites, en particulier leur tenue mécanique¹⁰³, et à la parfaite « répétabilité » des processus ; ces derniers n'étant pas toujours complètement fiables, cela peut poser problème dans des

101. T. Johnston, T. Smith et J. Irwin, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat*, *op. cit.*

102. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (1/2) », *art. cit.*

103. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (2/2) », *art. cit.*

industries de précision comme l'aéronautique ou la fabrication de missiles. Cette préoccupation rejoint également les aspects relatifs à la certification des pièces, développés plus loin.

La question de la dimension des pièces se pose également¹⁰⁴. Les processus d'impression 3D sont aujourd'hui plutôt utilisés pour des pièces de petite taille, ce qui les rend moins intéressants dans des industries où les pièces à forte valeur ajoutée sont, par nature, plutôt de grande taille¹⁰⁵, comme dans le secteur naval. En revanche, l'argument n'est pas valable pour des industries où les pièces à forte valeur ajoutée sont de petite taille comme par exemple l'aéronautique ou le spatial.

Ensuite, les délais. Bien qu'ils soient globalement plus courts que les processus de production conventionnels, les processus d'impression 3D mesurés en « temps machine » restent encore relativement longs, ce qui peut parfois limiter leur application, en particulier dans une logique de production « à la demande ». Mais il faudrait plutôt comparer une production en impression 3D avec un approvisionnement par stock existant, puisque nous avons vu précédemment que l'impression 3D s'avère moins longue en temps total de production qu'un processus de production conventionnel.

L'impression 3D s'inscrit dans un écosystème productif et l'adoption de ces processus pose aussi la question des logiciels qui permettent d'utiliser les imprimantes. Historiquement, ces processus ont en effet été limités par un nombre relativement restreint de logiciels permettant aux opérateurs d'utiliser pleinement le potentiel des imprimantes, mais aussi de la compatibilité des logiciels avec les imprimantes¹⁰⁶. Notons toutefois que ceci tend à devenir de moins en moins contraignant en raison de l'adoption croissante des processus et du développement de services annexes (dont les logiciels et leur maintenance).

104. *Ibid.*

105. Notons d'ailleurs qu'un des enjeux majeurs du Plan d'investissement d'avenir (PIA) dans le cadre de l'alliance pour l'industrie du futur est d'ailleurs de faire baisser le coût de production des pièces de grande taille (*ibid.*).

106. L. E. Thomas-Seale *et al.*, « The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry », *art. cit.* ; P. Von Tell, *The rise of industrial 3D-Printing*, *op. cit.*

L'état de la technologie aujourd'hui fait qu'il est souvent nécessaire de recourir à des traitements post-processus d'impression (usinage, polissage, nettoyage, etc.), ce qui engendre des coûts supplémentaires et de nouveaux délais. En revanche, avec le progrès croissant dans les processus de fabrication additive, le travail post-processus va probablement devenir de moins en moins nécessaire.

Contraintes et limites d'ordre réglementaire

- *La certification des pièces*

Le cadre normatif et réglementaire est essentiel, plus particulièrement dans le domaine aéronautique, pour lequel (mais pour les autres domaines également) les questions liées à la certification des pièces produites en impression 3D sont fondamentales¹⁰⁷. En effet, pour être utilisées dans les processus de MCO, les pièces détachées produites en impression 3D doivent être certifiées selon certaines normes, définies par le concepteur de la pièce notamment. Dans l'aéronautique, les pièces doivent par exemple respecter des normes de sécurité et de navigabilité définies par les autorités de certification comme l'ASEA (Agence européenne de la sécurité aérienne) ou la FAA (Federal Aviation Administration). Si une pièce non certifiée venait à être la cause d'un dysfonctionnement entraînant un dommage ou un accident, alors la responsabilité de l'entreprise ayant produit la pièce voire celle du fabricant de l'imprimante 3D pourrait être engagée.

La certification est généralement assez contraignante. À titre d'illustration, le processus de certification de l'A350 a duré cinq ans et représente environ 20 % du coût du programme de développement¹⁰⁸. La certification n'est pas qu'un problème lié à l'aéronautique en soi. Par exemple, du fait de l'appartenance de

107. O. Beyca, G. Hancerliogullari et I. Yazici, « Additive Manufacturing Technologies and Applications » (chap. 13), *art. cit.*

108. B. Ehrwein et L. Archambault, « Les enjeux de l'impression 3D et l'évolution vers l'usine innovante et l'impression 4D ? » (tribune libre), *art. cit.*

la France à l'OTAN, les matériels militaires doivent respecter des normes STANAG (*Standardization Agreement*), par exemple pour le blindage des matériels terrestres.

Il y a donc un travail de normalisation des pièces issues des processus d'impression 3D à réaliser en amont, afin qu'elles soient certifiées par les constructeurs et les différents organismes de certification. Ce travail est d'autant plus important que les pièces concourent à des fonctions critiques. Ainsi, si le recours à l'impression 3D est fréquent pour une centaine de pièces obsolètes dans le cas du F-18, ces dernières ne sont pas considérées comme des pièces « critiques » du point de vue de la navigabilité¹⁰⁹. Il faut noter que ce travail de certification est d'autant plus difficile à réaliser que l'impression 3D est elle-même une technologie qui progresse régulièrement, et donc toujours en partie immature et non stabilisée¹¹⁰.

Les enjeux liés à la certification des pièces sont très importants et les entreprises cherchent à accélérer le processus de certification pour respecter les normes imposées par les autorités aéronautiques. Début 2018, l'avionneur Boeing, leader dans la recherche et la mise en œuvre des fabrications additives dans l'aéronautique, a conclu un accord avec le Suisse Oerlikon pour développer et standardiser les matériaux, machines et procédures pour la fabrication de pièces en titane en impression 3D avec le procédé SLM (laser sur lit de poudre)¹¹¹. L'enjeu du partenariat réside dans la normalisation de toutes les opérations de fabrication des pièces, de la gestion des poudres jusqu'au produit fini. Safran travaille depuis maintenant une dizaine d'années sur le sujet et a déjà réussi à faire certifier des pièces (notamment sur le moteur d'hélicoptère Arrano qui équipera le H160, ou encore sur les moteurs M88 ou TP400 qui équipent respectivement le Rafale et l'A400M).

109. J. Bauer et P. Malone, « Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing », *art. cit.*

110. S. Joshi et A. Sheikh, « 3D printing in aerospace and its long-term sustainability », *art. cit.*

111. J. Guilhem, « Additif titane. Oerlikon et Boeing veulent standardiser », *art. cit.*

Ces aspects de certification ne sont pas uniquement propres à l'industrie de défense, même s'ils revêtent une importance particulière en raison de la nature des produits fabriqués et des milieux dans lesquels évoluent ensuite ces produits. Sur des marchés avec des applications civiles, des organismes spécifiquement dédiés à ces questions ont été créés. L'AFPR (Association française du prototypage rapide) a ainsi créé deux commissions, celle de la « fabrication directe métal » et celle de la « fabrication directe plastique », pour qualifier et normaliser les techniques de fabrication additive¹¹². ASTM International, aux États-Unis, a également lancé un projet de normalisation de la fabrication additive.

- *La propriété intellectuelle (PI)*

Le développement des processus d'impression 3D présente également des enjeux importants en termes de droits de propriété intellectuelle¹¹³. Copier un produit physique et convertir cette copie en données de conception partageables pourrait devenir aussi facile que copier un document imprimé ou partager des fichiers informatiques ordinaires – des ruptures technologiques qui ont eu des conséquences majeures dans l'industrie du disque ou dans l'édition par exemple¹¹⁴.

Les droits de propriété intellectuelle sont attachés au design d'une pièce et ils appartiennent initialement au producteur de la pièce. En fonction du type de contrat passé entre un fournisseur et un maître d'œuvre, ces droits peuvent ensuite être éventuellement transférés du fournisseur au maître d'œuvre.

Ceci suppose qu'en théorie, dans le strict respect du droit de la propriété intellectuelle, la plupart des pièces devraient être

112. <https://www.heinrich-consultant.fr/conseil/impression-3d-enjeux/#freins>.

113. T. Kurfess et W. J. Cass, « Rethinking Additive Manufacturing and Intellectual Property Protection », *Research-Technology Management*, vol. 57, n° 5, 2014, p. 35-42 ; K. B. Wilbanks, « The Challenges of 3D Printing to the Repair-Reconstruction Doctrine in Patent Law », *George Mason Law Review*, vol. 20, n° 4, 2013, p. 1147-1181.

114. F. Piller, C. Weller et R. Kleer, « Business Models with Additive Manufacturing – Opportunities and Challenges from the Perspective of Economics and Management », *art. cit.* ; K. B. Wilbanks, « The Challenges of 3D Printing to the Repair-Reconstruction Doctrine in Patent Law », *art. cit.*

produites en impression 3D par les fournisseurs d'origine, i.e. ceux qui ont les droits de propriété. A priori, un industriel qui produit une plateforme (navire, avion, blindé) et qui décide de proposer des services de maintenance n'a pas forcément l'ensemble des droits de propriété intellectuelle des pièces et équipements composant la plateforme. Il n'est donc pas autorisé, sur le plan légal, à copier les pièces de l'industriel en question. Aujourd'hui, la jurisprudence n'est pas totalement arrêtée sur ces questions et les industriels plate-formistes faisant aussi du MCO courent le risque d'être accusés de contrefaçon. Le droit de la propriété intellectuelle en vigueur assure-t-il la protection des producteurs vis-à-vis du risque de contrefaçon ou faut-il créer un droit *sui generis* pour les impressions 3D ?

Par ailleurs, la question de la responsabilité est également cruciale. En effet, en cas d'accident, si une pièce produite en impression 3D était jugée défectueuse, qui serait responsable ? La personne (physique ou morale) ayant conçu la pièce (design) ? Celle l'ayant numérisée (fichier utilisé pour imprimer) ou celle qui imprime *in fine* la pièce (fournisseur) ?

Ces questions juridiques importantes devront être étudiées dans les années à venir car elles limitent le développement des applications des technologies d'impression 3D. L'adoption des processus d'impression 3D impliquera probablement des montages contractuels spécifiques, la définition de normes de qualité, voire de technologies de protection spécifiques. Par exemple, la société Bayer Technology propose une technologie d'identification, ProteXXion, qui attribue aux objets une empreinte digitale unique¹¹⁵.

- *Les aspects environnementaux et la santé au travail*

L'aspect réglementaire ne concerne pas uniquement la certification des pièces et les droits de propriété intellectuelle. Il comporte aussi des enjeux liés à l'environnement et à la santé au travail des opérateurs. En effet, l'impression 3D avec les

115. B. Ehrwein et L. Archambault, « Les enjeux de l'impression 3D et l'évolution vers l'usine innovante et l'impression 4D ? » (tribune libre), *art. cit.*

applications qu'on envisage aujourd'hui demeure une technologie récente, et ses effets sur l'environnement (consommation d'énergie, gestion des déchets, santé des opérateurs) ne sont pas encore complètement connus et encore moins maîtrisés¹¹⁶, notamment en ce qui concerne le recyclage des poudres et les risques liés à l'exposition des opérateurs aux particules fines. Ces incertitudes incitent à la prudence dans l'adoption de ces technologies, dans un contexte où les normes environnementales et les exigences en termes de santé au travail (prévention des risques notamment) sont de plus en plus contraignantes.

Contraintes et limites en termes de sécurité

Les processus d'impression 3D utilisent les technologies du numériques, ils s'appuient notamment sur la réalisation, la transmission et le stockage de fichiers qui peuvent être interceptés, décryptés et copiés puis réutilisés. Les questions de sécurisation des données sont donc particulièrement importantes¹¹⁷. L'avionneur Boeing a ainsi développé un partenariat avec l'entreprise israélienne Assemrix pour sécuriser la gestion et le partage des données d'impression 3D sur le cloud¹¹⁸.

Contraintes et limites socioculturelles

Il est enfin possible d'identifier des freins culturels et intellectuels à l'adoption des processus d'impression 3D. L'impression 3D constitue un véritable changement de paradigme dans l'industrie¹¹⁹. Il s'agit en effet de repenser complètement des modes

116. D Rejeski, F. Zhao et Y. Huang, « Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 19, 2018, p. 21-28.

117. T. Johnston, T. Smith et J. Irwin, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat, op. cit.*

118. <https://www.defensenews.com/industry/2018/05/15/boeing-will-soon-be-able-to-store-3-d-printing-data-in-the-cloud-with-help-from-an-israeli-partner/>.

119. L. E. Thomas-Seale *et al.*, « The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry », *art. cit.*

de production fondés sur des années d'expérience et d'expertise et pour lesquels les ingénieurs, techniciens et ouvriers raisonnent par soustraction de matière alors qu'il faut leur apprendre à penser par addition de matière. Dans l'industrie aéronautique notamment, ces aspects culturels et intellectuels peuvent jouer un rôle important¹²⁰.

4. SYNTHÈSE DES INTÉRÊTS ET LIMITES/FREINS DE L'IMPRESSION 3D DANS LE MCO

L'impression 3D va (certainement) entraîner une évolution des métiers de l'industrie, donc des compétences et des formations requises. La soudure est un exemple intéressant : la pratique pourra être automatisée, ou aura peut-être complètement disparu si les processus d'impression 3D se généralisent. Les métiers concernant la fabrication de pièces vont tendre vers des métiers de conception et de programmation informatiques, et de contrôle. L'opérateur ne travaillera plus directement sur la pièce produite, mais en amont sur sa conception, en aval sur le contrôle de sa qualité, voire sur la machine qui conçoit la pièce, et non plus directement sur le processus de fabrication en soi (qui est réalisé par la machine), au contraire des processus de fabrication plus traditionnels qui, s'ils utilisent largement machines et robots, comportent de façon plus systématique des opérations d'assemblage. Toutes les parties prenantes (les syndicats notamment) auront un rôle à jouer dans l'acceptabilité sociale de ce type d'évolution technologique.

La DGA s'intéresse aux technologies d'impression 3D appliquées au MCO, des études ont été lancées – ou déjà réalisées – sur le sujet.

120. A. Angrand, « Fabrication additive. Les commandes de vol maintenant en imprimé 3D », *art. cit.*

Tableau 7

Études lancées par la DGA concernant l'impression 3D

	Milieu	Descriptif du projet
1	Naval	Expérimentation maintenance prédictive (avec implémentation de technologies d'impression 3D).
2	Aéronautique	Réparation des pièces du moteur du Rafale. Partenariat avec Beam (PME) sur la Réparation additive. Étude de la faisabilité de la réparation additive pour certaines pièces du moteur M88.
3	Tous milieux	ETO. Concerne les applications de l'impression 3D. Le but de l'étude est de fournir un état de l'art des différentes technologies d'impression 3D à l'horizon 2025.

Source : DGA

Ainsi, concernant les technologies issues de l'industrie 4.0 avec application dans le MCO des matériels militaires, sur dix-huit études pour la période 2015-2021, trois traitent de l'impression 3D. Sur ces trois études, une est particulièrement consacrée au secteur naval, une autre à l'aéronautique et une troisième, plus générale, est transverse aux trois milieux.

La première fait partie d'une étude plus générale concernant l'application de la maintenance prédictive au secteur naval mais inclut également un volet impression 3D. La deuxième concerne le domaine aéronautique et se focalise sur la recherche de solutions en réparation additive pour le moteur M88 du Rafale. Enfin, la troisième (achevée fin 2016) a dressé un état de l'art des technologies d'impression 3D à l'horizon 2025. On notera que le milieu terrestre ne fait pas l'objet d'une étude spécifique concernant l'impression 3D.

Très récemment, la DGA a lancé un appel à projet PEPS (projet exploratoire premier soutien) avec le CNRS intitulé « Technologies clés pour la réalisation ou la réparation de pièces structurales par fabrication additive¹²¹ ».

121. M. C. Sainte-Catherine, « Impression 3D (2/2) », *art. cit.*

Tableau 8

Synthèse des intérêts et limites de l'impression 3D dans le MCO

Avantages/intérêts	Limites/freins
<ul style="list-style-type: none"> • Meilleur contrôle physique et chimique des pièces détachées. Flexibilité technique dans la conception des pièces détachées. • Réduction des volumes de matières premières. Économies sur les matières premières (achat, stockage et recyclage). • Réduction des coûts de stockage. Réduction des coûts d'inventaire. Réduction des besoins en système d'information logistique. • Production à la demande et sur les lieux d'utilisation. Réduction du coût de transport. Réduction du nombre d'intermédiaires – et de partenaires – dans la <i>supply chain</i> logistique. Potentiellement recours à moins d'externalisation. L'effet est d'autant plus fort que la contrainte spatiale est forte (lieux de demande éloignés des sites industriels de production et/ou de stockage, terrains accidentés). Exemple des hélicoptères qui opèrent souvent dans des zones éloignées, accidentées, mal desservies par des moyens de communication et de transport. • Délais de production relativement courts. Meilleure réactivité globale de la <i>supply chain</i> : réduction des temps d'immobilisation. Meilleure maîtrise du coût social opérationnel (CSO). • Chaîne logistique plus courte : moindre vulnérabilité d'ensemble du système d'approvisionnement. Donc meilleure résilience du système de production de défense (MCO et unités opérationnelles). • Susceptible de favoriser l'innovation RETEX (prototypage rapide de pièces et d'outillage). Raccourcissement de la boucle usager/producteur et donc des délais d'introduction d'innovations incrémentales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faibles économies d'échelle et faible compétitivité sur de grands volumes de production. • Coût relativement élevé des imprimantes 3D. • Conditions de fonctionnement contraignantes pour la plupart des procédés (ex. chambre sous vide, atmosphère contrôlée). • Coût des matières premières (notamment pour de petites quantités). • Problème de qualité des poudres à base des processus d'impression 3D. • Coût de la main-d'œuvre. Processus souvent automatisé mais nécessitant quand même une main-d'œuvre formée de niveau technicien. • Problème également de la sécurisation des approvisionnements en poudres nécessaires aux processus d'impression 3D. • Qualité des produits réalisés devant encore progresser pour atteindre la qualité des produits usinés (question de la certification des pièces). • Gamme encore étroite de matériel d'impression. • Répétabilité des processus (pas encore fiable). Ceci pose problème dans des industries de précision comme l'aéronautique ou les missiles. • Taille des pièces (plutôt utilisée pour des pièces de petite taille). • Technologie récente et effets sur l'environnement (consommation d'énergie, gestion des déchets, santé des opérateurs) encore non connus et maîtrisés. Le problème du recyclage des poudres se pose notamment ainsi que l'exposition aux particules fines des opérateurs.

Source : auteurs

En résumé, l'impression 3D raccourcit le nombre de maillons dans la chaîne d'offre¹²². Ces processus de production semblent bien adaptés pour les phases en amont (prototypage notamment) et en aval du cycle de vie d'un matériel (obsolescence, pièces à la demande). Dans le MCO, ces processus d'impression 3D semblent d'autant plus adaptés que les pièces sont spécifiques, avec de petits volumes de production (matériels militaires produits en petite série), anciennes (les matériels militaires ont une durée de vie très longue), complexes et avec un besoin de réactivité important (cas du MCO où le facteur temps compte). Selon la littérature récente, l'intérêt des processus actuellement disponibles semble plus discutable pour de longues séries et sur des pièces critiques sur le plan de la navigabilité (cas de l'aéronautique en particulier).

122. P. Reeves, « How the Socioeconomic Benefits of Rapid Manufacturing Can Offset Technological Limitations », Technical papers, *Society of Manufacturing Engineers TP Pub*, 2008.

IV. TECHNOLOGIES DE VIRTUALISATION (RÉALITÉ VIRTUELLE ET RÉALITÉ AUGMENTÉE) : APPLICATION AU MCO

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux techniques dites de « virtualisation¹ » et à leurs applications potentielles au MCO. Nous nous focaliserons en particulier sur la réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée (RA), technologies que nous présenterons dans un premier temps (définition, principes de fonctionnement et caractéristiques), avant de nous intéresser aux applications potentielles dans le domaine du MCO des matériels de défense, puis aux limites que l'on peut rencontrer dans l'implémentation de ces technologies dans le MCO. Une synthèse des intérêts et limites concernant l'application de ces technologies dans le MCO sera proposée en conclusion de cette partie.

1. RÉALITÉ VIRTUELLE (RV) ET RÉALITÉ AUGMENTÉE (RA)

La réalité virtuelle

Avec la réalité virtuelle (RV), l'utilisateur est immergé dans un monde créé artificiellement par ordinateur, représenté à l'échelle 1 et relativement proche de la réalité. Des images sont projetées à 360 degrés sur l'écran d'un équipement (généralement une salle spécifiquement équipée, un casque ou encore des lunettes adaptées) et une caméra repère les mouvements de l'utilisateur. Ce dernier peut évoluer et parfois interagir (généralement via un accessoire) dans cet environnement numérique. La RV cherche à simuler une situation en se rapprochant le plus possible de la réalité. C'est aujourd'hui une technologie largement utilisée et considérée comme mature depuis environ une quinzaine d'années.

1. C. Salkin *et al.*, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1), *art. cit.*

La réalité virtuelle permet d'immerger l'utilisateur dans un monde virtuel créé à partir d'images numériques (films, images, illustrations, photos, compositions numériques en 2D ou 3D). La RV s'est beaucoup développée dans le domaine de la défense, notamment à des fins de formation (par exemple les simulateurs de vol ou la mise en service et l'utilisation d'équipements militaires) ou dans l'industrie (par exemple la conception de maquettes en 3D).

Ces technologies nécessitent généralement une salle de type CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) ou cube immersif 3D ou, plus récemment, des appareils individuels de type casque de RV. Ces derniers présentent l'avantage de s'affranchir de la contrainte d'une infrastructure de type salle CAVE et ils sont de plus en plus utilisés, par exemple dans la solution de formation 3D/VR *Ship inside* de Naval Group développée en partenariat avec un studio de jeux vidéo français (la société NYX)². L'outil crée avec précision la disposition en 3D des navires pour l'entraînement et la formation des équipages et des ingénieurs. Il sera d'abord déployé sur les SNA Barracuda, puis sur les frégates FTI et FREMM.

Dans le domaine du MCO, des dispositifs de RV existent depuis longtemps, essentiellement à des fins de formation et de mise en œuvre des matériels. Par exemple, Nexter Training a développé des outils de RV pour la formation à la maintenance et l'aide au déploiement opérationnel de matériels comme le VBCI, le Caesar ou encore le Rafale (en partenariat avec Thales)³. Mais avec les technologies de réalité virtuelle, les interactions avec l'environnement réel restent très limitées, voire inexistantes.

2. <https://www.navyrecognition.com/index.php/focus-analysis/naval-technology/6273-preparing-for-the-future-naval-group-presented-its-latest-innovations.html>.

3. Voir par exemple la présentation des modules de formation mis en place par Nexter Training : <http://www.nexter-group.fr/fr/filiales/nexter-training>.

La réalité augmentée

La réalité augmentée (RA) se situe dans la continuité des technologies de RV, qui ont représenté une innovation importante en termes de simulation des environnements⁴. Les technologies de RA consistent à augmenter la perception humaine d'un environnement en y superposant, en temps réel, des données et informations⁵. Ces informations peuvent être variées et on retrouve généralement des images, des vidéos, des modèles 3D, des sons, du texte, des instructions vocales, etc.⁶. Elles sont généralement transmises à l'utilisateur par un écran, des lunettes connectées (*smart glasses*) ou un casque.

Ces informations peuvent ainsi être englobées dans la présentation de l'environnement réel, dans le but d'enrichir la perception de la réalité par un opérateur, via différents objets (écrans, lunettes, casque, etc.)⁷, celui-ci pouvant également intervenir sur l'environnement réel. La réalité mixte (RM) est quant à elle proche de la réalité augmentée et consiste à faire interagir des éléments virtuels avec des éléments réels dans un environnement virtuel. Il peut s'agir, par exemple, d'un personnage virtuel échangeant avec un opérateur sur une chaîne de montage.

R. Azuma *et al.*⁸ définissent trois propriétés fondamentales dans ces dispositifs de réalité augmentée : présenter ensemble, dans le même environnement, des objets réels et virtuels ; permettre l'interaction entre objets réels et virtuels en temps réel et

4. S. K. Ong, M. L. Yuan et A. Y. C. Nee, « Augmented reality applications in manufacturing: a survey », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n°10, 2008, p. 2707-2742.

5. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12) dans A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, *op. cit.*, p. 201-215.

6. P. Boulanger, « Application of Augmented Reality to Industrial Tele-Training », London, Ontario, Canada, 2004.

7. A. Syberfeldt *et al.*, « Support systems on the industrial shop-floors of the future - operators' perspective on augmented reality », *Procedia CIRP - 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*, vol. 44, 2016, p. 108-113.

8. « Recent Advances in Augmented Reality », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, n°6, 2001, p. 34-47.

aligner/enregistrer des objets virtuels avec des objets réels. D'un point de vue pratique, les dispositifs de RA comportent généralement quatre composants hardware de base⁹ :

- Un ordinateur qui modélise et contrôle l'ensemble du processus ;
- Un dispositif de projection des informations à l'utilisateur (par exemple une tablette, un smartphone ou un casque de RA, type casque HoloLens de Microsoft) ;
- Un dispositif de suivi du positionnement et du déplacement de l'utilisateur ;
- Un dispositif permettant d'interagir et d'ajouter du contenu (par exemple un microphone, un *touchpad*, une télécommande, une souris, etc.).

Le choix de chacun des composants du dispositif de RA dépend généralement de l'application envisagée. Ainsi, pour un travail d'assemblage sur une chaîne de production, l'usage d'un casque ou de lunettes est plus approprié qu'une tablette dans la mesure où l'opérateur a besoin d'avoir ses deux mains libres pour exécuter ses tâches.

Ces dispositifs ont un potentiel de développement dans de nombreux domaines comme l'industrie – notamment l'assemblage et la maintenance dans le domaine aérospatial – le bâtiment et l'architecture, la grande distribution, la gestion des données, la navigation, la simulation de combat, le jeu vidéo, le tourisme, la santé ou encore l'éducation¹⁰.

Dans l'industrie en particulier, le fonctionnement de ces dispositifs est en lien étroit avec la maquette numérique des

9. S. Wiedenmaier *et al.*, « Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 16, n°3, 2003, p. 497-514.

10. G. Dini et M. D. Mura, « Application of Augmented Reality Techniques in Through-life Engineering Services », *Procedia CIRP*, vol. 38, 2015, p. 14-23 ; M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.* ; D. W. F. Van Krevelen et R. Poelman, « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations », *The International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, n° 2, 2010, p. 1-20.

produits. La maquette numérique est généralement un double (ou jumeau) d'un produit. Sa conception est rendue possible grâce aux progrès réalisés dans la modélisation mais aussi dans la puissance de calcul. Parfois, le constructeur ne produit que la maquette numérique, ce qui permet de ne pas engager de frais dans la fabrication d'un démonstrateur « physique » par exemple. La maquette numérique permet de simuler fonctionnellement l'ensemble du processus de production avec la modélisation des processus industriels et des produits, et d'identifier les risques et les problèmes de qualité avant la phase de lancement de la production.

La plateforme de logiciels 3DExperience de Dassault Systèmes s'inscrit dans cette logique. Dassault Systèmes a ainsi proposé à Boeing une modélisation du processus d'assemblage d'un avion conçue entièrement sous forme numérique, dans le cadre du programme Boeing 777¹¹. Cette modélisation permet de mesurer et de contrôler les processus industriels de façon continue, afin de les optimiser. Toutes les données de conception d'un matériel peuvent également être mobilisées dans un second temps pour la maintenance.

2. INTÉRÊT DES TECHNIQUES DE VISUALISATION (RV ET RA) DANS LE MCO

Le champ d'application des techniques de virtualisation est très large et la maintenance n'en constitue qu'une partie. Dans la mesure où ces technologies semblent aujourd'hui plus développées dans la production que dans la maintenance, nous insisterons parfois sur des exemples empruntés à la production mais en cherchant systématiquement à faire un parallèle avec la maintenance.

11. Y. Cochenec, « Usine 4.0. Boeing mise sur Dassault Systèmes », *Air & Cosmos*, n° 2559, septembre 2017, p. 32.

Augmentation de la productivité et de la qualité du service

• Principes généraux

Les technologies dites de virtualisation (notamment la RA) permettent d'accroître la productivité des opérateurs ainsi que la qualité des produits ou des prestations réalisés, notamment en réduisant considérablement le risque d'erreur grâce à l'assistance numérique. Des expérimentations faites dans l'industrie montrent que les opérateurs de production qui utilisent des dispositifs en réalité augmentée enregistrent des effets d'apprentissage plus importants que les opérateurs sans dispositifs de réalité augmentée¹².

De manière générale, l'augmentation de la fonctionnalité des produits industriels s'est accompagnée d'une croissance des besoins en termes d'informations relatives à la sécurité, aux composants ou aux procédures de maintenance (ce qui est le cas des matériels de défense)¹³. Le système de documentation actuel est fondé sur des manuels, des documents imprimés, des documents sur support informatique. Lorsqu'il y a un problème (panne, défaillance, etc.), les opérateurs consultent cette documentation (papier ou informatique) ou font appel à des experts, sur place ou à distance, ce qui conduit généralement à une perte de temps, des coûts plus élevés et une satisfaction du client dégradée¹⁴. Surtout, cela conduit à une forme de découplage cognitif entre l'information issue de la documentation (ou de l'expert) que l'opérateur doit traiter et l'information venant du produit réel, sur place.

Le recours à des dispositifs de RA permet de passer d'une attention focalisée sur la documentation à une attention focalisée

12. F. Longo, E. Nicoletti et A. Padovano, « Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context », *Computers & Industrial Engineering*, 2017.

13. S. J. Henderson et S. Feiner, *Augmented reality for maintenance and repair (ARMAR)*, United States Air Force Research Lab, 2007.

14. A. Y. C. Nee *et al.*, « Augmented reality applications in design and manufacturing », *CIRP Annals*, vol. 61, n° 2, 2012, p. 657-679.

sur les tâches de maintenance proprement dites¹⁵. Les dispositifs de RA offrent en effet un lien direct entre les systèmes d'information de l'entreprise et les opérateurs pour apporter à ces derniers la bonne aide au bon moment, donc leur permettre de travailler plus rapidement en limitant les risques d'erreurs, ce qui accroît la qualité globale du produit (effet « faire juste du premier coup »). Plus précisément, les systèmes de réalité augmentée, reliés au système d'information, vont guider les gestes des opérateurs, qui peuvent visualiser l'action à mener à chaque étape du processus, repérer sans erreur l'équipement ou le composant sur lequel intervenir, ou tout simplement changer d'angle de vision pour voir une pièce en principe moins visible, etc.

La réalité augmentée va accroître la vitesse de réalisation des tâches de MCO tout en les simplifiant. Par exemple, les éléments 3D issus de la maquette numérique d'un équipement peuvent être superposés directement « sur » une surface de travail pour assister l'opérateur de maintenance, donnant ainsi des informations essentielles aux opérateurs (graphiques, chiffres, instructions), qui s'affichent directement dans leur champ de vision ou bien leur sont communiquées par voie audio pendant qu'ils réalisent les tâches de maintenance. Ceci conduit à des gains de temps et une simplification du processus de maintenance, y compris dans un environnement industriel particulièrement complexe comme un chantier naval par exemple.

La numérisation permet également une meilleure traçabilité des différentes opérations de maintenance en enregistrant systématiquement et automatiquement les gestes et opérations des opérateurs, les supports de la réalité augmentée (smartphone, tablette, lunettes...) disposant généralement de capteurs (caméra notamment) qui enregistrent ce que fait l'opérateur. Cette traçabilité concourt à une amélioration globale de la qualité du produit ou de la prestation.

Concernant le MCO, ce type de technologie permet de simuler précisément les pannes et dysfonctionnement éventuels à venir, donc de mieux planifier et organiser la maintenance, tout en en

15. S. Henderson et S. Feiner, *Augmented reality for maintenance and repair (ARMAR)*, *op. cit.*

réduisant le coût. Il permet également de tester virtuellement différentes solutions de maintenance avec un impact limité sur l'immobilisation des plateformes – puisqu'aucun matériel « réel » n'est immobilisé – et aussi un impact limité sur les coûts dans la mesure où les opérations sont simulées.

Les techniques de « virtualisation » peuvent s'appuyer sur des techniques de contrôle optique non destructif. Ces technologies sont fondées sur des dispositifs optiques (par exemple des caméras ou des scanners) qui comparent les matériels examinés avec une base de données originale. Par exemple, des scanners 3D vont vérifier la géométrie de zones critiques et le bon agencement de pièces détachées, ce qui permet d'éviter de toucher physiquement aux éléments. Dans le MCO, ces techniques permettent notamment d'éviter de percer des surfaces (métalliques par exemple) ou d'avoir à démonter des éléments, autant d'opérations qui engendrent des coûts ou des délais supplémentaires.

- *Illustrations*

Des exemples concrets d'application de ces technologies existent dans le soutien et dans le domaine de la production, où ces dispositifs de RV et de RA semblent aujourd'hui plus développés.

Aéronautique

Chez Safran à Villaroche (Seine-et-Marne) où sont assemblés les moteurs LEAP, les opérateurs bénéficient d'un système de projection numérique pour le positionnement des équipements sur la chaîne de montage¹⁶. Grâce à la réalité augmentée, l'opérateur peut voir sur sa tablette le moteur en cours de fabrication ou de maintenance, avec les pièces qui restent à positionner et à ajuster¹⁷. Chez Safran Electrical & Power, un système d'aide et de contrôle à l'enfichage des câbles dans les connecteurs est couplé à un traitement automatique de l'image pour repérer les

16. <http://usinedufutur.safran-group.com/lignes-de-fabrication/>.

17. Source : Denis Cosnard, « Dans l'usine du futur à Saclay, robots et exosquelettes à tous les étages », *Le Monde de l'Économie*, 28 septembre 2016.

anomalies. Une autre application, développée chez Safran Nacelle, indique à l'opérateur les zones non conformes après un contrôle grâce à une thermographie infrarouge. Ce type de technologie permet d'envisager des gains considérables sur les délais et les coûts de production. Ainsi, le recours à ce type de dispositifs de virtualisation sur le site de Safran Nacelles au Havre (programme A330 Neo) a permis de développer les nouvelles nacelles en seulement 42 mois (contre 60 mois pour les nacelles A320 Neo)¹⁸.

Autre exemple, chez Airbus, sur le site de Saint-Nazaire, le contrôle des 15 000 supports d'un A380 exigeait plus de 3 semaines de travail pour une équipe de 6 personnes. Avec un processus en réalité augmentée qui s'appuie sur une maquette numérique, la même opération peut désormais être conduite en 2 jours avec 2 personnes¹⁹, soit un temps d'inspection divisé par 10 avec 3 fois moins de personnel. Toujours chez Airbus, le dispositif de réalité augmentée SART, conçu par l'entreprise Immersion²⁰, a été déployé. Il prend la forme d'une tablette numérique munie d'une caméra orientable que l'opérateur de production porte à l'aide d'un harnais. Le logiciel sur la tablette permet à l'opérateur de superposer une maquette numérique à l'objet réel qui apparaît dans l'objectif, afin de détecter rapidement les écarts dans l'assemblage, d'optimiser les temps d'inspection ou de réduire le risque des défauts de conformité coûteux.

Chez un des leaders de la maintenance aéronautique, la mise en œuvre d'un casque de réalité augmentée pour certaines opérations a permis de constater un gain de temps de 30 % par rapport à des instructions sur papier et huit fois moins d'erreurs²¹. Dans la maintenance aéronautique militaire, des applications concrètes

18. Source : <http://usinedufutur.safran-group.com/realite-virtuelle/>.

19. Interview de Gérald Lignon, directeur du site Airbus Saint-Nazaire, *Air & Cosmos*, n° 2567, octobre 2017, p. 20.

20. Créée en 1994, l'entreprise Immersion (45 salariés en 2016) est localisée en Nouvelle-Aquitaine. Elle travaille comme sous-traitant de Testia, filiale d'Airbus spécialisée dans le contrôle de qualité.

21. Source : Jacques Henno, « Industrie 4.0 : le défi de l'hypersurveillance », *Les Échos*, 14 février 2017, https://www.lesechos.fr/14/02/2017/LesEchos/22383-047-ECH_industrie-4-0---le-defi-de-l-hypersurveillance.htm.

existent déjà. Pour la maintenance du Rafale (standard F4), les technologies 3D sont mobilisées pour faciliter les opérations des maintenanciers. Un outil de réalité augmentée permet notamment la visualisation 3D des systèmes de l'avion, ce qui facilite le dépannage rapide des câblages et réduit les risques d'erreur.

À l'AIA de Bordeaux, un projet d'application de ce type de technologies a été lancé fin 2017 avec un financement de la DGA²². Un premier projet utilisant la réalité augmentée – sur la base du casque HoloLens de Microsoft – doit être appliqué au contrôle de la chambre de combustion des moteurs NOELLE 180 (le groupe auxiliaire de puissance sur Mirage 2000). Une réduction du temps de contrôle de la chambre de combustion de 30 % est attendue, ainsi qu'une réduction du taux d'erreur. Un deuxième projet mobilisant la réalité virtuelle concerne la formation au montage du moteur AST600, groupe auxiliaire de puissance équipant l'Atlantique 2 (AT2). Une réduction d'environ 25 % du temps de formation des nouveaux arrivants est attendue.

À l'heure actuelle, le contrôle optique non destructif semble surtout utilisé dans le MCO aéronautique et plutôt pour des avions civils. Dès le début des années 2000, Turbomeca (aujourd'hui Safran Helicopter Engines) a ainsi créé la société Tomo Adour, spécialisée dans l'inspection de système à partir de techniques d'optique non destructives²³. Chez Safran, un outil de recherche de panne conçu avec les start-up Diota et Win MS, permet de voir et de localiser avec une tablette numérique des défauts électriques au travers des parois des avions qui renferment un grand nombre de câbles²⁴. De son côté, Airbus a également présenté au salon de Singapour 2018, un « hangar du futur », qui incorpore un scannage complet de l'avion au moment où il entre en maintenance²⁵.

22. Source : *Avenue A*, op. cit., p. 12.

23. Plus précisément le contrôle et la numérisation 2D et 3D par tomographie industrielle à rayons X.

24. <http://usinedufutur.safran-group.com/realite-augmentee/>.

25. Y. Cochennec et O. Constant, « MRO. Prendre une part du marché », *Air & Cosmos*, n° 2518, février 2018, p. 26-29.

Industrie navale

De tels dispositifs se développent dans l'industrie navale, par exemple chez Naval Group qui a testé des dispositifs de réalité augmentée pour les opérations de soudure (les éléments de la maquette numérique d'un navire sont projetés sur les cloisons du navire et l'opérateur voit directement où souder les pièces), de contrôle (un balayage des cloisons d'un local avec une tablette numérique permet de vérifier rapidement que tous les composants sont présents et bien positionnés, par comparaison avec la maquette numérique) ou encore de câblage.

Le retour sur expérience montre que l'utilisation de casques HoloLens de Microsoft permet de réduire le nombre d'erreurs lors de l'installation de la tuyauterie sur les navires²⁶. L'application est notamment destinée aux chaudronniers qui y montent les lignes de tuyauterie. Elle leur permet de visualiser directement les informations liées au montage là où les pièces doivent être installées. La RA permet de superposer les données numériques du navire sur l'endroit physiquement concerné pour s'assurer que tout correspond. L'opérateur a les mains libres et peut poser les colliers directement sur l'hologramme. Par ailleurs, le dispositif fournit également des informations liées aux autres opérations, l'opérateur pouvant ainsi savoir si des câbles électriques passeront par la suite sur sa tuyauterie ou non, et comment ils seront fixés.

Grâce à la visualisation 3D de la maquette numérique du navire, un opérateur peut ainsi se rendre compte des contraintes qu'auront les autres opérateurs qui passeront après lui, et il peut les aider par avance. Un tel système permet au chantier de progresser plus vite. Notamment sur des chantiers de MCO de grande ampleur (par exemple IPER d'un sous-marin), ce type de dispositif permettrait certainement de raccourcir la durée des opérations de maintenance et d'accroître la disponibilité.

26. <https://www.usine-digitale.fr/article/naval-group-teste-la-realite-augmentee-sur-ses-chantiers-navals.N596063>.

Industrie des véhicules terrestres

L'étude de S. Henderson et S. K. Feiner²⁷ concernant l'application de la RA au MCO des véhicules blindés américains démontre l'utilité de ces technologies, en particulier dans des environnements exigus et complexes en permettant notamment de limiter les mouvements de tête des opérateurs et aussi d'augmenter la vitesse de réparation.

Dans le domaine des véhicules terrestres, Renault Trucks²⁸ envisage d'installer ce type de dispositif pour améliorer le contrôle qualité dans la production des moteurs (site de Lyon). Actuellement pensé comme un prototype non connecté au système d'information global, le dispositif pourrait à terme être déployé dans toutes les usines du groupe et pour d'autres usages (assemblage, réparation, maintenance, formation). L'idée générale est de réduire la charge cognitive des opérateurs sur des moteurs hétérogènes²⁹ en leur indiquant les points de contrôle, ce qui leur fait gagner du temps, leur laisse les mains libres et leur permet de gagner en productivité. En « augmentant » les opérateurs, l'entreprise espère réduire le nombre d'erreurs et diminuer la durée des contrôles.

Opportunités de développement de la télémaintenance

Ces technologies de virtualisation vont favoriser la mise en relation « assistée » entre les opérateurs de maintenance et les « technocentres » des industriels et permettre d'apporter le soutien à distance d'un expert (par exemple un ingénieur) à un opérateur (un technicien de maintenance, un utilisateur du

27. *Augmented reality for maintenance and repair (ARMAR)*, *op. cit.*

28. Notons toutefois qu'il s'agit ici de la « partie civile » de Renault Trucks et non pas de sa branche militaire Arquus [ex-RTD].

29. Comme les camions sont destinés à des usages différents, il y a énormément de variantes de moteurs. Ce n'est donc jamais exactement le même moteur qui sort de la ligne d'assemblage. Les techniciens en charge du contrôle qualité doivent effectuer des points de vérification divers et complexes liés aux usages futurs des moteurs.

matériel)³⁰. Un opérateur de maintenance peut en effet s'occuper d'une réparation, mais n'est pas forcément capable de diagnostiquer l'origine du problème, qui est du ressort de l'expert. Ce dernier peut, en outre et au-delà du diagnostic, assister l'opérateur pour des réparations particulièrement complexes ou spécifiques, pour lesquelles l'opérateur ne disposerait pas d'une expérience suffisante.

La télémaintenance existe déjà dans la mesure où une situation peut être décrite par un opérateur de maintenance à distance (via un téléphone ou un système de communication audiovisuelle de type Skype). Néanmoins, les procédés de RA vont probablement amplifier le potentiel des services de télémaintenance en permettant à ces derniers de gagner en réactivité, en fiabilité et surtout en précision. Ces procédés vont aussi réduire les coûts de logistique, liés notamment aux déplacements d'experts.

Par exemple, chez Arquus [ex-RTD], le télédiagnostic des pannes et les opérations de maintenance à distance, fondées sur des hotlines liées à des bases de données, doivent permettre à terme de guider le dépannage à distance des véhicules blindés³¹. Des applications similaires sont envisagées ou existent déjà dans le MCO aéronautique et dans le MCO naval.

Intérêt dans la formation

- *Principes généraux*

Les technologies de RV et de RA présentent un intérêt pour la formation des maintenanciers³². Ces outils s'avèrent en effet plus efficaces que les outils traditionnels dans la formation des opérateurs et plus spécifiquement dans la formation à la maintenance³³.

30. P. Fite-Georgel, « Is there a reality in Industrial Augmented Reality? », *Proceeding of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, 2011, p. 201-210.

31. E. Levacher, « Le feu sacré des armes », *art. cit.*

32. A. Y. Nee *et al.*, « Augmented reality applications in design and manufacturing », *art. cit.*

33. S. Weibel *et al.*, « An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, n° 4, 2013, p. 398-403.

Ils permettent notamment d'apprendre les gestes en amenant les opérateurs à manipuler numériquement des objets pour s'imprégner progressivement des processus de maintenance. Les données d'un équipement peuvent également être « injectées » dans l'outil de simulation, ce qui permet de simuler des pannes complexes dans lesquelles les logiciels restituent, détectent et proposent à l'opérateur de maintenance des schémas de réparation.

Ces techniques permettent ainsi de guider pas à pas et de façon précise des personnes ne disposant pas d'un très haut niveau de connaissance initiale et de leur faire exécuter des opérations relativement techniques d'assemblage ou de contrôle. Elles présentent un intérêt en termes d'apprentissage graduel, les opérateurs peuvent se préparer pour traiter des pannes plus complexes ou dont ils n'ont pas l'habitude. La RA rend possible de replacer virtuellement une pièce – ou un équipement – dans son environnement technique et de proposer le geste le plus adapté pour effectuer la réparation (ergonomie, précision, accès optimal, etc.). En particulier, ce type de technologie s'avère très utile pour des procédures ou des gestes techniques peu courants et non intuitifs sur des pièces ou des équipements à forte valeur ajoutée.

Ces technologies permettent également de limiter les contraintes du parrainage – un mécanicien débutant systématiquement accompagné d'un mécanicien plus expérimenté –, qui crée des doublons et donc des coûts supplémentaires. Outre le parrainage, il devient possible de s'affranchir de la traditionnelle « maquette » (au sens matériel, et non numérique) qui, par nature, limite le nombre d'apprentis pouvant se former au même moment.

Ces techniques permettent aussi de réduire le lien apprentissage – panne. En effet, dans une vision traditionnelle et historique de la maintenance, la panne est considérée comme une opportunité d'apprentissage, mais une nouvelle panne est généralement laborieuse à traiter. Le numérique permet de se former sur un type de panne qui n'a pas encore été rencontré, ou alors de se former sur des pannes qui pourraient éventuellement arriver.

Ces techniques permettent enfin d'améliorer la « rentabilité » des experts enseignants. En effet, avec ces dispositifs, il devient plus aisé de connecter plusieurs « stagiaires-apprenants » à un expert enseignant, voire un groupe d'experts, et former ainsi une classe « virtuelle ». Ce type de dispositif permet non seulement de réduire les coûts (réduction des coûts de transport, économies d'échelle sur l'expertise), mais aussi, sur un plan pédagogique, de faire bénéficier les stagiaires des questions et les erreurs des autres (effets d'interaction et d'apprentissage mutuel)³⁴.

- *Illustrations*

Dassault a développé avec Nexter Training et l'armée de l'air un système d'instruction en 3D appelé Ramses (pour *Rafale Maintenance Self Evaluation System*). Le système se présente un peu comme un jeu vidéo en 3D, mais à des fins éducatives. Les mécaniciens instructeurs de l'armée de l'air ont contribué à la reconstitution en 3D du Rafale. L'intérêt de ce type d'outils est bien évidemment pédagogique (précision de l'enseignement, variété des situations...) mais aussi économique puisqu'ils permettent d'économiser sur le nombre de formateurs en MCO tout en évitant d'immobiliser des appareils « réels » (ou des maquettes). Par ailleurs, ce type de dispositif favorise la formation à distance, ce qui engendre des économies sur les coûts de déplacement pour la formation. Des initiatives semblables existent également dans le MCO terrestre, par exemple à l'École du matériel de l'armée de terre à Bourges.

Chez MBDA, des applications de la RA sont envisagées dans la formation des salariés ou des clients, ce qui permettrait au personnel chargé de la documentation de mieux s'approprier les éléments visuels nécessaires à la compréhension de ce qu'ils auront à retranscrire par écrit. Dans le domaine de la production, il est aussi envisagé de remplacer certaines fiches d'instruction au poste par des séquences cinématiques en 3D.

34. P. Boulanger, « Application of Augmented Reality to Industrial Tele-Training », *art. cit.*

Intérêt dans la conception, la planification et le management

Les applications de la RV et de la RA dans le management de projet ou la planification se développent fortement. Les chambres en immersion permettent à des collaborateurs de discuter et de valider, sur place ou à distance, des décisions concernant le design des matériels sans avoir à produire de démonstrateur et encore moins une première unité de série. En anticipant les problèmes en amont, cela permet aux industriels de mieux comprendre et de s'adapter à la demande des clients. Cet effet « bon du premier coup » évite ainsi des retards, des coûts supplémentaires liés aux modifications, voire des problèmes que l'on rencontre potentiellement lors de l'utilisation du matériel et qui concernent alors le MCO.

Chez Naval Group, le recours à la maquette numérique a permis, après 2005, une baisse des reprises à bord. A contrario, pour les frégates Horizon – qui n'ont pas été conçues à l'aide de ces dispositifs de réalité virtuelle –, l'entreprise a dû procéder à d'importantes reprises sur des éléments qui ne convenaient pas au client, notamment au niveau de la tuyauterie, ce qui a entraîné un surcoût de plusieurs centaines de milliers d'euros. Cela n'a pas été le cas lors de la production des FREMM³⁵. Le recours à ces techniques de virtualisation permet donc de réduire les coûts et les délais de développement.

Chez MBDA, un processus de réalité augmentée et d'immersion permet de simuler de manière plus efficace l'intégration des missiles et les différentes interactions entre les opérateurs, le produit et les moyens de production, en s'affranchissant ainsi de l'utilisation des maquettes physiques (pas toujours disponibles ou à la modularité limitée). L'objectif de cette technologie est d'anticiper, le plus en amont possible, des phénomènes ou des comportements souvent constatés trop tard dans les phases de développement ou de mise en série.

35. L'exemple est cité par Y. Bouju, responsable de projets de réalités virtuelle et augmentée chez Naval Group, juin 2017. Source : <https://www.alliancy.fr/a-laffiche/industrie/2017/06/21/yann-bouju-dcns-on-ne-peut-plus-faire-de-sous-marin-sans-realite-virtuelle>.

Outre les aspects de conception, ces dispositifs trouvent également un intérêt dans l'organisation de la production. Les salles de réalité virtuelle de Naval Group permettent de faire des briefings sur les tâches à effectuer dans la journée sur un chantier. Les opérateurs « sont plongés dans la maquette numérique à jour de l'avancement de la construction du bâtiment. Au milieu des tuyaux, des pompes et des vannes, ils repèrent les difficultés qui les attendent, répètent les gestes de montage qu'ils auront à faire, identifient les outils qui seront nécessaires³⁶ ». Cet exemple concerne plus la partie production, mais il peut tout à fait s'adapter à un chantier de MCO type IPER de sous-marin, de porte-avions ou de frégate.

3. FREINS AUX APPLICATIONS DES TECHNIQUES DE VIRTUALISATION DANS LE MCO

Problèmes d'ordre technique

Si les technologies de RV sont aujourd'hui considérées comme plutôt matures, celles de RA restent encore relativement « jeunes ». Leur application est freinée par un certain nombre de contraintes techniques, qui sont cependant susceptibles d'être progressivement levées.

Parmi ces dernières se trouve le développement de logiciels qui permettent de mettre en œuvre ces technologies. Notamment, la capacité de *tracking*, c'est-à-dire de localiser précisément l'opérateur et son positionnement, est fondamentale³⁷. Généralement, les *trackers* utilisés dans les applications AR doivent avoir une haute précision, une faible latence et être capables de réaliser des opérations fiables sous un large éventail de variations

36. Source : H. Meddah, « Une compréhension partagée », *L'Usine nouvelle*, 2 février 2017, <https://www.usinenouvelle.com/article/une-comprehension-partagee.N494639>.

37. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.* ; S. Ong, M. Yuan et A. Y. Nee, « Augmented reality applications in manufacturing: a survey », *art. cit.* ; G. Welch et E. Foxlin, « Motion tracking: no sliver bullet, but a respectable arsenal », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, n° 6, 2002, p. 24-38.

environnementales. Les enjeux concernent plus particulièrement les environnements mouvants et soumis à des changements incertains³⁸.

Concernant l'imagerie, des problèmes de contraste et de brillance sont également relevés. Ces problèmes visuels entraînent des difficultés de lecture des informations augmentées³⁹ lors de leur projection dans l'environnement « réel⁴⁰ », ce qui limite les applications de RA dans des environnements extérieurs où la luminosité est plus forte⁴¹.

Ces aspects paraissent déterminants dans le MCO de matériels militaires lorsqu'on envisage de déployer ces technologies, largement conçues pour des usages civils au départ, dans des environnements plus contraignants.

Par ailleurs, la durée de vie des batteries des appareils composant les dispositifs de RA limite leur usage dans le temps pour une utilisation quotidienne et prolongée.

Enfin, les appareils (par exemple Smartphone, tablette, lunettes...) ne sont parfois pas assez puissants pour traiter des volumes importants de données en temps réel⁴². Cette contrainte conduit fréquemment les entreprises proposant des solutions de RA à développer, en partenariat avec le client utilisateur, des architectures système spécifiques pour augmenter les performances des appareils⁴³.

38. D. W. Van Krevelen et R. Poelman, « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations », *art. cit.*

39. R. Roy *et al.*, « Continuous maintenance and the future - Foundations and technological challenges », *CIRP annals/International Institution for Production Engineering Research*, vol. 65, n° 2, 2016, p. 667-688.

40. M. Di Donato *et al.*, « Text legibility for projected Augmented Reality on industrial workbenches », *Computers in Industry*, vol. 70, 2015, p. 70-78.

41. D. W. Van Krevelen et R. Poelman, « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations », *art. cit.*

42. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.*

43. A. Y. C. Nee et S. K. Ong, « Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing », *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, n° 9, 2013, p. 15-26.

Problèmes d'ergonomie des appareils

Certains travaux rapportent des problèmes concernant le poids et l'encombrement des appareils qui permettent d'implémenter les technologies de RA⁴⁴. Notamment, la plupart des systèmes AR actuels sont encore fondés sur des équipements câblés relativement encombrants qui ne permettent pas toujours aux utilisateurs de se déplacer librement⁴⁵. Le caractère encombrant et volumineux des casques de visualisation a notamment été souligné comme pouvant être un frein à leur utilisation dans des environnements industriels⁴⁶. Par ailleurs, des travaux rapportent notamment que des maux de tête et des nausées ont été observés, en particulier à la suite d'une durée d'utilisation prolongée⁴⁷.

La réduction du poids et de l'encombrement de ces appareils va progressivement permettre de lever les obstacles physiques à l'utilisation de la RA⁴⁸. Un développement accru de l'usage de ces dispositifs nécessitera davantage de miniaturisation des appareils⁴⁹. Les différents appareils disponibles ne sont pas forcément adaptés à tous les environnements (par exemple dans l'industrie navale l'étroitesse des navires et des chantiers est un paramètre important dans le choix des appareils).

44. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.* ; B. Schwald et B. De Laval, « An Augmented Reality System for Training and Assistance to Maintenance in the Industrial Context », *Journal of WSCG*, vol. 11, n° 1, 2003, p. 3-7.

45. S. Ong, M. Yuan et A. Y. Nee, « Augmented reality applications in manufacturing: a survey », *art. cit.*

46. J.-Y. Didier, « AMRA: Augmented Reality Assistance for Train Maintenance Tasks », Workshop Industrial Augmented Reality, 4th ACM/IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2005), octobre 2005.

47. A. Y. Nee et S. Ong, « Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing », *art. cit.* ; H. Regenbrecht, G. Baratoff et W. Wilke, « Augmented Reality Projects in Automotive and Aerospace Industry », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n° 6, 2005, p. 48-56.

48. S. Ong, M. Yuan et A. Y. Nee, « Augmented reality applications in manufacturing: a survey », *art. cit.*

49. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.*

Enfin, il peut y avoir des problèmes d'ergonomie de l'information, une surcharge d'information, d'une part, et une surconfiance des opérateurs, d'autre part. Les dispositifs de RA redirigent généralement de grandes quantités d'informations vers les opérateurs, trop d'informations pouvant nuire au service rendu à cause d'une surcharge cognitive sur les opérateurs. Il est alors essentiel de définir les règles qui viseront un juste équilibre dans les informations transmises, afin de ne pas surcharger l'opérateur, tout en évitant que ce dernier ne se repose trop sur le dispositif et passe ainsi à côté de signaux importants de l'environnement réel⁵⁰.

Perceptions négatives du contrôle

L'acceptabilité sociale de ces dispositifs de RA est également une dimension à ne pas négliger avant de généraliser leur usage⁵¹.

L'application industrielle de la RA semble a priori moins concernée par les aspects esthétiques et d'atteinte à la vie privée que les applications de la RA dans la sphère publique (par exemple acceptabilité sociale d'individus portant des casques de RA dans un espace public et filmant la scène qui s'y déroule).

Néanmoins, la possibilité de contrôler et d'enregistrer les gestes effectués par les opérateurs dans un souci de contrôle qualité ou d'amélioration de la production peut aussi être perçue comme une forme de surveillance non souhaitée de la part des salariés.

50. V. Vlahakis *et al.*, « Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, n° 5, 2002, p. 52-60.

51. C. E. Hughes *et al.*, « Mixed reality in education, entertainment, and training », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 5, n° 6, 2005, p. 24-30 ; D. W. Van Krevelen et R. Poelman, « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations », *art. cit.*

Limites spécifiques aux conditions d'emploi de matériels militaires

L'application à la défense de certaines de ces technologies peut poser problème, par exemple pour des matériels vendus à l'export avec des prestations de services incluant de la télémaintenance grâce aux techniques de virtualisation. Ces dispositifs permettraient en toute hypothèse à des techniciens déportés de voir l'environnement immédiat du matériel (par exemple un véhicule blindé), ce qui ne serait pas forcément souhaité par le client, voire pourrait être considéré comme une atteinte à la sécurité nationale. Sur le plan juridique et contractuel, l'application concrète de ce type de dispositifs sur le terrain peut donc poser problème.

Si ces dispositifs de RA se généralisent, la question de la confidentialité des données pourrait ainsi rapidement se poser. Leur contrôle et leur sécurisation vont ajouter des coûts lors de l'emploi de ces dispositifs, qui vont contrebalancer les avantages économiques d'une technologie largement développée pour des usages civils (et donc relativement facile d'accès).

Ces dispositifs de virtualisation nécessitent également un « environnement connecté », dont la fiabilité et la sécurité ne peuvent pas être systématiquement garanties concernant des matériels militaires. D'abord, en ce qui concerne des opérations de maintenance en opération, les conditions dégradées des environnements dans lesquels évoluent les véhicules (désert, montagne, etc.) peuvent jouer comme un frein à la bonne utilisation de ces systèmes et notamment la transmission des données. Ensuite, il peut arriver qu'il y ait un certain décalage technologique en termes d'infrastructure, de réseaux entre ce qui est requis par l'industriel pour que le dispositif de RA fonctionne de façon optimale et la réalité du terrain sur les bases militaires. Enfin, pour alimenter correctement ce type de dispositif les données doivent être de bonne qualité et structurées. On revient au même type de préoccupation qu'avec l'usage des techniques de big data (cf. partie II sur les équipements connectés et les enjeux de la standardisation et de la qualité des données).

4. SYNTHÈSE

Dans les processus productifs industriels, les technologies de « virtualisation » et plus particulièrement la réalité augmentée (RA) enrichissent l'environnement de travail des opérateurs. La RA permet aux opérateurs d'interagir directement avec l'information relative au processus industriel en temps réel et dans un environnement de travail réel⁵², ce qui permet d'augmenter leur productivité, notamment en réduisant le risque d'erreur humaine, et d'améliorer la qualité des produits finis (cas des opérations de production) ou des services (cas de certaines opérations de maintenance). Des applications de cette technologie peuvent également être utiles dans la conception, la planification, le design, l'assemblage ou encore la formation avec potentiellement des conséquences positives en termes de MCO.

Nous observons chez l'ensemble des acteurs du MCO, industriels comme étatiques, un intérêt marqué pour ces technologies dans les opérations de maintenance complexes ou peu fréquentes, la formation et la télémaintenance. Les industriels investissent dans ces technologies et se préparent, souvent en partenariat avec l'État ou les collectivités locales. Ainsi, le Technocampus Smart-Factory (centre industriel de réalité visuelle) localisé à Montoir-de-Bretagne (Loire-Atlantique) a pour objectif, entre autres, de former les salariés d'Airbus dans le domaine de la réalité augmentée. D'importants gains de productivité et une amélioration de la fiabilité des processus sont attendus.

Cependant, ces technologies sont encore relativement jeunes et présentent des limitations d'ordre technique, qui vont probablement se réduire avec le temps. Elles semblent en revanche relativement faciles à implémenter du point de vue des coûts dans la mesure où elles reposent en grande partie sur des produits initialement destinés à des marchés civils (par exemple casque HoloLens de Microsoft). D'autres freins comme la déployabilité chez des clients étrangers pour des matériels de défense ont été

52. M. Esengun et G. Ince, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12), *art. cit.* ; S. K. Ong et A. Y. C. Nee, *Virtual and augmented reality applications in manufacturing*, Springer, 2004, 392 p.

soulignés lors de notre travail de terrain et semblent plus complexes à lever.

La DGA s'intéresse à ces techniques de virtualisation des environnements industriels et opérationnels dans le cadre du MCO des matériels. Plusieurs études ont été lancées – ou déjà réalisées – sur le sujet.

Concernant les technologies issues de l'industrie 4.0 avec application dans le MCO des matériels, sur 18 études pour la période 2015-2021, 5 études concernent la thématique de la RV et de la RA. Sur ces 5 études, une est particulièrement consacrée au secteur naval (avec toutefois un intérêt pour transposer les résultats à d'autres milieux) et les 4 autres au milieu aéronautique. Le descriptif de ces études montre qu'elles se concentrent globalement sur les applications de télémaintenance (diagnostic et traitement des pannes à distance).

Tableau 9

Études lancées par la DGA concernant la RV et la RA

	Milieu	Descriptif du projet
1	Naval	Expérimentation maintenance prédictive.
2	Aéronautique	Étude de besoin (opportunité gain) de téléassistance.
3	Aéronautique	Schéma directeur relatif à l'implémentation de la maintenance prédictive et de la télémaintenance.
4	Aéronautique	Étude pour une application technique de réalité augmentée (RA) et de réalité virtuelle (RV) pour l'industrie.
5	Aéronautique	Étude sur les outillages connectés et les diagnostics à distance. Collaboration entre Apizee et Safran Helicopter Engines.

Source : auteurs

Tableau 10

Intérêts/limites des systèmes fondés sur les techniques de visualisation

Intérêts	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la productivité dans l'exécution de la maintenance en permettant une mise en œuvre de gestes optimaux. Limite les risques d'erreur en permettant de réaliser une opération « en virtuel » avant de la faire « en réel ». • Augmentation de la productivité dans la formation à la maintenance en permettant une mise en œuvre de mécanismes d'apprentissage optimaux. • Ergonomie : l'opérateur utilise une information ergonomique qui permet d'améliorer ses conditions de travail. • Fiabilité : l'information fiable permet de réduire les défauts et les erreurs dans la production. Cela facilite les opérations de comptes rendus d'inspection ou des travaux réalisés (montage/démontage) sans ressaisie post-opération. • Traçabilité : l'information est numérique, donc stockable et traçable à moindre coût par rapport à une information sur support papier. • Évaluation plus précise des performances des opérateurs et des personnels en formation grâce aux outils RA*. • Réduction des temps de formation par une meilleure efficacité des outils de formation. <p>Décentralisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'effectuer des tâches de maintenance de façon décentralisée (surtout pour RA) (réduction des coûts de transport et mutualisation de ressources rares comme compétences spécifiques en ingénierie et diagnostic). • Possibilité de réaliser de la formation de façon décentralisée (RV et RA) : formation à distance (réduction des coûts de transport, mutualisation de ressources rares en matière de formation). 	<ul style="list-style-type: none"> • Maturité : technologies de réalité augmentée pas encore matures. Complexité dans l'intégration des données de la maquette numérique avec l'équipement réel. • Nécessité des infrastructures. Par exemple pour la RV, nécessité d'une salle de type CAVE. Le développement des appareils individuels de type HoloLens de Microsoft permet de lever cette contrainte forte. • Problème de lisibilité des informations lors de leur projection dans l'environnement « réel ». • Problème de poids et d'ergonomie des systèmes hardware, lesquels sont le support de l'information. • Traçabilité & surveillance des opérateurs : frein social à l'adoption des techniques. L'exploitation de ces données par des programmes d'AI peut déboucher sur une évaluation automatique des performances et de la motivation individuelles.

Source : auteurs

* S. Webel *et al.*, « An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills », *art. cit.*

V. AUTOMATISATION : USAGE DES ROBOTS, COBOTS ET DRONES DANS LE MCO

Dans cette dernière partie, nous aborderons l'automatisation des tâches dans le MCO. En évoluant vers une industrialisation plus poussée et une intensité capitalistique croissante, le MCO suit une tendance analogue à celle que l'on retrouve dans l'industrie : l'automatisation des processus de production et la substitution capital-travail via l'introduction de systèmes plus ou moins autonomes, i.e. plus ou moins supervisés par des opérateurs humains.

Cette automatisation peut être complète (par exemple remplacement d'un opérateur de maintenance par un robot ou un drone) ou partielle (par exemple un maintenancier assisté par un ou plusieurs robots collaboratifs). De plus, nous considérerons que cette automatisation (complète ou guidée) des processus concerne aussi la *supply chain* du MCO, allant de la production de pièces détachées (par exemple chez les industriels) à leur réparation, en passant par l'inspection des matériels. Nous ne traiterons pas ici de l'automatisation du processus de collecte, stockage et traitement de l'information.

Dans un premier temps, nous présenterons ce que nous appelons robots, cobots et drones. Dans un second temps, nous nous intéresserons aux applications potentielles de ces différents systèmes dans le MCO en mettant en avant leurs avantages et leurs limites.

1. ROBOTS, COBOTS ET DRONES

Robots, cobots et drones sont les principaux outils et dispositifs susceptibles de trouver une application dans le MCO.

Robots et cobots

Un robot est un mécanisme automatique complexe pouvant se substituer à l'homme pour effectuer certaines opérations. Les robots industriels sont définis selon la norme ISO 8373 - 2012

comme des manipulateurs multi-applications, reprogrammables, commandés automatiquement, programmables sur trois axes ou plus, qui peuvent être fixés sur place ou mobiles, et destinés à être utilisés dans des applications d'automatisation industrielle¹.

Ces robots sont positionnés à un endroit précis dans l'espace et programmés pour exécuter la même séquence d'action de façon répétée et continue². Ils sont généralement conçus, construits et équipés pour une séquence précise d'actions, ce qui rend difficile leur reconfiguration d'une ligne de production à une autre. Ce sont donc des actifs relativement difficiles à redéployer.

Contrairement aux robots qui œuvrent de manière autonome suivant des cycles automatisés, les cobots (ou *collaborative robots*) sont des « robots non autonomes dédiés à la manipulation d'objets en collaboration avec un manipulateur humain³ ». Deux facteurs fondamentaux facilitent l'interaction homme-machine dans la production. Le premier est réglementaire avec la norme ISO/TS 15 006 qui permet par exemple à un robot de travailler hors d'une cage. Le deuxième est technique. Les progrès techniques en robotique, permis par le développement des capteurs et de l'intelligence artificielle, sont à la base d'une interaction plus sécurisée entre l'homme et le robot, ce qui ouvre la voie à de nouveaux usages et de nouvelles fonctionnalités.

Les cobots sont alors conçus pour travailler en interaction ponctuelle ou permanente avec un opérateur dans une zone commune. Ils constituent une nouvelle génération de robots de petite taille, donc légers (de 7 à 14 kg), équipés de capteurs, mobiles et surtout très précis dans la prise en compte de leur environnement. Cet ensemble de caractéristiques techniques permet de concevoir différemment l'interaction homme-machine dans les postes de travail.

Le cobot assiste l'homme et travaille en collaboration avec lui. Il est conçu et programmé pour travailler avec un opérateur en

toute sécurité, ce qui est impossible – et même interdit – avec un robot classique. Ce dernier doit en effet être systématiquement isolé, car il poursuit sa tâche quelle que soit l'évolution de son environnement, nonobstant d'éventuels dispositifs de sécurité ; en tout état de cause, le robot (et notamment le robot industriel) n'est pas conçu pour travailler *avec* l'homme.

Les cobots assistent les opérateurs humains dans certaines tâches en s'appuyant sur la complémentarité entre les capacités humaines et celles des robots. Ils permettent notamment d'automatiser des tâches simples, à faible valeur ajoutée ou alors pénibles pour les opérateurs, aux côtés de ces derniers qui se focalisent quant à eux sur des opérations exigeant une compétence ou une expertise humaine. L'optimisation des processus industriels est fondée sur l'interaction entre l'humain et la machine avec une recherche de complémentarité plus que de substituabilité. Elle est fondée sur le fait que des expériences antérieures de substitution totale de la machine à l'homme ont conduit, pour certaines tâches, à d'importants dysfonctionnements et à des anomalies⁴.

Concrètement, il s'agit d'associer en temps réel les capacités d'un robot (par exemple force, précision, rapidité d'exécution, répétition sans fatigue...) avec les compétences spécifiques d'un être humain (savoir-faire, expérience, interprétation, décision...). Dans cette perspective un opérateur industriel montre au cobot « apprenant » les gestes à effectuer, par exemple pour poncer des pièces ou ajuster différents éléments d'un équipement. Par rapport aux robots industriels conventionnels, les cobots sont plus flexibles. Une partie de leur programmation se fait en effet par apprentissage pour s'adapter à une pluralité de situations.

Les cobots sont aussi plus adaptés aux petites séries notamment parce qu'ils sont moins coûteux à l'unité que les robots, ce qui explique qu'ils intéressent des secteurs jusqu'ici relativement peu automatisés comme l'aéronautique et le spatial par exemple⁵. Thales Aerospace System (TAS) a récemment mis en

1. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

2. B. Bayram et G. Ince, « Advances in Robotics in the Era of Industry 4.0 » (chap. 11) dans A. Ustundag et E. Cevikcan (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, op. cit., p. 187-200.

3. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

4. D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, op. cit.

5. K. Delaval et al., « Les dispositifs d'assistance physique », *Travail & sécurité*, n° 788, 2017, p. 28.

service en 2017 sur son site de production de L'Aquila (Italie) le cobot Cratos⁶, qui est capable d'assembler des composants électroniques en présence d'un opérateur et ce, sans aucune barrière physique. Le cobot rend le processus de production plus flexible et plus rapide, ce qui a permis de diviser par quatre la durée des opérations d'assemblage et par dix la durée de l'ensemble du processus de production⁷. Il en découle un délai de commercialisation nettement accéléré par rapport à un processus entièrement « manuel ».

Toutes ces caractéristiques exposées font des cobots des actifs relativement faciles à redéployer. Le tableau suivant permet de résumer la différence entre robots et cobots sur plusieurs dimensions :

Tableau 11
Éléments de comparaison entre robots et cobots

Dimension	Robot	Cobot
Charge	Importante	Limitée
Vitesse	Importante	Réduite
Précision	Importante	En amélioration
Flexibilité	Faible (programmation lourde)	Élevée (facilement reprogrammable)
Mise en œuvre	Complexe	Facile et rapide
Investissement	Lourd 300 000 – 400 000 euros	Faible 9 000 – 80 000 euros
Barrière physique de protection	Nécessaire	Non nécessaire
Redéployabilité	Difficile	Relativement aisée

Source : auteurs, d'après Julien et Martin (2018)⁸

6. Acronyme de Collaborative Robot Addressed to Operative Solutions.

7. Pierre-François Mouriaux, « Usine 4.0. TAS à l'heure de la cobotique », *Air & Cosmos*, n° 2571, novembre 2018, p. 40.

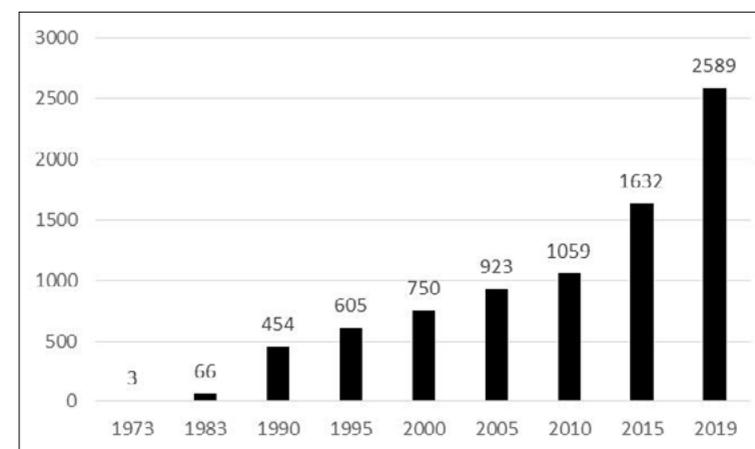
8. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

Les robots et notamment les robots industriels sont une composante fondamentale de l'usine du futur. Aussi, quelques chiffres sur la diffusion et l'emploi des robots et cobots dans l'industrie peuvent être présentés pour mieux comprendre les enjeux en termes d'équipement en robots pour les pays.

Selon l'IFR (International Federation of Robotics)⁹, le nombre de robots industriels s'accroît fortement depuis les années 1970 comme le montre l'évolution du stock de robots industriels en service dans le monde.

Figure 22

Stock de robots industriels dans le monde (1973-2019) (milliers d'unités)



Source : auteurs, d'après IFR World Robotics, Executive Summary World Robotics 2017 (les données pour 2019 sont des estimations de l'IFR)

Cette évolution croissante du stock de robots industriels s'accompagne de fortes disparités dans leur répartition, qui concernent tant les stocks que les flux. Du côté des flux, 75 % des ventes de robots en 2016 étaient réalisées sur cinq pays : Chine, Corée du Sud, Japon, États-Unis et Allemagne¹⁰. La forte

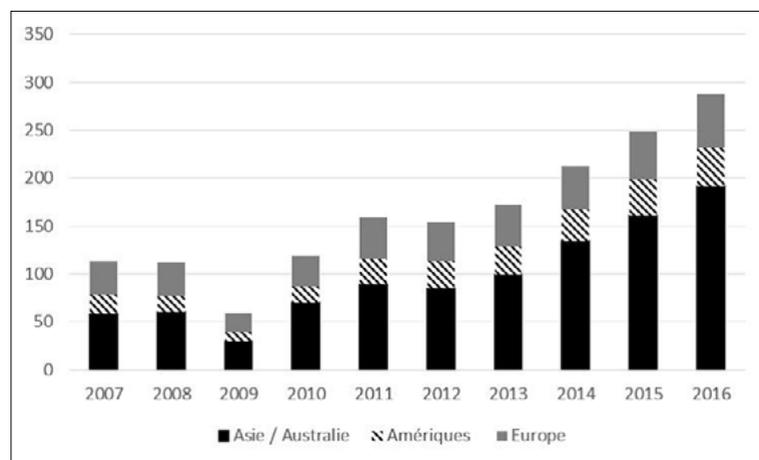
9. <https://ifr.org/worldrobotics>.

10. Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots, International Federation of Robotics, 2017.

croissance de l'offre depuis le début des années 2010 est également due à l'accélération de l'industrialisation des pays émergents, notamment la Chine pour laquelle les livraisons annuelles de robots ont été multipliées par 6 entre 2010 et 2016. La Chine représente par ailleurs à elle seule 30 % des ventes mondiales de robots industriels en 2016¹¹. Cette tendance à la croissance du parc va probablement s'intensifier avec les « initiatives industrie 4.0 » qui fleurissent sous diverses appellations dans différents pays et régions du monde.

Figure 23

Livraisons annuelles de robots industriels, par « régions du monde »



Source : auteurs, d'après International Federation of Robotics¹²

Du côté des stocks, les densités de robots pour 10 000 employés demeurent encore très fortes dans des pays industrialisés (Japon, Corée, États-Unis et Allemagne notamment). Par ailleurs, notons que l'emploi des robots concerne majoritairement l'industrie automobile.

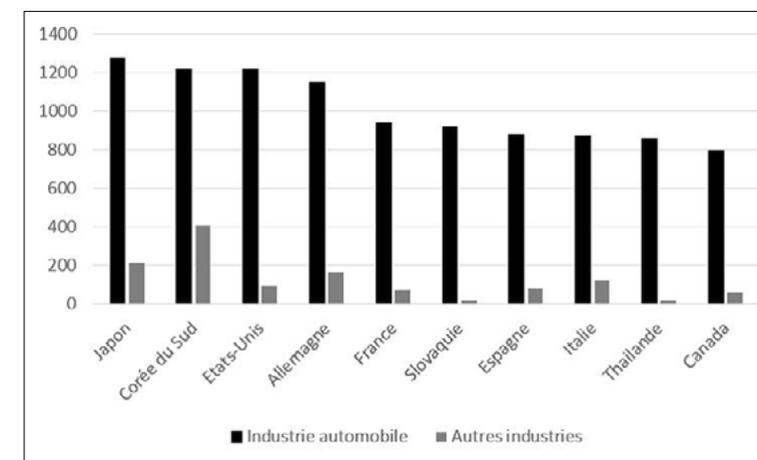
11. IFR Press Conference 29 September 2016 Frankfurt, International Federation of Robotics, 2016 ; Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots, op. cit.

12. Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots, op. cit.

Les questions sur l'automatisation des processus de production dans l'industrie 4.0 doivent donc être situées dans ce contexte : une croissance de l'offre de robots en service au niveau mondial avec une demande largement tirée par l'Asie (et plus particulièrement la Chine) ainsi qu'une inégale répartition du parc de robots à travers les pays industrialisés. En termes de dotation pour 10 000 employés, la France compte 127 robots, contre 300 pour l'Allemagne, 176 pour les États-Unis ou seulement 71 pour le Royaume-Uni. La République de Corée est le pays ayant la plus forte dotation de robots industriels au monde avec plus de 500 robots par employés. Notons que si la France accuse un retard en matière de robotique en général, il semblerait qu'elle soit aujourd'hui plutôt en avance en ce qui concerne la robotique collaborative (cobots)¹³.

Figure 24

Nombre de robots industriels (tous types) en service en 2015 par pays, par industrie, pour 10 000 employés



Source : auteurs, d'après International Federation of Robotics¹⁴

13. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

14. IFR Press Conference 29 September 2016 Frankfurt, op. cit.

Parallèlement à ces tendances, ce que l'on appelle la « robotique de service » se développe. Les services peuvent bien évidemment être destinés à l'industrie comme à d'autres secteurs (activités agricoles notamment). Les filières les plus importantes en valeur sont celles de la robotique médicale, suivie de la robotique domestique et la robotique de loisirs, mais aussi la robotique de terrain (*field robotics*) avec notamment la robotique agricole et les drones ainsi que les robots d'inspection, de sécurité et de maintenance¹⁵. Cette catégorie de robots nous intéressera particulièrement dans le cadre de cette étude.

Drones

Un drone est une plate-forme aérienne, terrestre ou navale (de surface ou sous-marine) plus ou moins autonome et contrôlée à distance. Un drone peut être robotisé. Il est généralement relié à une infrastructure et à des techniciens (voire des ingénieurs), que cela soit pour le pilotage, le traitement des données ou encore la maintenance de la plate-forme. On parle alors de système de drone, lequel comprend :

- une ou plusieurs plateformes équipées de capteurs de détection et de systèmes embarqués en fonction de l'usage pour lequel ils ont été conçus ;
- une ou plusieurs stations au sol de commande et de recueil des détections ;
- une liaison de données entre le vecteur et la station au sol.

Les drones sont développés à des fins civiles ou militaires et leur domaine d'action est très étendu. Dans ce qui suit, nous nous référons plus particulièrement à l'usage des drones à des fins professionnelles et non strictement militaires, à savoir des plateformes non destinées au combat ni à des activités récréatives et qui s'inscrivent dans le cadre d'un processus de production à travers des actions (acte de maintenance, collecte d'informations,

etc.) effectuées sur un actif physique (un matériel, une infrastructure, une zone cultivée, etc.).

Les principales applications des drones industriels se trouvent aujourd'hui dans l'agriculture (surveillance et actions sur les cultures), la maintenance et l'inspection des infrastructures (énergie, transport, etc.), le bâtiment et génie civil (par exemple surveillance et suivi des avancées de constructions), la logistique (par exemple gestion des stocks en entrepôts et inventaires) ou encore les opérations de sauvetage (cas par exemple des pompiers qui s'équipent d'unités composées de drones pour planifier la surveillance et la logistique des opérations de lutte contre les incendies).

La figure 25 illustre la variété des domaines d'intervention des drones, robots et cobots.

Figure 25

Les différents marchés des robots, cobots et drones en 2016

	Flying	Swimming	4+ Legged	2 Legged	4+ Wheeled	2 Wheeled	Arms	Head
Defense								
Industry								
Security								
Medical								
Transport								
Commercial								
Consumer								

Source : Yole Development, March 2016,

<http://www.yole.fr/2014-gallery-MEMS.aspx#I0004c840>

15. Source: <https://www.thedisruptory.com/fr/2017/04/tendances-robotiques-2016-vol-1-la-robotique-industrielle/>.

2. USAGE DES ROBOTS, COBOTS ET DRONES DANS LE MCO

Il convient d'abord de préciser que les applications potentielles des systèmes automatisés dans le MCO des matériels de défense que nous traitons (robots, cobots et drones) restent assez peu développées aujourd'hui. Néanmoins, une analyse approfondie de l'organisation industrielle du MCO et le travail de terrain auprès des acteurs révèlent que des applications sont envisageables et vont probablement continuer à se développer dans la production de pièces, la logistique (avec notamment l'acheminement de pièces détachées et leur gestion), l'inspection des matériels et enfin la réalisation d'actes de maintenance en tant que tels.

La production de pièces détachées

La production de pièces détachées concerne les phases en amont du processus de MCO. Elle concerne plus les industriels de la défense que les unités de soutien dans les forces qui disposent généralement de moyens industriels moins importants.

Il est possible qu'une plus grande automatisation des processus de production de véhicules neufs puisse aboutir à accroître la réactivité des industriels ayant fait le choix de robotiser complètement ou partiellement leur processus dans une optique d'industrie 4.0. En effet, comme d'autres industries (automobile, agroalimentaire, etc.), l'industrie de défense met également en place des processus d'automatisation des chaînes de production. Cette automatisation croissante fait partie de leur transition vers l'industrie 4.0.

Nous pensons notamment ici aux processus de production de type *closed door machining* qui consistent à équiper une ligne de production de machines autonomes. Ces processus sont capables d'enchaîner des phases d'usinage en continu avec le minimum d'intervention humaine. L'objectif est de faire fonctionner les lignes 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, de mieux anticiper l'organisation des tâches de l'atelier, et de limiter les risques pour les personnels comme pour la production lors de la manipulation des pièces et matériaux. Les gains de productivité et la réactivité s'en trouvent accrus.

Par exemple, le groupe Safran a mis en œuvre ce type d'organisation industrielle sur trois sites de production : Bidos (Pyrénées-Atlantiques), Mirabel-Montréal (Canada) et Molsheim (Bas-Rhin). Sur le site de Molsheim qui travaille actuellement sur des programmes d'avions Airbus civils, le temps d'utilisation des machines s'est particulièrement accru (de 6 500 heures par an au lieu de 4 000) et les cycles d'usinage sont passés de dix jours à seulement un jour¹⁶. Ce type d'organisation contribue à l'optimisation en amont du processus de MCO dans la mesure où il est possible de bénéficier de pièces détachées ou de composants plus rapidement.

Un autre exemple d'automatisation de production de pièces détachées pouvant avoir un impact sur le MCO est le projet d'automatisation de la production de pales chez Airbus Helicopters (site de Dugny, ancienne BA 104). Les pales d'hélicoptères doivent être changées environ toutes les 20 000 heures de vol et le site produit environ 4 200 pales par an¹⁷ (50 % neuves et 50 % en réparation)¹⁸. L'automatisation de plusieurs étapes de fabrication, qui sont réalisées manuellement et qui sont relativement simples (comme le perçage et le délignage), est envisagée à l'horizon 2019-2020. La production de pales d'hélicoptères reste cependant un domaine traditionnellement très artisanal avec beaucoup d'opérations manuelles, notamment le moulage qui nécessite un positionnement spécifique des tissus composites qui est difficile à faire reproduire par une machine.

Cet exemple constitue un cas intéressant d'application de cobots. En effet, l'automatisation de tâches plus complexes comme le ponçage, le grattage ou la peinture des pales d'hélicoptères est également envisagée. Mais comme ces tâches sont plus délicates et nécessitent des compétences spécialisées, il est

16. <http://usinedufutur.safran-group.com/close-door-machining/>.

17. L'usine effectue essentiellement des réparations lourdes dites de quatrième degré. Les réparations plus légères sont généralement effectuées au plus près du client pour éviter d'alourdir les coûts de logistique.

18. A. Angrand, « Seine Saint-Denis. Airbus Helicopters produit et répare ses pales », *Air & Cosmos*, n° 2595, mai 2018, p. 34-37.

probable que l'emploi de cobots soit privilégié par rapport à des robots classiques.

Dans cet exemple, le cobot serait utile ici pour deux raisons. D'abord pour la précision de la machine comparée à celle de l'opérateur, lequel reste toutefois présent pour guider cette dernière. Ensuite pour la force générée par la machine et sa stabilité. En effet, les pales doivent être retournées et déplacées ce qui peut entraîner à la longue des troubles musculosquelettiques (TMS). Le cobot agirait en coopération avec l'opérateur, par exemple pour retourner les pales des hélicoptères sur la chaîne de production, limitant ainsi le port de charges lourdes et de dimensions importantes (cf. tableau 12)¹⁹.

Tableau 12

Masse des pales d'hélicoptères chez Airbus Helicopters

Appareil	Longueur d'une pale (mètres)	Masse d'une pale (kg)
AS 350 Colibri-Écureuil	env. 5 m	25-30
H175	env. 7 m	60
AS332 Super-Puma	env. 7,5 m	80
NH90	env. 8 m	112
H160	env. 6 m	60

Source : auteurs, d'après Angrand (2018)²⁰

Chez Nexter Systems, l'emploi des robots et des cobots est une préoccupation permanente pour mieux présenter les véhicules ou les pièces aux opérateurs. L'entreprise a récemment mis en place des vireurs de soudage mécanisés qui permettent de réaliser 90 % des opérations à hauteur de l'opérateur. Ce dispositif permet d'adapter l'ergonomie des postes de travail et de réduire les arrêts de travail liés à des défauts d'ergonomie.

19. A. Angrand, « Automatisation. Airbus Helicopters s'installe à Dugny », *Air & Cosmos*, n° 2573, décembre 2017, p. 26-27.

20. A. Angrand, « Seine Saint-Denis. Airbus Helicopters produit et répare ses pales », *art. cit.*

D'autres acquisitions de robots sont envisagées pour réaliser des tâches de sablage et de peinture notamment. Ces évolutions concernent la partie production, mais il n'est pas impossible que de tels outils puissent être déployés pour les activités MCO dans un futur proche (notamment pour les opérations de MCO lourdes de type NTI 2 ou NTI 3 comme par exemple la refonte des matériels au retour des opérations extérieures).

La logistique

L'automatisation concerne également la gestion des pièces détachées, en particulier la logistique. Une étude récente du cabinet Oliver Wyman estime qu'au niveau de la chaîne logistique, les coûts pourraient être réduits de 25 % grâce à l'utilisation de robots autonomes en usines et notamment l'utilisation de drones pour la livraison²¹. À l'avenir, il est possible de considérer que deux grands domaines sont (ou vont être) concernés par le développement de l'utilisation des robots ou des drones : la logistique interne aux sites effectuant des opérations de maintenance (usines, régiments, escadrons, etc.) et la livraison de pièces de rechange sur les théâtres d'opération.

- *Logistique interne aux sites*

L'automatisation de certaines fonctions logistiques existe parfois depuis relativement longtemps. Par exemple, depuis 1987, le magasin de pièces de rechange de l'AIA de Bordeaux²² est robotisé, avec l'utilisation de « robots-bacs » qui gèrent chacun un type de pièce. Mais dans cet exemple, l'automatisation n'est que très partielle comparée à celle évoquée plus haut, notamment les tâches d'inventaire sont encore faites manuellement. Une automatisation plus intégrée de la logistique présente ainsi un important potentiel de gains de temps et financiers.

21. Source : Étude conduite par Oliver Wyman, reportée par J. Boquet, « L'avenir de l'autonomie », *Air & Cosmos*, n° 2568, 3 novembre 2017, p. 22.

22. Source : *Avenue A, op. cit.*, p. 5.

Concernant la logistique interne aux établissements ayant une activité de MCO, des véhicules autoguidés selon des itinéraires préprogrammés qui acheminent des pièces détachées, des composants vers différentes zones de travail vont probablement se développer dans les années à venir. Dans le domaine civil, on retrouve cette optimisation de la logistique dans les entrepôts d'entreprises comme Amazon ou Alibaba.

Ainsi, dans les entrepôts d'Amazon, les robots de Kiva Systems, plats et rectangulaires, équipés de deux roues, viennent se visser sous les étagères pour les rendre mobiles et les déplacer en fonction des besoins des opérateurs. Ils détectent les obstacles grâce à des capteurs infrarouges, et se repèrent dans l'espace avec des caméras capables de lire des QR codes au sol. Les gains de productivité sont conséquents puisque les objets viennent aux opérateurs alors qu'auparavant ces derniers devaient se déplacer à pied dans les entrepôts pour constituer les commandes.

En 2017, l'entreprise Amazon disposait d'une flotte d'environ 45 000 robots de ce genre, répartis sur 20 entrepôts dans le monde. Ce système a permis de réduire les coûts d'exploitation des entrepôts de 20 %, le temps de traitement d'un colis est passé de 60 à 15 minutes, et la capacité de stockage au mètre carré a augmenté de 50 %²³. Les opérateurs traitent désormais 300 produits par heure, contre 110 avant l'arrivée des robots Kiva²⁴. Le concurrent chinois Alibaba a mis en place une technologie similaire pour la gestion de ses entrepôts.

Il est donc probable qu'à moyen terme, ces technologies issues du monde de la logistique civile se diffusent – à plus ou moins grande échelle dans le monde du MCO – et permettent de réduire les coûts et de réaliser des gains de productivité.

- *Les livraisons par drones : livraison du dernier kilomètre ?*

Un autre aspect concernant l'automatisation et la logistique dans le MCO concerne la livraison de pièces détachées sur les théâtres d'opération (livraison du dernier kilomètre). Ce type

23. Source : <https://www.isatech.fr/automatisation-supply-chain-amazon/>.

24. Source : https://www.challenges.fr/entreprise/grande-conso/ama-zon-a-deja-enclenche-la-revolution-robotique_26268.

de dispositif est actuellement au stade de démonstrateur chez les Marines américains pour livrer de petits objets (munitions, batteries, nourriture, médicaments)²⁵. La « livraison des derniers kilomètres » automatisée permet de réduire considérablement le risque encouru par les équipes de dépannage (embuscades, IED...) tout en augmentant la qualité du service rendu (réduction des délais) et en réduisant fortement l'empreinte logistique²⁶.

Un des freins actuels réside dans la capacité d'emport de tels appareils, laquelle demeure trop faible et limite de fait leur usage à des pièces de faible dimension et de petite masse. Néanmoins, ce frein pourrait être levé grâce à la croissance et l'amélioration de l'offre existante sur ces marchés en pleine expansion. Notamment dans le domaine des drones cargos, les évolutions sont rapides. Boeing a ainsi présenté début janvier 2018 un drone capable de livrer des charges de 230 kilos pour répondre aux besoins de l'industrie du transport, de la livraison et de la logistique²⁷. Depuis 2017, la Chine dispose de l'AT200, un drone de transport capable de transporter 1 500 kilos de fret dans une soute de 10 mètres cubes à plus de 300 km/h²⁸. Dans ce domaine de la logistique et de la livraison, il se pourrait également que le secteur civil, via la multiplication de systèmes de livraison, soit le principal moteur du développement d'une offre intéressante pour les activités de MCO. Aujourd'hui, la France ne semble pas envisager d'application de ce type de livraison, ce qui ne signifie pas que cela soit impossible à moyen terme.

25. <https://www.marinecorpstimes.com/news/your-marine-corps/2018/03/21/hive-like-drone-pack-could-resupply-far-flung-marines-with-a-push-of-a-button/>.

26. Au moins dans le rayon immédiat de l'unité à livrer car un drone nécessite tout de même une base arrière logistique pour s'approvisionner et recevoir lui-même des services de maintenance.

27. Les premiers tests sont intervenus trois mois après le lancement des travaux de développement. Ceci donne une idée de la rapidité avec laquelle ces nouveaux marchés peuvent apparaître et se développer (source : *Air & Cosmos*, n° 2580, p. 45).

28. <http://www.janes.com/article/75309/china-s-at200-cargo-uav-to-supply-military-installations-in-south-china-sea>.

Les tâches d'inspection

Les tâches d'inspection font partie des tâches qui, dans le MCO, sont les plus susceptibles d'être automatisées. Elles pourraient avantageusement bénéficier de technologies initialement développées pour des marchés civils, notamment dans la robotique ou les drones.

- *Des robots pour des tâches d'inspection*

L'automatisation des tâches d'inspection est relativement ancienne, notamment pour des zones difficilement accessibles, dangereuses ou pour des ouvrages de taille importante. C'est notamment le cas dans l'industrie nucléaire où les systèmes téléopérés et des robots sont utilisés depuis plus de 50 ans²⁹. Leur emploi concerne les opérations courantes d'exploitation au sein des réacteurs et des laboratoires nucléaires, la maintenance courante des infrastructures, les interventions en cas d'urgence (pannes, accidents) et le démantèlement des sites nucléaires³⁰.

Les facteurs qui jouent en faveur de ces technologies sont les suivants : haute précision des tâches de maintenance à effectuer, environnement dangereux pour des opérateurs humains, impossibilité (ou coût trop élevé) d'arrêter le réacteur. Des solutions automatisées d'entretien des autoroutes ont également été développées, essentiellement pour réduire le risque d'exposition d'opérateurs humains, augmenter la productivité, réduire les perturbations de trafic routier, accroître la qualité des réparations³¹.

Des applications de ce type existent également pour la maintenance des lignes électriques (en particulier les lignes à

29. L. E. Parker et J. V. Draper, « Robotics application in maintenance and repair » dans S. Nof (ed.), *Handbook of Industrial Robotics*, Wiley, 1999.

30. J. Vertut et P. Coiffet, *Teleoperation and Robotics: Applications and Technology*, Springer, 1985.

31. L. E. Parker et J. Draper, « Robotics application in maintenance and repair », *art. cit.*

haute tension)³² ou l'entretien des voies ferroviaires³³. La SNCF a récemment développé Eyerobot, un robot d'inspection des brosses de contact de train qui permet de réaliser l'inspection directement en gare ou en dépôt de maintenance. En effet, régulièrement, les trains sont conduits au centre de maintenance car leurs brosses de contact – un organe situé sous les rames – ne peuvent être examinées que dans un tel site, par un opérateur qui se glisse dans une « voie fosse ». Cette opération est coûteuse en raison notamment de l'immobilisation du train liée aux délais d'acheminement de ce dernier vers l'infrastructure *ad hoc*. L'inspection par ce robot permet de ne plus à avoir à investir dans des fosses supplémentaires (économie sur les infrastructures), ni à faire revenir systématiquement les trains au centre de maintenance (économie sur les coûts de transport, réduction des coûts d'opportunité).

La littérature montre également que les robots mobiles d'inspection sont également susceptibles de jouer un rôle important concernant l'inspection des cellules d'avions³⁴.

Airbus travaille sur un robot collaboratif dédié à la maintenance, Air-Cobot (*Aircraft enhanced inspection by smart et collaborative robot*)³⁵, qui est développé pour l'inspection des parties basses des appareils. Il est conçu pour travailler en binôme avec un opérateur manuel et agir en complémentarité avec un autre robot aérien pour gagner en fiabilité dans les tâches d'inspection³⁶. Pour l'interaction homme-cobot, les constructeurs imaginent un

32. J. Dunlap, « Robotic Maintenance of Overhead Transmission Lines », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, n° 3, 1986, p. 280-284.

33. C. Martland, « Analysis of the Potential Impacts of Automation and Robotics on Locomotive Rebuilding », *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 32, n° 2, 1987, p. 92-100.

34. Mel W. Siegel *et al.*, « Mobile robots for difficult measurements in difficult environments: Application to aging aircraft inspection », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 11, 1993, p. 187-194.

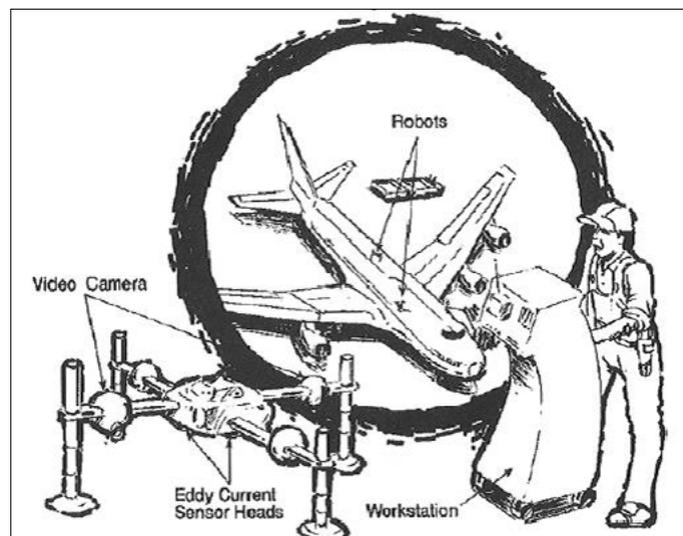
35. Il s'agit d'un partenariat entre Airbus et Sterela, M3 Systems, 2MoRO Solutions, Armines/Institut Clément Ader et le Laas-CNRS, Akka Technologies, <https://www.industrie-techno.com/cobots-et-exosquelettes-la-robotique-de-l-homme-augmente.33099>.

36. F. Donadio *et al.*, « Human-robot collaboration to perform aircraft inspection in working environment », *Machine Control & Guidance*, 5-6 octobre 2016.

opérateur muni d'une tablette, ainsi qu'un mode suiveur et la possibilité de pointer sur la structure de l'avion ce que le robot doit vérifier.

Figure 26

Exemple d'un robot d'inspection de cellule d'un avion



Source : Siegel et al. (1993)³⁷, p. 189

Grâce à la miniaturisation des technologies, des mini-robots d'inspection vont permettre aux opérateurs de maintenance d'accéder à certaines parties difficilement accessibles, sans avoir à ramper ou à démonter des parties du matériel. Par exemple, le système RANDE se présente sous la forme d'un serpent robotisé capable d'emprunter des passages de seulement 8 centimètres de large. Il a été utilisé sur l'avion américain A10 Warhog ce qui a permis d'économiser 29 heures de maintenance au total en termes de temps d'inspection sur les ailes des appareils³⁸.

37. Mel W. Siegel et al., « Mobile robots for difficult measurements in difficult environments: Application to aging aircraft inspection », *op. cit.*

38. <http://www.defensenews.com/news/your-air-force/2017/09/20/robotic-snake-can-save-airmen-29-hours-of-aircraft-inspection-time/>.

L'entreprise qui développe ce type de solution est OC-Robotics (GE Aviation) à Bristol (Royaume-Uni)³⁹.

Actuellement, il semblerait que ce type de solution robotisée se développe davantage dans la maintenance aéronautique, mais il est tout à fait envisageable de retrouver des applications semblables dans les domaines navals ou terrestres.

Par exemple, dans l'industrie navale, on retrouve ce type de dispositifs pour l'inspection et le nettoyage des coques de navires. Un travail récent réalisé par le Worcester Polytechnic Institute (WPI) à Washington, pour le compte des garde-côtes américains, présente un état des lieux du marché en matière de robots de nettoyage des coques⁴⁰. Ces systèmes permettent d'effectuer des nettoyages plus fréquents sans recourir à des infrastructures spécifiques (par exemple des cales sèches) ou une main-d'œuvre spécialisée et souvent coûteuse (par exemple des plongeurs). Ils permettent d'alléger les navires et donc de réduire la consommation de carburant. L'effet sur l'environnement est aussi à prendre en compte car ils entraînent un moindre recours aux traitements antifouling (particulièrement polluants) et limitent le risque de déplacement d'espèces invasives (lesquelles s'accrochent aux coques et se déplacent avec les navires).

Bien que prometteuses sur le plan économique et environnemental, ces technologies demeurent encore aujourd'hui largement immatures. Il y a notamment des progrès à réaliser pour que ces systèmes fonctionnent de façon optimale en environnement réel lorsque le navire est en conditions d'utilisation nominales (vitesse du navire en mer notamment)⁴¹. De plus, l'inspection et le nettoyage des surfaces « non planes » (par exemple les niches, creux, bulbes d'étrave pour les navires de surface) restent difficiles à réaliser.

39. Voir le site web de l'entreprise pour différents cas d'application de la technologie *snake robot* : <http://www.ocrobotics.com/more/download/download--case-studies/>.

40. A. Curran et al., *Analyzing the Current Market of Hull Cleaning Robots*, Project Center: Washington DC, Worcester Polytechnic Institute (WPI), 2016.

41. *Ibid.*

Il semblerait que l'offre en matière de dispositifs robotisés d'inspection et de nettoyage de coques de navires soit concentrée en Europe, surtout aux Pays-Bas⁴². Naval Group réfléchit notamment à utiliser des solutions de ce type. À titre d'exemple, le robot Hero, commercialisé par l'entreprise Eca, est capable de « nager » pour rejoindre la structure et rouler ensuite sur la surface à inspecter⁴³. Il est téléopéré depuis une station à terre, où un opérateur le fait évoluer et dispose, sur un écran, des différentes informations transmises par le robot. Il semblerait toutefois que les applications envisagées concernent plus les marchés d'unités pétrolières offshore et moins les navires militaires. Dans la même idée, l'entreprise américaine Searobotics a développé le système HullBUG qui assure une maintenance et un entretien régulier de la coque avec des gains en termes de carburant estimés à environ 5 %⁴⁴. Les applications sont envisagées sur des marchés civils et militaires.

- *Des drones pour des tâches d'inspection*

Dans le MCO, des drones permettront d'effectuer des tâches de vérification en lieu et place des procédures d'inspection manuelles. Sur des équipements de dimension importante (coques de navires, de sous-marins, cellules d'avions) ou dispersés spatialement (par exemple des batteries de missiles), cela permettra de réaliser d'importants gains de temps et de productivité ainsi que de réduire les risques auxquels sont exposés les opérateurs, qui n'auront plus besoin de manipuler de lourdes charges, ni de monter sur des chariots télescopiques (pour les inspections).

L'usage des drones à des fins d'inspection se développe de plus en plus dans les unités de production industrielle, par exemple chez EDF (cartographie, surveillance de l'évolution de la végétation à proximité des infrastructures, inspection de galeries

⁴². *Ibid.*

⁴³. <https://www.meretmarine.com/fr/content/dcms-un-robot-pour-lin-pection-des-structures-immergees>.

⁴⁴. <http://www.drillingcontractor.org/autonomous-hull-cleaning-system-delivered-for-us-navy-testing-20562>.

sans besoin de vidanger, inspection des barrages électriques⁴⁵ ou des centrales nucléaires), ENGIE (pour l'inspection des chaudières) ou encore à la SNCF où la société Altametris, filiale drones de l'entreprise, met en œuvre des drones qui offrent des solutions de maintenance des infrastructures ainsi que des services annexes qui permettent à la SNCF d'enrichir son offre (par exemple surveillance de l'impact des conditions climatiques sur les réseaux, cartographie des voies)⁴⁶.

EasyJet utilise des drones pour réaliser les inspections visuelles et diminuer au maximum le temps d'immobilisation de ses appareils (estimé à 10 000 euros de l'heure)⁴⁷. En 2014, EasyJet a noué un partenariat avec le Bristol Robotics Laboratory afin de développer des drones pour l'inspection des cellules des appareils et transmettre aux opérateurs de maintenance les détériorations qui nécessitent une réparation ou une inspection plus poussée. Le dispositif permettrait d'inspecter un appareil en quelques minutes contre plusieurs heures avec une méthode classique.

Dans l'aéronautique, des dispositifs de ce type sont déjà en place chez certains industriels pour le contrôle de la production, mais il est tout à fait possible de l'envisager dans le domaine de la maintenance. Par exemple, chez Airbus, sur le site de Toulouse, des drones sont utilisés pour localiser les défauts sur les cellules des appareils sur la ligne de production. Les gains de productivité peuvent être conséquents puisque l'acquisition de données sur le revêtement extérieur d'une cellule prend 10 à 15 minutes contre 2 heures en méthode « manuelle », soit la même tâche effectuée 8 fois plus vite⁴⁸. La start-up toulousaine

⁴⁵. Un partenariat entre EDF et la start-up Notil'e a conduit notamment au développement d'un drone qui devrait être utilisé autour des barrages, pour des tâches d'inspection notamment.

⁴⁶. Une étude publiée en 2015 par PwC montre notamment que le principal marché des drones avec des applications industrielles se trouvait dans l'inspection des infrastructures.

⁴⁷. <https://www.industrie-techno.com/video-easyjet-utilise-des-drones-pour-la-maintenance-de-ses-avions.38194>.

⁴⁸. A. Baritou d'Armagnac, « Filière aéronautique. L'usine du futur est en marche », *Air & Cosmos*, n° 2524, 25 novembre 2016, p. 25.

Donecle, créée en 2015, propose des solutions d'inspection par des drones pour des appareils touchés par la foudre. L'opération de contrôle s'effectue via un groupe de micro-drones contrôlé par un seul opérateur de maintenance. L'inspection de chaque avion dure 20 minutes, alors qu'un contrôle classique dure de 6 à 10 heures⁴⁹. Le coût serait ainsi 20 fois moindre que celui d'une inspection manuelle classique. L'entreprise cherche à s'insérer sur les marchés de maintenance de cellules d'aéronefs en diversifiant son offre de solution. Elle travaille notamment avec Air France Industries - KLM Engineering & Maintenance sur le sujet⁵⁰.

Avec Air France Industries (AFI), la DMAé [ex-SIMMAD] a récemment lancé un projet d'automatisation des contrôles journaliers ou des visites hebdomadaires, qui sont des tâches de maintenance légère (NTI 1), réalisées en général chez l'exploitant (par exemple une compagnie aérienne pour un matériel civil ou les armées dans le cas d'un matériel militaire). Un drone est utilisé pour effectuer la reconnaissance visuelle sur un aéronef afin de détecter des traces de frappe de foudre ou de collisions aviaires. Les gains identifiés se situent à plusieurs niveaux :

- Hygiène et sécurité : les visites d'inspection de cellule sont des facteurs de risques d'accidents car les échafaudages sont nécessaires pour accéder aux appareils, ce qui accroît les risques de chutes du personnel. L'emploi des drones réduit très fortement ces risques.
- Gain de temps : l'inspection par drone permet d'effectuer les tâches plus rapidement (il faut environ 1 heure pour un drone contre 10 heures environ avec une procédure manuelle).
- Fiabilisation : l'opération n'est pas tributaire d'un homme et du risque d'erreur humaine (par exemple un opérateur laissant passer un défaut à l'inspection). D'autre part, les données d'inspection sont automatiquement enregistrées et stockées.

49. <http://www.air-cosmos.com/donecle-des-micro-drones-pour-inspecter-les-avions-de-ligne-touche-par-la-foudre-68909>.

50. L. Baritou d'Armagnac, « Fournisseurs de solutions. Des solutions "made in Haute-Garonne" », *art. cit.*

Elles peuvent servir d'élément de preuve en cas de problème technique. Notons que les données collectées peuvent aussi être utilisées pour des mises en corrélation avec d'autres données (par exemple résultant de faits techniques).

- Économie sur l'infrastructure : outre les gains de temps sur la tâche en elle-même, il y a aussi les gains de temps sur la pose/dépose de l'infrastructure (échafaudage) qui sont à considérer.

Ce projet en est aujourd'hui au stade du POC (*Proof of Concept*) en ce qui concerne l'application de cette technologie à l'inspection des cellules d'aéronefs. Néanmoins, certains aspects méritent encore d'être étudiés avant d'arriver à maturité. La technologie est-elle suffisamment performante pour détecter tout ce dont on a besoin ? Quel drone choisir ? Dans quelles conditions peut-il et doit-il opérer (par exemple à l'intérieur ou à l'extérieur d'un hangar) ? Le traitement d'image arrive-t-il à un résultat équivalent (ou supérieur) à celui issu d'une procédure d'inspection manuelle ?

Dans le domaine naval, des automatisations d'inspection des mâtures, des superstructures voire des coques des navires par drones commencent aussi à être testées. L'argument essentiel en faveur de ces dispositifs est l'économie (pécuniaire et en temps) liée à l'absence d'échafaudages dont le montage et le démontage sont particulièrement coûteux sur les chantiers navals. Par exemple, un drone inspecte la coque puis l'intervention se fait par nacelle déplacée : on simplifie le process et on économise sur le temps d'installation de l'échafaudage.

Tâches d'assemblage et opérations de maintenance

Nous pensons que l'automatisation des tâches de maintenance en tant que telle (par exemple montage/démontage d'une pièce, ponçage, soudure, etc.) va plutôt prendre une forme d'automatisation partielle et mobiliser les technologies autour des cobots, des outils intelligents ou des exosquelettes. Pour les tâches de MCO, l'automatisation va plutôt consister à aider un opérateur dans le port d'une charge physique ou dans la réalisation d'une

tâche de précision. L'un des arguments majeurs en faveur de l'emploi de ces « aides automatisées » est la réduction du risque d'accidents de travail (TMS notamment) et donc du nombre d'arrêts de travail mais aussi une augmentation de la qualité de service.

Il existe de nombreux cobots avec des degrés de complexité variables. Nous pouvons en donner quelques exemples en soulignant l'impact qu'ils peuvent avoir sur les processus de maintenance.

Certains outils « intelligents », s'ils ne peuvent être considérés comme des robots (ni des cobots), assurent néanmoins une automatisation partielle des tâches avec une complémentarité homme-machine. Par exemple, grâce à un logiciel centralisé, certains outils permettent de fournir à un opérateur la valeur de serrage appropriée, qui est calculée à partir de données issues de centaines d'opérations, ce qui évite soit un retour ultérieur sur la tâche (perte de temps), soit des problèmes ultérieurs causés par un mauvais serrage. Ils permettent aussi d'effectuer des vérifications.

Par exemple, le projet *Smart devices* lancé par Airbus en 2010 vise à déployer un boîtier électronique qui est installé dans les outils et qui leur permet de « communiquer » entre eux et avec le système d'information de l'entreprise⁵¹. Concrètement, sur une ligne d'assemblage où il faut percer une pièce, mesurer les diamètres et la position des trous, puis visser des fixations, les erreurs ne sont détectées qu'à l'étape suivante. La pièce en question doit alors effectuer des allers-retours, il faut faire des rapports, ce qui prend du temps. En cas d'erreur, les outils dotés de capteurs et de boîtiers électroniques informent l'opérateur en temps réel et empêchent la pièce de passer à l'étape suivante de la ligne. Perceuse, micromètre et visseuse peuvent s'informer mutuellement des défauts et envoyer des rapports directement au système d'information, sans intervention humaine. Outre le gain de temps lié à l'absence d'arrêt de la ligne de production, l'opérateur est libéré des tâches liées à la traçabilité. Tout ceci concourt à accroître globalement la productivité.

51. Source : F. Parisot, « Airbus, des outils intelligents », *L'Usine nouvelle*, 26 mars 2014.

Chez MBDA, sur le site de Selles-Saint-Denis, le cobot Cobomanip accompagne l'opérateur en atelier pour lui faciliter une tâche demandant à la fois de la force et de la précision. Le cobot aide en particulier l'opérateur chargé du démontage du turboréacteur du missile SCALP lors de l'étape de sa rénovation à mi-vie. L'opération d'extraction du turboréacteur d'un missile SCALP requiert, en effet, des moyens mécaniques lourds. En raison du poids important de la pièce, la tâche se révèle délicate, relativement longue car elle nécessite d'utiliser un palan pour procéder à l'extraction (avec fixation de chaînes au turboréacteur et réglage des axes). Le Cobomanip agit comme un 3^e bras pour l'opérateur. Il supporte le poids du turboréacteur grâce à un système pneumatique qui compense la force exercée sur son bras. L'opérateur est guidé par le cobot sur des itinéraires programmés par modélisation numérique. Les servomoteurs de faible puissance dont il est équipé opèrent un réajustement permanent et extrêmement fin avec l'action de l'opérateur. Le système a été développé en 6 mois dans le cadre d'une collaboration entre MBDA, le centre de recherches technologiques pour l'industrie CEA Tech et l'entreprise mécanique Sarrazin⁵².

Les exosquelettes industriels peuvent aussi être envisagés pour les tâches de maintenance. Un exosquelette est un système mécanique, ou en textile à contention, qui est revêtu par l'opérateur (de production ou de maintenance) et lui apporte une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts et/ou une augmentation de ses capacités motrices (augmentation de la force, assistance des mouvements, etc.). Il peut être robotisé ou non. L'exosquelette est commandé par le mouvement de l'opérateur et doit être porté par ce dernier, ce qui implique un certain poids à supporter⁵³.

52. Des applications de cobotique relativement « simple », i.e. intégrant relativement peu d'intelligence artificielle et d'apprentissage existent aussi chez Naval Group. Il s'agit notamment d'équilibreur permettant d'équilibrer les charges portées par un opérateur. À notre connaissance cette application concerne plutôt les chantiers de production que ceux de maintenance.

53. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit.

Figure 27

Exemple d'exosquelette développé par le groupe Daewoo



Source : <https://www.newscientist.com/article/mg22329803-900-robotic-suit-gives-shipyard-workers-super-strength/>

Ces dispositifs de type assistance aux opérateurs, pour des tâches de précision ou pour des tâches pénibles (port de charge, posture difficile à maintenir longtemps...), sont susceptibles d'améliorer l'ergonomie au travail et *in fine* la qualité des produits ou du service rendu⁵⁴. Des applications concrètes de ces dispositifs existent et se développent avec succès dans le secteur du bâtiment (ponçage, peinture et port de charge notamment) et dans l'industrie, notamment automobile (par exemple chez Audi). Dans le secteur naval, le groupe coréen Daewoo développe un exosquelette qui permet de soulever des objets pesant jusqu'à 30 kg et de se déplacer avec sans effort⁵⁵. Le dispositif, conçu sur un châssis en carbone, pèse 28 kg, dispose de trois heures d'autonomie et s'adapte à des physionomies allant de 1,60 à 1,85 mètre.

54. A.-C. Falck, R. Ortengren et D. Hogberg, « The Impact of Poor Assembly Ergonomics on Product Quality: A Cost-Benefit Analysis in Car Manufacturing », *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 20, n° 1, 2010, p. 24-41.

55. <https://www.industrie-techno.com/cobots-et-exosquelettes-la-robotique-de-l-homme-augmente.33099>.

Nous relevons aujourd'hui assez peu de cas rapportés dans l'industrie de défense mais Lockheed Martin s'intéresse à cette technologie⁵⁶. Pour une application de ces dispositifs à la maintenance, le projet européen *Robot mate* met en avant leur intérêt pour la prévention des TMS dans les opérations répétées de montage/démontage de pneus, les tâches de ponçage dans des positions peu ergonomiques, les manipulations répétées d'objets lourds et/ou encombrants dans des entrepôts⁵⁷.

Notre travail de terrain ne relève pas réellement d'usages envisagés pour ce type de matériel dans le MCO. Naval Group a conduit des études visant à évaluer l'intérêt de ce type de dispositif sur des chantiers de construction navale. L'emploi de ces systèmes (tout comme les cobots) est plutôt vu comme ponctuel, mais non négligeable. Leur intérêt est perçu pour des tâches pénibles et répétitives (par exemple opération de soudage bras levés au-dessus de la tête, meulage nécessitant de porter une meuleuse lourde, etc.), pour lesquelles l'opérateur doit s'arrêter régulièrement sous peine d'accroître la fatigue, le risque d'accident et de TMS et de réduire la précision du geste, ce qui *in fine* affecte le produit final ou la qualité du service rendu. Dans ce cas de figure, un exosquelette éviterait à l'opérateur de tenir une posture considérée comme non ergonomique trop longtemps.

Cependant, plusieurs facteurs freinent le développement des dispositifs de type exosquelette. Certains sont liés à l'ergonomie et à des aspects pratiques, le retour sur expérience des dispositifs existants déplore ainsi un manque de facilité à revêtir/quitter l'exosquelette, un manque de confort, surtout pour des périodes d'utilisation longues, le caractère pas toujours intuitif des commandes et l'entrave fréquente aux mouvements naturels des opérateurs⁵⁸. L'autonomie de ces systèmes est également un sujet de préoccupation, a fortiori lorsqu'ils s'appuient sur des

56. K. S. Stadler, W. J. Elspass et H. W. Van de Venn, *Robot-mate: exoskeleton to enhance industrial production*, Poznan University of Technology, Poland, 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2014.

57. Voir la présentation du projet : <https://www.robo-mate.eu/>.

58. K. Stadler, W. Elspass et H. Van de Venn, *Robot-mate: exoskeleton to enhance industrial production*, op. cit.

formes d'intelligence, donc du calcul, ce qui nécessite davantage de puissance⁵⁹. Nous notons toutefois avec intérêt que l'entreprise Nexter Systems a expérimenté des exosquelettes dans le but d'alléger la charge de travail des opérateurs. Le manque de maturité de la technologie et des préoccupations liées à l'ergonomie ont cependant conduit l'entreprise à renoncer à ce type de dispositif, au moins à court terme.

3. SYNTHÈSE DE L'INTÉRÊT ET DES LIMITES/FREINS À L'USAGE DES ROBOTS, COBOTS ET DRONES DANS LE MCO

De l'avis des acteurs du MCO que nous avons interrogés, il semblerait que le développement des robots et plus particulièrement des cobots et des drones puisse affecter l'organisation du MCO, sa productivité et son organisation. Néanmoins, l'application de ces technologies présente actuellement moins d'intérêt – elle est donc moins développée – que les précédentes grappes de technologies étudiées⁶⁰.

Ces systèmes plus ou moins automatisés et autonomes tels que nous les avons décrits, qu'ils soient sous forme de robots, de cobots ou de drones, présentent plusieurs intérêts dans le MCO :

- Ils sont une source de gains économiques conséquents. Le temps consacré à une intervention est généralement réduit (exemple des tâches d'inspection) comme celui d'immobilisation des équipements (hausse de la disponibilité). Le besoin en infrastructures spécifiques – et donc souvent coûteuses – est réduit, voire tout simplement supprimé (cas par exemple des échafaudages dans le naval ou pour l'inspection des cellules d'avions par drones).
- La maintenance est optimisée. Les systèmes automatisés que nous avons décrits apparaissent souvent comme complémen-

59. K. S. Stadler et D. Scherly, *Exoskeletons in industry: designs and their potential*, Wismar, AUTSYM 2017 – 8th International Symposium on AUTOMATICCONTROL, 2017.

60. À l'exception de l'automatisation du processus de collecte, stockage et traitement de l'information bien entendu, qui a été traité dans la partie II de cette étude à travers la question des objets connectés.

taires des moyens de maintenance actuels et renforcent les diagnostics en termes de qualité d'analyse et de fréquence des mesures. Ils rendent accessibles des endroits qui ne l'étaient pas (inspection de l'intérieur des conduits) et fournissent parfois des données nouvelles. La qualité accrue des tâches réalisées permet également de réduire les coûts indirects liés par exemple aux erreurs que peut commettre un opérateur humain et qui conduisent souvent à immobiliser le matériel et à reprendre un certain nombre de tâches de maintenance.

- Ils répondent à des enjeux humains et environnementaux. Ces derniers permettent en effet de réduire la pénibilité et de limiter l'exposition des opérateurs aux risques inhérents à certaines tâches (tâches de maintenance en hauteur, dans des environnements dangereux ou difficiles d'accès, etc.). Le risque de troubles musculosquelettiques (TMS) peut s'en trouver réduit.

Concernant les études lancées par la DGA sur le sujet, l'automatisation des processus de MCO concerne une seule étude (sur les 18 études recensées) dans le secteur aéronautique. Il s'agit du projet AIDA qui vise à évaluer différentes solutions technologiques disponibles (ou qui le seront dans un avenir proche) pour automatiser les tâches de maintenance des aéronefs, réalisées par les forces armées. L'étude est menée en partenariat avec Air France Industrie (AFI) et les applications concrètes actuelles concernent les drones pour l'inspection quotidienne ou hebdomadaire des cellules d'aéronefs.

Néanmoins, plusieurs facteurs nous semblent jouer un rôle important concernant les freins potentiels au développement ou non de ces dispositifs automatisés dans le MCO : le volume de production, la variabilité de l'environnement, l'accessibilité de l'équipement et le cadre réglementaire.

Volume de production

Les opérations de maintenance se font rarement en série, parce que les matériels tombent rarement en panne tous au même moment mais aussi parce que certains matériels n'existent

qu'en très petite série, voire sont uniques. Ceci est amplifié avec la réduction de la taille des flottes, qui résulte d'une tendance de long terme entre hausse du prix unitaire des équipements de défense et baisse des budgets (ou évolution moins que proportionnelle)⁶¹. En raison du prix relativement élevé des robots industriels (de l'ordre de 300 000 - 400 000 euros pour un robot avec son enceinte sécurisée)⁶², la question de la rentabilité économique de telles solutions de maintenance se pose également, compte tenu de l'hétérogénéité des flottes et des volumes de production relativement faibles.

Dans ce contexte, il est fort probable que la robotisation industrielle - au sens d'une chaîne de production automatisée - concerne surtout, pour le MCO, la partie production de pièces détachées sur les sites industriels. Elle se développe chez les industriels de la défense qui font progressivement leur transition vers la numérisation de la chaîne de valeur. Chez Safran par exemple, des dispositifs de type automatisation avec aide à l'opérateur sont mis en place, mais plutôt au niveau du montage des moteurs neufs dans la partie production. Concernant le MCO militaire, le faible nombre de moteurs militaires en service est présenté comme un facteur limitant⁶³. D'autre part, les tâches de maintenance sur les moteurs ne sont pas suffisamment répétitives, car très souvent chaque panne est particulière, ce qui réduit les possibilités d'automatisation des réparations.

Variabilité de l'environnement et accessibilité de l'équipement

Si les robots industriels « classiques » ne semblent présenter que peu d'intérêt dans le MCO - en dehors des sites de production des industriels - en revanche l'emploi de cobots, de drones

61. R. Bellais et J. Droff, « Innovation, technology and defence procurement: reform or paradigmatic shift? » dans K. Burgess (ed.), *Emerging Strategies in Defense Acquisitions and Military Procurement* Hershey, Pennsylvania, USA, IGI Global, 2016, p. 205-221.

62. N. Julien et E. Martin, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, op. cit., p. 107.

63. En effet, il n'y a que deux moteurs par avion de chasse, ce qui au final fait assez peu de moteurs en service en comparaison avec le nombre de moteurs civils en service dans les compagnies aériennes.

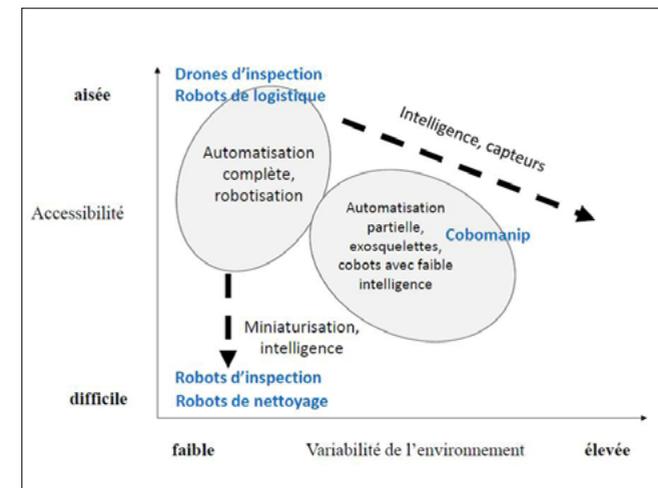
voire d'exosquelettes peut présenter un intérêt en fonction de la variabilité de l'environnement ou de l'accessibilité de l'équipement.

D'une part, la configuration spatiale de certains équipements va rendre l'utilisation de cobots ou de drones plus ou moins aisée (critère d'accessibilité). D'autre part, le degré d'autonomie d'un cobot ou d'un drone, ou la nécessité de l'intervention de l'homme, dépendent de la nature des tâches à réaliser : répétitives ou non, simples ou complexes (critère de variabilité de l'environnement).

Ainsi, la miniaturisation des dispositifs, combinée à une capacité accrue de prise en compte de l'environnement (capteurs) et d'autonomie (capacité de calcul et d'apprentissage), élargit le potentiel d'utilisation de cobots ou de drones pour la réalisation de tâches de maintenance plus ou moins complexes, dans des environnements plus ou moins difficiles.

Figure 28

Variabilité de l'environnement et accessibilité



Source : auteurs, d'après Parker et Draper (1999)⁶⁴

64. L. Parker et J. Draper, « Robotics application in maintenance and repair », art. cit.

Les cobots ou exosquelettes peuvent avoir un intérêt pour des tâches pénibles physiquement, dangereuses ou répétitives sur des surfaces relativement importantes. Cela rejoint le critère d'accessibilité mais aussi de volumes à traiter. Le secteur naval illustre parfaitement le critère d'accessibilité, car il est en effet difficile d'utiliser sur des navires (étroitesse, éloignement, etc.) les robots actuellement sur le marché. En revanche, l'usage est facilité en atelier, ce qui explique pourquoi ces technologies sont davantage présentes dans les activités de production que de maintenance. La simplification, la miniaturisation et l'amélioration de la transportabilité de ces systèmes est un enjeu pour leur développement dans ce secteur.

Les cobots, notamment en raison de leur capacité multitâche, en complémentarité avec les opérateurs, peuvent devenir des solutions intéressantes pour des travaux de précision ou des travaux de force. Leur coût relatif plus faible est aussi un facteur qui pousse à leur intégration dans les unités industrielles et aux expérimentations. Leur emploi est toutefois encore limité par les spécificités des environnements de maintenance (c'est le cas par exemple des chantiers navals et du manque d'espace pour la mise en œuvre des cobots, dans le domaine des matériels terrestres les conditions d'emploi « dégradées » ne constituent pas un environnement industriel facilitant l'insertion des cobots dans la maintenance), la législation française et aussi la méconnaissance du potentiel d'application de ces « nouveaux robots ».

Enfin, beaucoup de tâches de maintenance sont liées à des savoir-faire « humains » et apparaissent difficilement automatisables. Les progrès de l'intelligence réalisés sur les robots ou cobots, ainsi que l'augmentation du nombre de capteurs poussent à une meilleure maîtrise de la variabilité de l'environnement.

Le cadre réglementaire

Le cadre réglementaire est également un aspect à ne pas négliger, en particulier en ce qui concerne l'usage des robots et des cobots dans des environnements industriels. Par exemple, en Allemagne, la législation n'est pas la même et impose moins

de contraintes de sécurité pour permettre à un opérateur de travailler à proximité d'une machine automatisée. Pour faire évoluer cet aspect, deux voies sont envisageables : augmenter la fiabilité des machines ou adapter le cadre réglementaire français pour favoriser l'usage des robots et des cobots.

La formation

Le développement des machines automatisées et des robots va également avoir des conséquences sur la formation et les compétences des personnels. Airbus identifie comme métiers critiques à partir de 2020 tous ceux qui toucheront au travail avec les robots et à leur maintenance (hardware et logiciels).

Tableau 13

Avantages/inconvénients de l'usage des robots, cobots et drones

Intérêts	Limites/freins
<ul style="list-style-type: none"> • Gains de temps et gains de productivité. Les opérations lorsqu'elles sont automatisées sont effectuées plus rapidement. • Réduction (voire suppression) du besoin en infrastructures spécifiques (ex. drones et tâches d'inspection). • Augmentation de la qualité du service due à la réduction du risque d'erreur. • Augmentation de la sécurité et réduction des risques au travail (réduction notamment des TMS). 	<ul style="list-style-type: none"> • Problème de volume dans le MCO et de grandes variétés des tâches = difficulté de rentabiliser un outil dédié à une seule tâche (ou un groupe restreint de tâches). Effet amplifié par la réduction des flottes. • Acceptation sociale de l'arrivée des technologies en raison des risques sur l'emploi liés à l'automatisation des tâches. • Acceptation sociale liée aux risques de réaction des opérateurs en raison de l'augmentation de la mesure et l'enregistrement des opérations (ex. outils intelligents).

Source : auteurs

CONCLUSION

Cette étude s'intéresse aux technologies de l'industrie 4.0 et plus largement à ce que l'on peut appeler la numérisation de la chaîne de valeur dans le maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense.

Les résultats de notre travail de terrain montrent que, dans l'ensemble, les quatre grappes de technologies que nous avons identifiées présentent un potentiel en termes d'amélioration du MCO des matériels de défense. Ces technologies semblent toutes permettre d'améliorer la productivité et la qualité de service du MCO. Des conséquences positives en termes de réduction des coûts, d'amélioration de la qualité du service et d'augmentation de la disponibilité des équipements sont donc à attendre à la suite du développement de ces technologies.

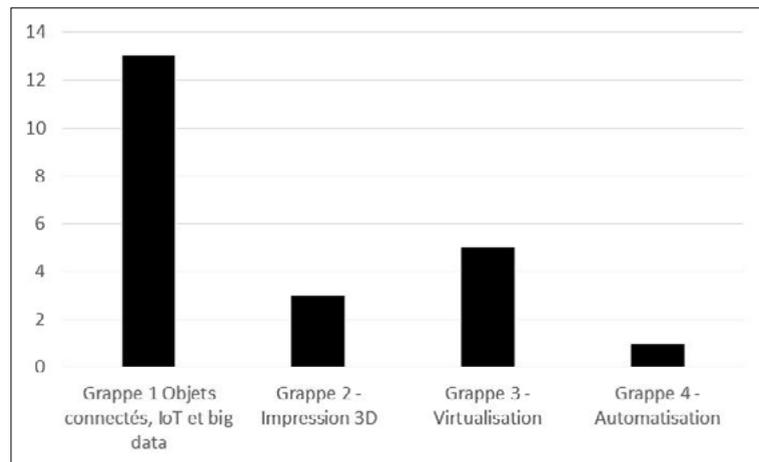
Cependant, ce potentiel n'est pas perçu de la même manière selon les milieux, les différents acteurs que nous avons pu interroger et les technologies identifiées. Ces vagues de nouvelles technologies n'arrivent pas toutes en même temps mais s'installent progressivement dans les armées et chez les industriels de la défense à travers les différentes expérimentations que nous pouvons relever. Le progrès technique arrive progressivement et discrètement et non pas « en bloc » et de façon continue.

Les équipements connectés et le traitement des données issues de ces équipements semblent être de loin la préoccupation majeure des acteurs du MCO et par conséquent la « grappe de technologies » la plus étudiée dans le domaine. Viennent ensuite les techniques de virtualisation (réalité virtuelle et réalité augmentée) puis l'impression 3D. Notons que la grappe de technologies autour de l'automatisation des processus (robots, cobots et drones), bien qu'étant une composante forte de l'usine du futur dans la littérature, est bien moins présente en termes d'application envisagée dans le MCO et donc dans le discours des acteurs interrogés dans le cadre de cette étude.

Ce constat est appuyé par le nombre d'études lancées par la DGA entre 2015 et 2018 et traitant des grappes de technologies que nous avons identifiées.

Figure 29

Nombre d'études lancées par la DGA traitant des grappes de technologies identifiées



Source : auteurs, d'après information DGA récoltées fin 2017 (SMCO)

La plupart des technologies et procédés étudiés dans cette étude sont d'abord mis en œuvre dans la conception (par exemple RV chez Naval Group ou impression 3D chez Safran pour les prototypages) puis la production pour être implémentés ensuite vers les phases les plus en aval du cycle de vie des matériels. Il est d'ailleurs possible de parler de « ruissellement » pour illustrer le fait que les investissements et applications ont plutôt lieu en amont du cycle de vie du produit plutôt qu'en aval, i.e. dans le soutien.

Fait notable, il y a également de la part de l'ensemble des acteurs (notamment dans les services étatiques) une préoccupation de dépendance à la technologie (et donc de son complémentaire la résilience) concernant l'usage des technologies étudiées ici. Il semblerait que cette préoccupation de résilience soit positivement corrélée à la probabilité d'exposition au feu et donc au risque de situation dégradée qui en découle. Cette préoccupation est particulièrement marquée dans le domaine des équipements terrestres.

Pour conclure, nous résumons l'intérêt et les limites des grappes identifiées. Puis, nous proposons un schéma de synthèse globale

permettant de visualiser leur degré d'avancement en termes d'implémentation dans le MCO des équipements de défense.

GRAPPE 1 : IOT ET OBJETS CONNECTÉS

Les acteurs du MCO investissent actuellement beaucoup de ressources (financières, techniques, humaines) dans les technologies liées à l'IoT et au traitement des données en big data.

L'exploitation systématisée et à grande échelle de données structurées et non structurées doit permettre d'aller vers des solutions de maintenance individualisées. L'objectif est d'aller vers un MCO « orienté par la donnée » dans une logique de maintenance prévisionnelle.

Ces technologies devraient également permettre une optimisation des flux logistiques dans la gestion des biens et des pièces détachées (traçabilité des flux, localisation des pièces, inventaires facilités), une amélioration de la gestion de l'outillage (notamment grâce à la traçabilité et à la localisation des outils), une meilleure traçabilité des procédures de maintenance et une amélioration de la gestion de la documentation et du suivi des configurations des équipements.

Du côté des acteurs industriels, ces technologies de gestion des données sont la source de revenus plus réguliers et constituent très souvent la base de « nouveaux » modèles d'affaires très largement fondés sur les services (par exemple maintenance et formation), qui dépendent eux-mêmes des données collectées et de la façon dont elles sont traitées.

Néanmoins, beaucoup d'incertitudes demeurent aujourd'hui concernant la transmission des données, leur stockage et leur sécurisation. La question du traitement des données est fondamentale. Pour que le rythme de traitement des données puisse suivre leur rythme de production, il est important de mettre l'accent sur le développement des compétences et la formation dans un domaine où l'offre reste relativement rare et où les besoins sont croissants et tirés par d'autres secteurs (bancaire notamment). Par ailleurs, la numérisation du MCO crée de façon plus générale des écosystèmes industriels et opérationnels plus

complexes, ce qui nécessite l'appropriation de ces technologies par les personnels en charge de la maintenance ainsi que de l'utilisation des équipements dans les forces.

La multiplication des capteurs et des systèmes de collecte de données entraîne de nouvelles contraintes et pose de nouvelles questions comme l'augmentation de l'électronique de puissance, l'alourdissement des matériels, l'existence de coûts cachés en matière de gestion et maintenance des dits capteurs ou encore de marchés devenus plus complexes.

Enfin, la question de l'accès aux données est également au cœur des problématiques de l'IoT du MCO dans la mesure où cette dernière peut être source d'asymétries d'information entre les industriels constructeurs et les industriels maintenanciers (services étatiques ou entreprises privées).

Aujourd'hui, l'application du big data au domaine du MCO progresse mais reste encore assez limitée. Certains acteurs n'hésitent pas à parler de « petit big data » pour souligner l'importance des questions à régler et mettre l'accent sur le travail en amont, à savoir la structuration, la normalisation (données fiables et intègres sans erreur de format), le stockage et la protection des données.

GRAPPE 2 : IMPRESSION 3D

L'impression 3D va probablement s'affirmer comme une rupture technologique majeure dans les années à venir avec des conséquences importantes sur l'organisation du MCO, notamment dans le domaine de la logistique – et plus largement de toute la *supply chain* – avec un impact sur les temps de production des pièces détachées, sur les temps de transport de ces dernières et donc sur la disponibilité des matériels. D'autres effets peuvent être attendus comme la possibilité de créer des pièces et équipements plus résistants (et donc nécessitant moins de maintenance), une réduction de la quantité de matières premières, mais aussi de nouvelles possibilités en termes d'innovation et de customisation des équipements (implication de l'utilisateur dans le processus d'innovation).

Notre travail de terrain montre cependant que certains domaines d'application sont parfois idéalisés dans le discours des acteurs (par exemple la production de pièces détachées à la demande en opération) quand d'autres applications n'apparaissent pas forcément de façon évidente (comme par exemple la gestion des obsolescences¹). Or, compte tenu du vieillissement de nombreux matériels en service, de la durée de service prévue pour les plus récents et ce dans un contexte de forte sollicitation en opération, la gestion optimisée des obsolescences est un domaine majeur.

De plus, le développement de l'impression 3D, et donc son application potentielle au MCO nécessite de lever un certain nombre de barrières.

Il y a d'abord des contraintes de faisabilité techniques. Les conditions de fonctionnement des imprimantes 3D demeurent relativement contraignantes pour la plupart des procédés d'impression (certaines machines nécessitent par exemple d'être placées dans une chambre sous vide ou sous atmosphère contrôlée). Ceci explique en partie leur développement progressif qui nécessite aussi un effort de formation du personnel en charge de ces procédés. Se posent également des questions de propriété intellectuelle concernant les pièces produites ainsi que la certification des pièces. Cette question de la certification des pièces, mais aussi des processus de production, est fondamentale pour déterminer la fiabilité des produits fabriqués en impression 3D. Elle constitue un enjeu majeur pour des matériels comme des missiles ou des avions qui vont être utilisés à des fins militaires, c'est-à-dire avec des degrés de fiabilité très élevés.

Enfin, le développement des processus d'impression 3D implique de garantir un approvisionnement en intrants (par exemple les poudres dans l'impression 3D métallique) qui soit fiable en termes de qualité et de coût. Ce point est régulièrement cité dans la littérature spécialisée comme pouvant être à l'origine

1. Alors que cette dernière est régulièrement mise en avant dans la littérature spécialisée sur le sujet.

de goulets d'étranglement sur l'offre, ce qui limiterait le développement de ces procédés de production.

GRAPPE 3 : TECHNIQUES DE VIRTUALISATION (RV ET RA)

Notre travail de terrain montre chez l'ensemble des acteurs du MCO un intérêt marqué pour les technologies de « virtualisation » notamment en ce qui concerne les opérations de maintenance complexes ou peu fréquentes, la formation et la télémaintenance.

La réalité augmentée (RA) en particulier a pour intérêt d'enrichir l'environnement de travail des opérateurs, ce qui a pour effet d'augmenter leur productivité, de réduire les risques d'erreurs humaines et d'améliorer la qualité des produits finis ou des services rendus. Les applications industrielles actuelles « sur le terrain » concernent plutôt la partie production. Ces technologies intéressent l'ensemble des industriels et notamment l'industrie navale où les chantiers sont grands, complexes, avec des contraintes spatiales fortes. Notons toutefois que les acteurs interrogés semblent aujourd'hui voir davantage de potentiel pour ces technologies dans la formation à la maintenance plutôt que dans la réalisation d'actes de maintenance à proprement parler.

Du côté des industriels, ces technologies sont également vues comme des supports pour des services d'aide au diagnostic et de la télémaintenance. Ceci semble particulièrement intéressant lorsque les matériels sont déployés loin de la métropole et donc loin des centres d'expertise.

Enfin, des applications de ces technologies de virtualisation se développent dans des phases plus en amont du cycle de vie des équipements comme la conception, la planification, le design, l'assemblage ou encore la formation avec potentiellement des conséquences positives sur le MCO.

Cependant, ces technologies sont encore relativement jeunes et des limitations d'ordre technique sont aujourd'hui identifiées. Les problèmes d'ergonomie ou de poids des appareils existent mais tendront progressivement à s'améliorer avec le développement et la miniaturisation de ces technologies. Surtout, la

complexité de l'intégration des données (et leur actualisation) dans la maquette numérique pour ensuite les superposer avec l'équipement réel, est un sujet particulièrement porteur d'enjeu. D'autres freins comme la déployabilité de ces dispositifs chez des clients étrangers pour des matériels de défense ont été identifiés.

GRAPPE 4 : AUTOMATISATION DU MCO (ROBOTS, COBOTS ET DRONES)

Par rapport aux trois autres grappes de technologies étudiées, les technologies d'automatisation des tâches via des robots, cobots ou drones trouvent actuellement peu d'applications dans la maintenance des équipements de défense.

Ces technologies présentent pourtant un certain nombre d'avantages que nous avons mis en évidence : gains de temps et gains de productivité, augmentation de la qualité du service due à la réduction du risque d'erreur, augmentation de la sécurité et réduction des risques au travail (réduction notamment des TMS), parfois réduction des besoins en infrastructures spécifiques.

Lorsque des applications existent, le travail de terrain montre que la focalisation des acteurs porte plutôt sur l'automatisation des tâches d'inspection des équipements (par exemple l'inspection de cellules d'aéronefs par drones). La robotique et la cobotique, bien que nettement présentes dans les phases de production des équipements (par exemple chez Safran ou encore Nexter Systems), sont encore relativement peu présentes dans les processus de MCO des équipements (à l'exception notable du CoboManip du missile MBDA).

Deux facteurs reviennent régulièrement pour expliquer le faible recours à ces technologies : d'une part, le caractère difficilement automatisable de certaines tâches de maintenance et, d'autre part, les problèmes de volumes liés à la taille des flottes entretenues (volumes beaucoup plus faibles que dans le civil²). Il est alors difficile de rentabiliser un outillage robotisé (ou cobotisé

2. Flottes d'appareils commerciaux pour une compagnie aérienne par exemple ou encore flottes de camions pour des sociétés de transport.

qui serait dédié à une seule tâche ou un groupe restreint de tâches) pour des flottes de petite taille.

Néanmoins, ce constat pourrait évoluer dans les années à venir en raison notamment de la baisse du coût relatif de certains dispositifs automatisés (notamment des cobots et des drones), combinée au développement de leur capacité d'adaptation, d'apprentissage et de polyvalence (développement de l'intelligence artificielle). Il ne faut pas négliger non plus l'acceptation sociale de technologies liée aux risques que fait peser sur l'emploi l'automatisation des tâches.

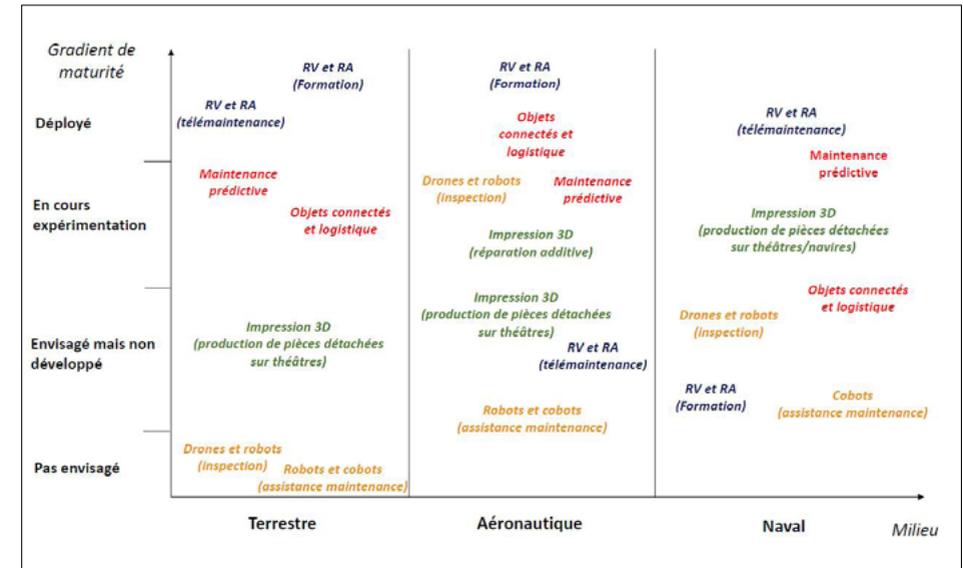
Au final, si la démarche semble bien engagée, notamment en ce qui concerne les technologies de l'IoT et des objets connectés ou encore de la virtualisation (RV ou RA), nous pouvons considérer que nous ne sommes encore qu'aux débuts de la mise en application de ces technologies de l'industrie 4.0 dans le MCO des équipements de défense.

Pour conclure, nous proposons un schéma de synthèse retraçant les différentes applications de ces grappes de technologies et les « nouvelles fonctionnalités » qu'elles permettent dans le MCO. Le schéma croise le milieu envisagé (aéronautique, naval et terrestre) et le « gradient de maturité » de la réflexion sur le sujet (« pas envisagé », « envisagé mais non développé », « en cours d'expérimentation », « déployé »).

Ce classement se fonde sur les entretiens réalisés avec les différents acteurs du secteur et sur l'ensemble des informations que nous avons collectées. Cette façon de classer a le mérite de synthétiser un paysage complexe, celui de l'application des technologies de l'industrie 4.0 au MCO des équipements de défense. Néanmoins, il s'agit d'une vision volontairement simplifiée et l'appréciation de ce classement reste de notre responsabilité.

Figure 30

Fonctionnalités permises par les technologies de l'industrie 4.0 et « degré de maturité » de leur application au maintien en condition opérationnelle des matériels de défense



Légende : Grappe 1 : rouge ; Grappe 2 : vert ; Grappe 3 : bleu ; Grappe 4 : orange

Source : auteurs, d'après les informations recueillies lors des entretiens de terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, *Encourager la réparation via l'utilisation de l'impression 3D et des espaces de fabrication numériques : État des lieux et pistes d'action*, 2017.
- ANG Joo Hock, GOH Cindy, SALDIVAR Alfredo Alan Flores et LI Yun, « Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment », *Énergies*, 2017.
- ANGRAND Antony, « Turboréacteurs. Rolls-Royce développe le moteur intelligent », *Air & Cosmos*, n° 2591, 20 avril 2018, p. 30.
- , « Seine Saint-Denis. Airbus Helicopters produit et répare ses pales », *Air & Cosmos*, n° 2595, mai 2018, p. 34-37.
- , « Fabrication additive. Les commandes de vol maintenant en imprimé 3D », *Air & Cosmos*, n° 2544, avril 2017, p. 30-31.
- , « Automatisation. Airbus Helicopters s'installe à Dugny », *Air & Cosmos*, n° 2573, décembre 2017, p. 26-27.
- , « A320 neo. Concentré de technologies pour le LEAP-1A », *Air & Cosmos*, avril 2015, p. 16.
- , GUILHEM Jean et NOYÉ R., « L'impact à venir de la fabrication additive », *Air & Cosmos*, n° 2518, 2016, p. 33-40.
- ARNAUD Walter, « De la maintenance curative à la maintenance prévisionnelle. Des dispositifs de surveillance intégrés : les HUMS », *CAIA*, n° 109, juin 2016, p. 26-27.
- ATZENI Eleonora et SALMI Alessandro, « Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, n° 9-12, 2012, p. 1147-1155.
- ATZORI Luigi, IERA Antonio et MORABITO Giacomo, « The Internet of Things: A survey », *Computer Networks*, vol. 54, n° 15, 2010, p. 2787-2805.
- AZUMA Ronald, BAILLOT Yohan, BEHRINGER Reinhold, FEINER Steven, JULIER Simon et MACINTYRE Blair, « Recent Advances in Augmented Reality », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, n° 6, 2001, p. 34-47.
- BARITOU d'ARMAGNAC Agnès, « Filière aéronautique. L'usine du futur est en marche », *Air & Cosmos*, n° 2524, 25 novembre 2016, p. 22-26.
- , « Fournisseurs de solutions. Des solutions "made in Haute-Garonne" », *Air & Cosmos*, n° 2524, 25 novembre 2016, p. 36.
- , « Fabrication additive. Feelobject 3D veut séduire l'aéronautique », *Air & Cosmos*, n° 2557, juillet 2017, p. 27.
- BARRAT Christopher, *3D printing: second edition*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, 308 p.
- BAUER Joe et MALONE Patrick, « Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing », *ICEAA 2015*, 2015.

- BAUMERS Martin, DICKENS Phill, TUCK Chris et HAGUE Richard, « The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 102, janvier 2016, p. 193-201.
- BAUMERS Martin, TUCK Chris et HAGUE Richard, « Realised levels of geometric complexity in additive manufacturing », *International Journal of Product Development*, vol. 13, n° 3, 2011, p. 222-244.
- BAYRAM Baris et INCE Gokhan, « Advances in Robotics in the Era of Industry 4.0 (chap. 11) » dans USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Series in Advanced Manufacturing », 2018, p. 187-200.
- BECHT Olivier et GASSILOUD Thomas, *Rapport d'information n° 996 en conclusion des travaux d'une mission d'information (1) sur les enjeux de la numérisation des armées*, Assemblée nationale, 2018.
- BEKRAR Amor, « Comment la technologie du jumeau numérique "disruptera" l'aviation civile en 2018 » (tribune libre), *Air & Cosmos*, n° 2590, 12 avril 2018, p. 29.
- BELLAIS Renaud et DROFF Josselin, « Innovation, technology and defence procurement: reform or paradigmatic shift? » dans Burgess Kevin (ed.), *Emerging Strategies in Defense Acquisitions and Military Procurement* Hershey, Pennsylvania, USA, IGI Global, 2016, p. 205-221.
- BEYCA Omer F., HANCERLIOGULLARI Gulsah et YAZICI Ibrahim, « Additive Manufacturing Technologies and Applications (chap. 13) » dans USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Springer Series in Advanced Manufacturing », 2018, p. 217-234.
- BOQUET Justine, « Ressources humaines. L'impact de la digitalisation chez Safran », *Air & Cosmos*, juin 2017, n° 2550, p. 28.
- BOULANGER Pierre, « Application of Augmented Reality to Industrial Tele-Training », London, Ontario, Canada, 2004.
- BOY Hervé, « La frégate "Belh@rra" pour le programme FTI », *Revue Défense Nationale*, n° 806, janvier 2018, p. 23-25.
- BROWN Nick, MALENIC Marina et HUW Williams, « Make and mend: the revolutionary promise of 3-D printing », *Jane's International Defence Review*, octobre 2014, p. 60-65.
- BUXMANN Peter, HESS Thomas et RUGGABER Rainer, « Internet of Services », *Business & Information Systems Engineering*, vol. 5, 2009, p. 341-342.
- CARNOIX Guillaume et CHÉNÉ (Du) Nicolas, « Le programme FTI et le renouvellement de la composante frégates à l'ère numérique », *Revue Défense Nationale*, n° 806, janvier 2018, p. 13-17.
- CESER Centre-Val de Loire, *Comprendre « l'industrie du futur » en région Centre-Val de Loire*, 2016.
- CHIGNARD Simon et BENYAYER Louis David, *Datanomics. les nouveaux business models des données*, FYP éditions, 2015, 162 p.
- CHOI Jin, KWON O-Chang, Jo Wonjin, LEE Heon Ju et MOON Myoung-Woon, « 4D Printing Technology: A Review », *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, n° 4, 2015, p. 159-167.
- COCHENNEC Yann, « Usine 4.0. Boeing mise sur Dassault Systèmes », *Air & Cosmos*, n° 2559, septembre 2017, p. 32.
- COCHENNEC Yann et CONSTANT Olivier, « MRO. Prendre une part du marché », *Air & Cosmos*, n° 2518, février 2018, p. 26-29.
- COCHENNEC Yann et HÉGUY Jean-Baptiste, « Au-delà de la maintenance prédictive », *Air & Cosmos*, n° 2563, 29 septembre 2017, p. 34-38.
- COUR DES COMPTES, *Le maintien en condition opérationnelle des matériels des armées*, La Documentation française, 2004.
- CURRAN Andrew, O'CONNOR Brendan, LOWE Caroline et KING Evan, *Analyzing the Current Market of Hull Cleaning Robots*, Project Center, Washington DC, Worcester Polytechnic Institute (WPI), 2016.
- CURRAN Chris, *The Road Ahead for 3D Printing*, Price Waterhouse Cooper - PwC Next in Tech, 2016.
- D'AVENI Richard A., « 3-D printing will change the world », *Harvard Business Review*, vol. 91, n° 3, 2013, p. 34.
- DELAVAL Katia, LARROQUE Damien, RAVALLEC Céline et VAUDOUX Delphine, « Les dispositifs d'assistance physique », *Travail & Sécurité*, n° 788, 2017, p. 28.
- DIDIER Jean-Yves, ROUSSEL David, MALLEM Malik, OTMANE Samir, NAUDET Sylvie et al., « AMRA: Augmented Reality Assistance for Train Maintenance Tasks », Workshop Industrial Augmented Reality, 4th ACM/IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2005), Vienne, Autriche, octobre 2005.
- DI DONATO Michele, FIORENTINO Michele, UVA Antonio E., GATTULLO Michele et MONNO Giuseppe, « Text legibility for projected Augmented Reality on industrial workbenches », *Computers in Industry*, vol. 70, 2015, p. 70-78.
- DINI Gino et MURA M. Daniele, « Application of Augmented Reality Techniques in Through-life Engineering Services », *Procedia CIRP*, vol. 38, 2015, p. 14-23.
- DONADIO Frédéric, FREJAVILLE Jérémy, LARNIER Stanislas et VETAUT Stéphane, « Human-robot collaboration to perform aircraft inspection in working environment », *Machine Control & Guidance*, 5-6 octobre 2016.
- DRATH Rainer et HORCH Alexander, « Industrie 4.0 - Hit or Hype? », *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, n° 2, 2014, p. 56-58.
- DROFF Josselin, « Le maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense : quelles tendances ? », *Newsletter de la Chaire Économie de Défense*, n° 4, 2017, p. 1-13.
- , *Le facteur spatial en économie de la défense : application au maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense*, thèse pour le

- doctorat en sciences économiques, Université de Bretagne occidentale/ENSTA Bretagne, Brest, 2013, 448 p.
- DUNLAP John H., VAN NAME Joseph M., HENKENER Jerry A., « Robotic Maintenance of Overhead Transmission Lines », *IEEE Transactions on Power Delivery*, PWRD-1, n°3, 1986, p. 280-284.
- DYÈVRE Axel, MAUPEOU Martin de et RICHARD-TIXIER Fleur, « Enjeux stratégiques du Big Data pour la Défense. Possibilités offertes aux armées et enjeux de l'exploitation des données », *Notes stratégiques*, CEIS, juin 2017, p. 32.
- ECKERT Christian et LAUNAY Jean, *Rapport n° 251 au nom de la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire sur le projet de loi de finances pour 2013 (n° 235)*, Assemblée nationale, 2012.
- EHRWEIN Béatrice et ARCHAMBAULT Laurent, « Les enjeux de l'impression 3D et l'évolution vers l'usine innovante et l'impression 4D ? » (tribune libre), *Air & Cosmos*, n° 2590, 13 avril 2018, p. 34-35.
- ESENGUN Mustafa et INCE Gokhan, « The role of augmented reality in the age of Industry 4.0 » (chap. 12) dans USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Series in Advanced Manufacturing », 2018, p. 201-215.
- FALCK Anne-Christine, ORTENGREN Roland et HOGBERG Dan, « The Impact of Poor Assembly Ergonomics on Product Quality: A Cost-Benefit Analysis in Car Manufacturing », *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 20, n° 1, 2010, p. 24-41.
- FITE-GEORGEL Pierre, « Is there a reality in Industrial Augmented Reality? », *Proceeding of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, 2011, p. 201-210.
- FORD Sharon, « Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness », *Journal of International Commerce and Economics*, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2501065>, 2014.
- FRACHET Stéphane, « Michelin et Safran roulent connectés », *Air & Cosmos*, n° 2555, juillet 2017, p. 29.
- FRAGA-LAMAS Paula, FERNÁNDEZ-CARAMÉS Tiago M., SUÁREZ-ALBELA Manuel, CASTEDO Luis et GONZÁLEZ-LÓPEZ Miguel, « A Review on Internet of Things for Defense and Public Safety », *Sensors*, vol. 16, n° 1644, 2016.
- FRAZIER William E., « Metal Additive Manufacturing: A Review », *JMEPEG*, vol. 23, n° 6, 2014, p. 1917-1928.
- GALLOIS Dominique, « Le futur de l'industrie passe par les innovations militaires », *Le Monde Économie*, 24 novembre 2016.
- GASSILOUD Thomas, *Rapport d'information sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. IV : Défense, préparation et emploi des forces : forces terrestres, Assemblée nationale, 2017.
- GEISSBAUER Reinhard et al., *Industry 4.0: Building the digital enterprise*, Price Waterhouse Coopers, 2016.

- GOUJARD Pierre-Alain, « Aviation militaire : un client pour les mégadonnées ? », *Air & Cosmos*, n° 2546, mai 2017, p. 41.
- GUILHEM Jean, « Tendances. Festival de procédés en additif métallique », *Air & Cosmos*, n° 2597, juin 2018, p. 28-30.
- , « Structures complexes. Additif métal pour l'A350 XWB », *Air & Cosmos*, n° 2582, février 2018, p. 35.
- , « Additif titane. Oerlikon et Boeing veulent standardiser », *Air & Cosmos*, n° 2585, 9 mars 2018, p. 18.
- , « Production. Additif métal pour structures massives », *Air & Cosmos*, n° 2591, 20 avril 2018, p. 31.
- , « La fabrication additive gagne l'espace lointain », *Air & Cosmos*, n° 2597, juin 2018, p. 33.
- , « Fabrication additive : addimadour : objectif grandes structures », *Air & Cosmos*, n° 2557, juillet 2017, p. 16-17.
- GUO Nannan et LEU Ming C., « Additive manufacturing: technology, applications and research needs », *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, n° 3, 2013, p. 215-243.
- HAGUE Richard M., MANSOUR Saeed et SALEH Naguib, « Material and design considerations for rapid manufacturing », *International Journal of Production Research*, vol. 4, n° 22, 2004, p. 4691-4708.
- HENDERSON Steven J. et FEINER Steven K., *Augmented reality for maintenance and repair (ARMAR)*, United States Air Force Research Lab, 2007.
- HERMANN Mario, PENTEK Tobias et OTTO Boris, « Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review », 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE Computer Society, 2016.
- HERTERICH Matthias M., UEBERNICKEL Falk et BRENNER Walter, « The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 30, 2015, p. 323-328.
- HIPPEL (Von) Eric, OGAWA Susumu et DE JONG Jeroen P. J., « The Age of the Consumer-Innovator », *MIT Sloan Management Review*, vol. 53, n° 1, 2011, p. 27-34.
- HOFMANN Erik et RÜSCH Marco, « Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics », *Computers in Industry*, vol. 89, 2017, p. 23-24.
- HOLDOWSKY Jonathan, MAHTO Monika, RAYNOR Michael E. et COTTELEER Mark, *Inside the Internet of Things (IoT)*, Deloitte University Press, 2016.
- HUBERDEAU Emmanuel, « CEPA. 100 ans d'expertise aéromaritime », *Air & Cosmos*, n° 2518, 14 octobre 2016, p. 17-19.
- HUGHES Charles E., STAPLETON Christopher B., HUGHES Darin E. et SMITH Eileen, « Mixed reality in education, entertainment, and training », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 5, n° 6, 2005, p. 24-30.

- International Federation of Robotics (IFR), *Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots*, 2017.
- , *IFR Press Conference 29 September 2016 Frankfurt*, 2016.
- IVANOV Dmitri, DOLGUI Alexandre, SOKOLOV Boris, WERNER Frank et IVANOVA Marina, « A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0 », *International Journal of Production Research*, vol. 54, n° 2, 2016, p. 386–402.
- JOHNSTON Trevor, SMITH Troy D. et IRWIN J. Luke, *Additive Manufacturing in 2040. Powerfull enabler, disruptive threat*, RAND Corporation, coll. « Security 2040 », 2018.
- JOSHI Sunil C. et SHEIKH Abdullah A., « 3D printing in aerospace and its long-term sustainability », *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, n°4, 2015, p. 175–185.
- JULIEN Nathalie et MARTIN Éric, *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement*, Dunod, 2018, 227 p.
- KAGERMANN Henning, WAHLSTER Wolfgang et HELBIG Johannes, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, Berlin, Industrie 4.0 Working Group of Acatech, 2013.
- KAITHAN Siddhartha Kumar et MC CALLEY James D., « Design Techniques and Applications of Cyberphysical Systems: A Survey », *IEEE Systems Journal*, vol. 9, n°2, 2015, p. 350–365.
- KANG Hyoung Seok, LEE Ju Yeon, CHOI Sangsu, KIM Hyun, PARK Jun Hee, SON Ji Yeon, KIM Bo Hyun et NOH Sang Do, « Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 3, n°1, 2016, p. 111–128.
- KARACAY Gaye et AYDIN Burak, « Internet of Things and New Value Proposition » (chap. 10) dans USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Series in Advanced Manufacturing », 2018, p. 173–185.
- KEATING Edward G. et DIXON Matthew C., *Investigating optimal replacement of aging Air Force systems*, Santa Monica, CA, RAND, 2003.
- KHAJAVI Siavash H., PARTANEN Jouni et HOLMSTRÖM Jan, « Additive manufacturing in the spare parts supply chain », *Computers in Industry*, vol. 65, n°1, 2014, p. 50–63.
- KOHLER Dorothée et WEISZ Jean-Daniel, *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, La Documentation française, 2016, 176 p.
- KUCHLER Magnus et CEDERLÖF Svan Thurban, *Digitalization in industrial products Harnessing the power of digital*, Ernst & Young, 2016.
- KURFESS Thomas et CASS William J., « Rethinking Additive Manufacturing and Intellectual Property Protection », *Research-Technology Management*, vol. 57, n°5, 2014, p. 35–42.
- LANGLOIT Philippe, « Imprimantes 3D : vers une révolution logistique ? », *Défense et sécurité internationale*, n°95, septembre 2013, p. 72–73.
- LARSSONNEUR Jean-Charles, *Rapport n° 277 au nom de la commission de la défense nationale et des forces armées sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. VII, *Défense équipement des forces – dissuasion*, Assemblée nationale, 2017.
- LEE Edward A., « Cyber Physical Systems: Design Challenges », *11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008.
- LEE Jay, LAPIRA Edzel, BAGHERI Behrad et KAO Hung-an, « Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment », *Manufacturing Letters*, vol. 1, n°1, 2013, p. 38–41.
- LEGGÉ Dominique de, *Rapport d'information n° 650 au nom de la commission des finances (1) sur la disponibilité des hélicoptères du ministère des Armées*, Paris, Sénat, 2018.
- LEHTONEN Juha-Matti et ANTEROINEN Jukka, « The Capability Factors as Explanatory Variables of Equipment Unit Cost Growth: A Methodological Proposal », *Defence and Peace Economics*, vol. 27, n°2, 2016, p. 280–298.
- LEVACHER Emmanuel, « Le feu sacré des armes », *Revue Défense Nationale*, octobre 2017, n°803, p. 78–82.
- LIAO Yongxin, DESCHAMPS Fernando, LOURES Edouardo et RAMOS Luis, « Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal », *International Journal of Production Research*, vol. 55, n°12, 2017, p. 3609–3629.
- LIM Ming K., BAHN Witold et LEUNG Stephen C. H., « RFID in the warehouse: A literature analysis (1995–2010) of its applications, benefits, challenges and future trends », *International Journal of Production Economics*, vol. 145, n°1, 2013, p. 409–430.
- LIU Chiao, VENGAYIL Hrishikesh, ZHONG Ray Y. et XU Xun, « A systematic development method for cyber-physical machine tools », *Journal of Manufacturing Systems*, 2018.
- LIU Peng, HUANG Samuel H., MOKASDAR Abhiram, ZHOU Heng et HOU Liang, « The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis », *Production Planning & Control*, vol. 25, n°13–14, 2014, p. 1169–1181.
- LONGO Francesco, NICOLETTI Etizia et PADOVANO Antonio, « Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context », *Computers & Industrial Engineering*, 2017.
- LUNDQUIST Edward, « Adaptive manufacturing and 3D printing. The art of the previously not possible », *Naval Forces*, n°6, 2014, p. 43–45.
- MAKSUTI Silia, BICAKU Ani, TAUBER Markus, PALKOVITS-RAUTER Silke, HAAS Sarah, DELSING Jerker, « Towards Flexible and Secure End-to-End

- Communication in Industry 4.0 », IEEE 15th International Conference Industrial Informatics (INDIN'2017), 2017.
- MALIZARD Julien et DROFF Josselin, « Analyse économique de la soutenabilité des opérations extérieures », *Les Champs de Mars*, n° 30, 2018/1, p. 377-388.
- MARILOSSIAN Jacques, *Rapport d'information n° 277 sur le projet de loi de finances pour 2018 (n° 235)*, t. V, *Défense, préparation et emploi des forces : marine*, Assemblée nationale, 2017.
- MARTLAND Carl D., « Analysis of the Potential Impacts of Automation and Robotics on Locomotive Rebuilding », *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 32, n° 2, 1987, p. 92-100.
- MARTY Alain et RECALDE Marie, *Rapport d'information en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les conséquences du rythme des opérations extérieures sur le maintien en condition opérationnelle des matériels*, Assemblée nationale, 2015.
- MERCK Eric (lieutenant), « Condition Based Maintenance: l'US Army aviation à la recherche de l'intelligence des coûts », *Revue d'information de l'ALAT*, n° 25, juin 2015, p. 60-62.
- Ministère des Armées (MINARM), État-Major des Armées (EMA) et Direction générale pour l'armement (DGA), *Politique générale de maintien en condition opérationnelle des équipements de défense sur leur cycle de vie*, 2017.
- MITTAL Sameer, KHAN Muztoba Ahmad, ROMERO David et WUEST Thorsten, « Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2017.
- MOURIAUX Pierre-François, « Usine 4.0. TAS à l'heure de la cobotique », *Air & Cosmos*, n° 2571, novembre 2018, p. 40.
- NAGY Bela, FARMER J. Doyne, BUI Quan M., TRANCIK Jessika E., « Statistical basis for predicting technological progress », *PlosOne*, 28 février 2013.
- NEE Andrew Yeh-Ching et ONG Soh Kim, « Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing », *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, n° 9, 2013, p. 15-26.
- NEE Andrew Yeh-Ching, ONG Soh Kim, CHRYSOLOURIS G. et MOURTZIS D., « Augmented reality applications in design and manufacturing », *CIRP Annals*, vol. 61, n° 2, 2012, p. 657-679.
- NEMRI Mehdi, « Demain, l'Internet des objets », *France Stratégie*, 12 janvier 2015.
- OBATON Anne-Françoise, BERNARD Alain, TAILLANDIER Georges et MOSCHETTA Jean-Marc, « Fabrication additive : état de l'art et besoins métrologiques engendrés », *Revue française de métrologie*, vol. 1, n° 41, 2016, p. 21-36.
- ONG Soh Khim et NEE Yeh-Ching Andrew, *Virtual and augmented reality applications in manufacturing*, Springer, 2004, 392 p.

- ONG Soh Khim, YUAN M. L. et NEE Yeh-Ching Andrew, « Augmented reality applications in manufacturing: a survey », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 10, 2008, p. 2707-2742.
- PARKER Lynne E. et DRAPER John V., « Robotics application in maintenance and repair » dans NOF Shimon Y. (ed.), *Handbook of Industrial Robotics*, Wiley, 1999.
- PATEL Kevin, *6 Benefits of IoT for hospitals and healthcare*, <https://www.ibm.com/blogs>, 2017.
- PAYEN Françoise, « Ingénieurs et chercheurs. Comment les industriels recrutent-ils? », *Air & Cosmos*, n° 2583, février 2018, p. 14-22.
- PATRICK Irene J. et SIMPSON Timothy W., « 3D printing disrupts manufacturing – How economies of One create New rules of competition », *Research-Technology Management*, vol. 56, n° 6, 2014, p. 12-16.
- PETROVIC Vojislav, HARO GONZALEZ Juan Vicente, JORDA FERRANDO Olga, DELGADO GORDILLO Javier, BLASCO PUCHADES Jose Ramón et PORTOLÉS GRIÑAN Luis, « Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies », *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 4, 2011, p. 1061-1079.
- PILLER Franck T., WELLER Christian et KLEER Robin, « Business Models with Additive Manufacturing – Opportunities and Challenges from the Perspective of Economics and Management » dans BRECHER Christian (ed.), *Advances in Production Technology*, Springer, coll. « Lecture Notes in Production Engineering », 2015.
- PORTER Michael et HEPPELMANN J.E., « How smart, connected products are transforming companies », *Harvard Business Review*, vol. 93, n° 10, 2015, p. 97-114.
- , « How smart, connected products are transforming competition », *Harvard Business Review*, vol. 92, n° 11, 2014, p. 64-88.
- PUYE Joachim et ANDRÉ François, *Rapport d'information n° 718 en conclusion des travaux d'une mission d'information sur l'exécution de la loi de programmation militaire 2014-2019*, Assemblée nationale, 2018.
- REEVES Philip, « How the Socioeconomic Benefits of Rapid Manufacturing Can Offset Technological Limitations », Technical papers, *Society of Manufacturing Engineers TP Pub*, 2008.
- REGENBRECHT Holger, BARATOFF Gregory et WILKE Wilhelm, « Augmented Reality Projects in Automotive and Aerospace Industry », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n° 6, 2005, p. 48-56.
- REIF Rafael, JACKSON Shirley Ann et LIVERIS Andrew, *Report To The President Accelerating U.S. Advanced Manufacturing*, Washington D.C., The President's Council of Advisors on Science and Technology, 2014.
- REJESKI David, ZHAO Fu et HUANG Yong, « Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 19, 2018, p. 21-28.

- ROSENBERG Joel, MORAND Pascal et TURCQ Dominique, *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^e siècle*, CCI Paris Île-de-France – Conseil général de l'armement, 2015.
- ROY R. Rajkumar, STARK Rainer, TRACHT Kirsten, TAKATA Shozo et MORI M., « Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges », *CIRP annals/International Institution for Production Engineering Research*, vol. 65, n° 2, 2016, p. 667–688.
- RUFFO Massimiliano et HAGUE Richard J. M., « Cost estimation for rapid manufacturing simultaneous production of mixed components using laser sintering », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, n° 11, 2007, p. 1585–1591.
- RÜSSMANN Michael et al., *Industry 4.0 The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, Boston Consulting Group, 2015.
- RYMASZEWSKA Anna, HELO Petri et GUNASEKARANB Angappa, « IoT powered servitization of manufacturing – an exploratory case study », *International Journal of Production Economics*, vol. 192, 2017, p. 92–105.
- SAINTE-CATHERINE Marie-Christine, « Impression 3D (1/2) », *Revue Défense Nationale*, avril 2018, p. 93–97.
- , « Impression 3D (2/2) », *Revue Défense Nationale*, mai 2018, p. 51–57.
- SALKIN Ceren, ONER Mahir, USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre, « A Conceptual Framework for Industry 4.0 » (chap. 1) dans USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Series in Advanced Manufacturing », 2018, p. 3–24.
- SAUCEDO-MARTINEZ Jania Astrid, PEREZ-LARA Magdiel, MARMOLEJO SAUCEDO José Antonio, SALAIS-FIERRO Tomas et VASAN Pandiant, « Industry 4.0 framework for management and operations: a review », *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, juin 2017.
- SCHNIEDERJANS Dara G., « Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis », *International Journal of Production Economics*, 2017, 183 A, p. 287–298.
- SCHWAB Klaus, *La Quatrième Révolution industrielle*, Dunod, 2017.
- SCHWALD Bernd et DE LAVAL Blandine, « An Augmented Reality System for Training and Assistance to Maintenance in the Industrial Context », *Journal of WSCG*, vol. 11, n° 1, 2003, p. 3–7.
- SIEGEL Mel W., KAUFMAN William M. et ALBERTS Christopher J., « Mobile robots for difficult measurements in difficult environments: Application to aging aircraft inspection », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 11, 1993, p. 187–194.
- SISCA Francesco G., ANGIOLETTI Cecilia M., TAISCH Marco et COLWILL James A., « Additive Manufacturing as a strategic tool for industrial competition », *IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, 2016.
- STADLER Konrad S., ELSPASS Wilfried J. et VAN DE VENN Hans W., *Robot-mate: exoskeleton to enhance industrial production*, Poznan University of Technology, Poland, 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2014.
- STADLER Konrad S. et SCHERLY Daniel, *Exoskeletons in industry: designs and their potential*, Wismar, AUTSYM 2017 – 8th International Symposium on AUTOMATICCONTROL, 2017.
- STRANDHAGEN Joe Wessen, ALFNES Erlend, STRANDHAGEN Ian Ola et SWAHN Natalia, « Importance of Production Environments When Applying Industry 4.0 to Production Logistics – A Multiple Case Study », *Advances in Manufacturing*, vol. 5, n° 4, 2017, p. 344–358.
- SYBERFELDT Anna, HOLM Magnus, DANIELSSON Oscar, WANG Lihui et BREWSTER Rodney Lindgren, « Support systems on the industrial shop-floors of the future – operators' perspective on augmented reality », *Procedia CIRP 44 - 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*, 2016, p. 108–113.
- TAO Fei, QI Qinglin, LIU Ang et KUSIAK Andrew, « Data-driven smart manufacturing », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, Part C, 2018, p. 157–169.
- THOMAS-SEALE Lauren E. J., KIRKMAN-BROWN Jackson C., ATTALLAH Moataz M., ESPINO Daniel M. et SHEPHERD Duncan E. T., « The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry », *International Journal of Production Economics*, vol. 198, 2018, p. 104–118.
- TORTORELLA Guilherme Luz et FETTERMANN Diego, « Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 55, n° 8, 2017, p. 2975–2987.
- TRIMBLE Stephen, « Analysis: what is the future for 3D printing in aerospace? », *Flight International*, n° 966, 2014.
- USTUNDAG Alp et CEVIKCAN Emre (eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, coll. « Springer Series in Advanced Manufacturing », 2018.
- VAN KREVELEN Rick et POELMAN Ronald, « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations », *The International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, n° 2, 2010, p. 1–20.
- VELTZ Pierre, *La Société hyper-industrielle. Le nouveau capitalisme productif*, Éd. du Seuil, 2017, 128 p.
- VERTUT Jean et COIFFET Philippe, *Teleoperation and Robotics: Applications and Technology*, Springer, 1985.
- VILLANI Cédric, *Donner un sens à l'intelligence artificielle : pour une stratégie nationale et européenne*, La Documentation française, 2018, 235 p.

- VILLIERS Pierre de, *Servir*, Fayard, 2017, 254 p.
- VLAHAKIS Vassilios, IOANNIDIS Nikolaos, KARIGIANNIS John, TSOTROS Manolis, GOUNARIS Michael, STRICKER Didier, GLEUE Tim, DAEHNE Patrick et ALMEIDA Luis, « Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites », *IEEE Comput. Grap. Appl. IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, n° 5, 2002, p. 52-60.
- VON TELL Philip, *The rise of industrial 3D-Printing*, Rocket, 2017.
- WANG Shiyon, WAN Jiafu, LI Di et ZHANG Chunhua, « Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, n° 1, 2016.
- WEBEL Sabine, BOCKHOLT Uli, ENGELKE Timo, GAVISH Nirit, OLBRICH Manuel et PREUSCHE Carsten, « An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, n° 4, 2013, p. 398-403.
- WELCH Greg et FOXLIN Eric, « Motion tracking: no sliver bullet, but a respectable arsenal », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, n° 6, 2002, p. 24-38.
- WIEDENMAIER Stefan, Oehme Olaf, Schmidt Ludger et Luczak Holger, « Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 16, n° 3, 2003, p. 497-514.
- WILBANKS Kelsey B., « The Challenges of 3D Printing to the Repair-Reconstruction Doctrine in Patent Law », *George Mason Law Review*, vol. 20, n° 4, 2013, p. 1147-1181.
- WONG Hartanto et EVERS Daniel, « Enhancing responsiveness for mass customization strategies through the use of rapid manufacturing technologies » dans CHENG Edwin T.C., CHOI Tsan-Ming (eds.), *Innovative quick response programs in logistics and supply chain management*, Heidelberg, Springer, 2010, p. 205-226.
- YIN Yong, STECKE Kathryn E. et LI Dongni, « The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0 », *International Journal of Production Research*, 2017.
- ZAJEC Olivier, « Hyperconnectivité et souveraineté : les nouveaux paradigmes opérationnels de la puissance aérienne », *Défense et sécurité internationale*, n° 55 (hors-série), août-septembre 2017.

ANNEXES

1. LISTE DES PERSONNES INTERVIEWÉES DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE

- AZEROT Thierry, responsable de Développement Prospectives, Projets, Systèmes d'information, Nexter Systems (entretien réalisé à Versailles le 26/04/18).
- BIGEARD Jean-Jacques, lieutenant-colonel, chef du bureau des données du MCO aéronautique, SIMMAD/SDSC/Div. Ingénierie, BA 106, Bordeaux Mérignac.
- BOUCHE Anne-Marie, ingénieur en chef de l'armement DGA/DO/SMCO, sous-directrice du développement du MCO à la DGA (entretien réalisé le 29/11/17, à Balard, Paris).
- BOURLARD Patrick, capitaine de frégate, Service au soutien de la flotte (SSF) (entretien réalisé le 31/05/18 à Balard, Paris).
- CANAL Pierre, amiral, directeur de la SIMMAD, BA 106, Bordeaux Mérignac (entretien réalisé le 26/01/18 à la SIMMAD, BA 106, Bordeaux Mérignac).
- COLOMBANI Pascal, capitaine de frégate, Service au soutien de la flotte (SSF) (entretien réalisé le 31/05/18 à Balard, Paris).
- DUBREUIL-CHAMBARDEL Yves, directeur du pôle Capitalisation du patrimoine technologique direction Innovation et maîtrise technique Naval Group, Nantes (entretien réalisé le 27/03/18, Naval Group Technocéan, Nantes).
- FABRE Sébastien, capitaine de vaisseau, chef de la division Stratégie-Modernisation du MCO aéronautique-réglementation, SIMMAD (entretien réalisé le 20/02/18, à Balard, Paris).
- GIRIER Guy, général, conseiller défense président exécutif (Airbus), ancien directeur central de la SIMMAD de 2013 à 2016, en charge de la maîtrise d'ouvrage déléguée du MCO aéronautique (entretien réalisé le 30/11/17 chez Airbus à Suresnes, Paris).
- GOURAUD Éric, général (2S), conseiller militaire Nexter Systems, direction du soutien et des services clients (entretien réalisé le 26/04/18 chez Nexter Systems à Satory, Versailles).
- GRANDEMANGE Christophe, ingénieur en chef de l'armement DGA/DO/SMCO, chef du département soutien logistique intégré et études, responsable métier soutien logistique intégré à la DGA (entretien réalisé le 29/11/17 à Balard, Paris).
- HARDY Pierre-André, directeur des moyens industriels, Nexter Systems, Bourges (entretien réalisé le 26/04/18, en visioconférence depuis Nexter Systems, Satory, Versailles).

JAGU Stevee, ingénieur en chef de l'armement, DGA, adjoint au chef de la division Stratégie-Modernisation du MCO aéronautique-réglementation, SIMMAD (entretien réalisé le 20/02/18 à Balard, Paris).

LAURENT Jean-Marc, général de l'armée de l'air, ancien commandant du CSFA, actuel titulaire de la Chaire Défense de Bordeaux (entretien réalisé le 26/01/18 à Sciences Po Bordeaux, Pessac).

LECLERCQ Franck, ingénieur général de l'armement, directeur de l'AIA de Bordeaux (entretien réalisé le 26/01/18 à l'AIA de Bordeaux, Floirac).

LETSCHER Remy, directeur de la stratégie moteurs militaires de Safran Aircraft Engines (entretien réalisé le 12/02/18, par téléphone).

MONZAUGE Laurent, directeur Production Systèmes, Nexter Systems, Roanne (entretien réalisé le 26/04/18, en visioconférence depuis Nexter Systems, Satory, Versailles).

OHNET Richard, colonel, chef du bureau Stratégie et Modernisation (BSM) du MCO-T, Structure intégrée du maintien en condition opérationnelle des matériels terrestres (SIMMT) (entretien réalisé le 21/12/17 à la SIMMT, Versailles).

SAINTE-CLAIRE DEVILLE Arnaud, général, directeur des relations institutionnelles France et Europe chez Nexter, *Vice President Institutional Relations*, ancien commandant des forces terrestres (entretien réalisé le 28/02/18 à Versailles).

SCHUSTER David, commandant, bureau Stratégie et Modernisation (BSM) du MCO-T, Structure intégrée du maintien en condition opérationnelle des matériels terrestres (SIMMT) (entretien réalisé le 21/12/17 à la SIMMT, Versailles).

SIMEON Karine, capitaine, chef du bureau Commandes et réparations SIC Aéro, SIMMAD/sous-direction *Supply chain/DOSC*, BA 106, Bordeaux Mérignac.

TOTA Émilie, ingénieur en chef de l'armement, adjointe au directeur de l'AIA de Bordeaux (entretien réalisé le 26/01/18 à l'AIA de Bordeaux, Floirac).

VANDENBUSSCHE Pascal, général, vice-président, directeur du soutien du groupe Renault Trucks Defense (RTD) (entretien réalisé le 15/12/17 chez Arquus [ex-RTD]/Volvo à Paris).

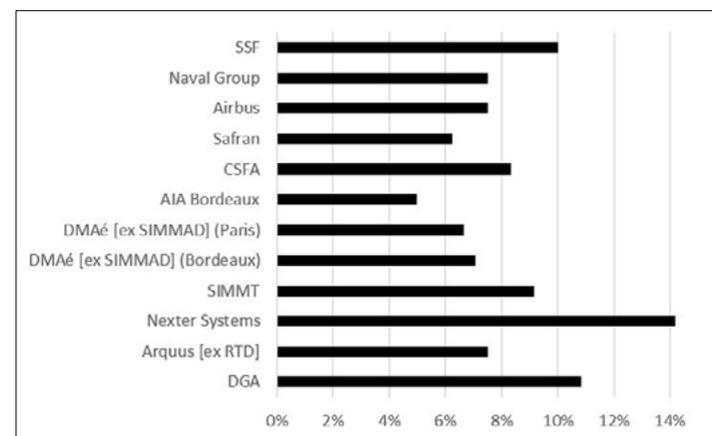
VERDON Grégoire, *Director External Communications & Operational Marketing*, Renault Trucks Defense (RTD) (entretien réalisé le 15/12/17 chez Arquus [ex-RTD]/Volvo à Paris).

2. STATISTIQUES SUR LA DURÉE DES ENTRETIENS

Acteurs rencontrés et temps cumulé d'entretien (en minutes)

Acteurs	Durée (minutes)
DGA	130
Arquus [ex-RTD]	90
Nexter Systems	170
SIMMT	110
DMAé [ex-SIMMAD] - Bordeaux	85
DMAé [ex-SIMMAD] - Paris	80
AIA Bordeaux	60
CSFA	100
Safran	75
Airbus	90
Naval Group	90
SSF	120
Total	1 200

Acteurs rencontrés et répartition du temps d'entretien (%)



3. QUESTIONNAIRES

Questionnaire à l'attention des acteurs étatiques

• 1) *Présentation de l'étude et du contexte*

Dans le cadre de leurs thématiques de recherche respectives, l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM) et la Chaire Économie de défense de l'IHEDN conduisent une étude en commun relative à l'impact des technologies à la base de la numérisation des chaînes de production (industrie 4.0, usine du futur, *smart factory*) sur l'organisation du MCO des matériels de défense (matériels aéronautiques, navals et terrestres).

Elle a pour but d'identifier, dans un premier temps, un état des pratiques des acteurs du MCO vis-à-vis de ces technologies nouvelles. Celles-ci ont été regroupées dans les cinq « grappes de technologies » suivantes :

- impression 3D (fabrication et réparation additives...);
- Internet des objets (puces RFID, collecte massive de données, big data, cloud...);
- techniques de virtualisation (réalité virtuelle, réalité augmentée...);
- automatisation complète ou partielle de processus (robotique, cobotique, drones...).

L'étude vise également à proposer des pistes de réflexion et d'amélioration dans le domaine du MCO.

• 2) *Questions relatives au recours à ces technologies dans vos activités*

Pour chacune des « grappes de technologies » identifiées ci-dessus, merci de répondre aux questions suivantes :

- Utilisez-vous déjà cette technologie (ces technologies) dans le cadre de vos activités ? Envisagez-vous de la (les) mettre en œuvre ? De la (les) développer ?
- Le cas échéant, quelles ont été/sont/seraient les implications en matière d'organisation de votre activité de MCO ?
- Pratiquez-vous une veille active à son sujet ? Avez-vous initié des projets de recherche sur cette technologie (ces technologies) ?
- Voyez-vous un intérêt à l'utilisation de cette technologie (ces technologies) dans le MCO ? Lequel ?

- Le cas échéant, quelles sont les limites identifiées de ces technologies dans le cadre de vos activités ?
- Identifieriez-vous d'autres technologies émergentes d'intérêt pour le MCO ?

• 3) *Questions plus générales concernant la numérisation de la chaîne de production*

Organisation industrielle

- Quel est l'impact de l'intégration de ces technologies sur votre organisation ? Constituent-elles une « rupture » dans la façon de réaliser votre activité ?
- Quel est (ou pourrait) être l'impact du développement de ces technologies sur les modèles d'affaires (*business models*) des acteurs du MCO ?
- Quel est (ou pourrait) être l'impact du développement de ces technologies sur des contrats de MCO ?
- La généralisation progressive de ces technologies est-elle de nature à accroître le recours à l'externalisation ?

Financement

- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, quels sont les principaux enjeux de financement que vous identifiez ?
- Quels sont les gains potentiels envisagés ?

Formation

- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, quels sont les principaux enjeux concernant la formation (bureaux d'études et chaînes de production) ?
- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, des dispositifs de formation ont-ils été mis en place concernant votre secteur ou domaine d'activité ?

Questionnaire à l'attention des entreprises

• 1) Présentation de l'étude et du contexte

Dans le cadre de leurs thématiques de recherche respectives, l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM) et la Chaire Économie de défense de l'IHEDN conduisent une étude en commun relative à l'impact des technologies à la base de la numérisation des chaînes de production (industrie 4.0, usine du futur, *smart factory*) sur l'organisation du MCO des matériels de défense (matériels aéronautiques, navals et terrestres).

Elle a pour but d'identifier, dans un premier temps, un état des pratiques des acteurs du MCO vis-à-vis de ces technologies nouvelles. Celles-ci ont été regroupées dans les cinq « grappes de technologies » suivantes :

- impression 3D (fabrication et réparation additives...);
- Internet des objets (puces RFID, collecte massive de données, big data, cloud...);
- techniques de virtualisation (réalité virtuelle, réalité augmentée...);
- automatisation complète ou partielle de processus (robotique, cobotique, drones...).

L'étude vise également à proposer des pistes de réflexion et d'amélioration dans le domaine du MCO.

• 2) Questions relatives au recours à ces technologies dans vos activités

Pour chacune des « grappes de technologies » identifiée ci-dessus, merci de répondre aux questions suivantes :

- Utilisez-vous déjà cette technologie (ces technologies) dans le cadre de vos activités ? Envisagez-vous de la (les) mettre en œuvre ? De la (les) développer ?
- Le cas échéant, quelles ont été/sont/seraient les implications en matière d'organisation de votre activité de MCO ?
- Pratiquez-vous une veille active à son sujet ? Avez-vous initié des projets de recherche sur cette technologie (ces technologies) ?
- Voyez-vous un intérêt à l'utilisation de cette technologie (ces technologies) dans le MCO ? Lequel ?
- Le cas échéant, quelles sont les limites identifiées de ces technologies dans le cadre de vos activités ?

- Identifieriez-vous d'autres technologies émergentes d'intérêt pour le MCO ?

• 3) Questions plus générales concernant la numérisation de la chaîne de production

Organisation industrielle et modèle d'affaires

- L'émergence de ces technologies vous conduit-elle à faire évoluer votre modèle d'affaires ?
- Diriez-vous que les technologies de l'industrie 4.0 constituent une « rupture » dans la façon de réaliser votre activité ?
- Quel est (ou pourrait) être l'impact du développement de ces technologies sur des contrats de MCO ?
- La généralisation progressive de ces technologies est-elle de nature à accroître le recours à l'externalisation ?

Financement

- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, quels sont les principaux enjeux de financement que vous identifiez ?
- Quels sont les potentiels gains financiers envisagés ?

Formation

- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, quels sont les principaux enjeux concernant la formation (bureaux d'études et chaînes de production) ?
- Concernant les différentes technologies évoquées précédemment, des dispositifs de formation ont-ils été mis en place concernant votre secteur ou domaine d'activité ?

4. APPLICATIONS ENVISAGÉES DES TECHNOLOGIES

Les différentes applications des grappes de technologies rassemblées dans le tableau ci-dessous sont celles directement envisagées par les acteurs concernés (structures étatiques et industriels). Elles proviennent des entretiens réalisés et constituent le matériau de base du travail qualitatif de terrain.

Acteurs	Grappe 1 IoT et objets connectés	Grappe 2 Impression 3D	Grappe 3 Visualisation (RV et RA)	Grappe 4 Automatisation & drones
Étatiques				
DMAé [ex-SIMMAD] Aéronautique	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance prévisionnelle et traitement des données en big data pour flottes « jeunes ». • Optimisation des plans de maintenance pour les flottes « vieillissantes ». • Optimisation de la gestion des outils et outillages sur les sites de production (géolocalisation, outils intelligents). • Gestion logistique des biens (GLB). Optimisation de la réalisation des inventaires, la gestion des stocks et la traçabilité des pièces détachées dans la chaîne logistique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Production de pièces détachées pour traiter les obsolescences. Pièces simples dans un premier temps, puis pièces plus complexes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Assistance à la maintenance avec accès facilité à la documentation pendant les opérations de maintenance. • Aide à la formation des opérateurs et entretien des compétences (ex. opérations rares et délicates). 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspection des aéronefs par drone. Projet AIDA sur l'automatisation des contrôles visuels journaliers ou des inspections visuelles hebdomadaires.
SIMMT Terrestre	<ul style="list-style-type: none"> • Dématérialisation de la documentation : DEDAL : Déploiement d'écrans digitaux pour les activités de maintenance en ligne. • RFID pour saisie de données : ICAR : interface de reconnaissance automatique pour le recueil de données. • Maintenance prévisionnelle : HUMS (Prophète et Vérité). Réflexion sur parc de véhicules anciens (VAB, VBCL, Leclerc, PVP) et nouveaux (Programme Scorpion). 	<ul style="list-style-type: none"> • Production de pièces détachées sur les théâtres d'opération. Idée de base avancée de soutien opérationnel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Télemaintenance et réduction de l'empreinte logistique en opération. • Scénarios de formation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'application envisagée.

SSF Naval	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance prévisionnelle : collecte de données et traitement centralisé (ex. COSIN de Naval Group). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'application concrète envisagée à ce jour. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aide technique à la formation des maintenanciers. • Pas d'application envisagée pour l'exécution (ou l'aide à l'exécution) de tâches de maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspection des coques par des robots (plutôt pour des navires naviguant dans des conditions extrêmes). • Inspection de certaines parties internes aux navires (ex. sous-marins) par des robots. • Inspection des cales de radoub par des drones.
DGA (SMCO) Conception des équipements et définition de leur politique de soutien tout au long du cycle de vie	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance prévisionnelle grâce au traitement de données en big data (EPS Big data lancée en 2016). • Gestion logistique des biens grâce à la RFID. Intérêt évident dans la réalisation des inventaires. • Importance de la structuration des données pour intégration dans le SIL (standard ISO et aussi OTAN). Aller vers un SIL unique par milieu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Production de pièces détachées sur les théâtres d'opération et élimination des flux logistiques (métropole/ théâtre ou théâtre/ théâtre). • Gestion des obsolescences. Production de pièces détachées épuisées chez l'industriel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aide à l'exécution des tâches de maintenance. • Solutions de télémaintenance (en particulier dans le domaine naval). • Formation à la maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation de travaux dangereux, peu/pas accessibles aux opérateurs. Ex. tâches d'inspection des aéronefs. • Opérations d'inspection des matériels en OPEX.
Industriels				
SIAé Maintenance des moteurs d'avions militaires (site de Bordeaux)	<ul style="list-style-type: none"> • Outillage RFID (outils connectés) envisagé. Pas en service à Bordeaux mais existe à l'AIAé de Clermont-Ferrand. • Pas d'application de type <i>big data analytics</i> envisagée ou en cours d'expérimentation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de prototypes d'outillages pour les processus de production (amélioration de l'ergonomie des outillages). Ouverture d'un Fablab en 2016 à l'AIAé de Bordeaux. En attente d'un scanner en 2018. • Réparation additive pour les pièces de moteurs. Programme de la DGA pour le Rafale en partenariat avec une PME spécialisée dans l'additif. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation des opérateurs de maintenance. Projet en partenariat avec une école d'ingénieur (EPICITA). • Assistance aux opérateurs dans leurs opérations de maintenance. Projet supervisé par la DGA (SMCO). 	<ul style="list-style-type: none"> • Veille technologique sur la robotique. Libérer les opérateurs des tâches répétitives. Leur permettre de se focaliser sur celles qui ont le plus de plus-value. • Réflexion sur l'automatisation (complète ou partielle) des tâches d'inspection des moteurs.

<p>Airbus Avions, Hélicoptères, Satellites (civils et militaires)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permettre de collecter une donnée propre, normalisée et fiable pour alimenter les SIL. • Maintenance prévisionnelle et big data. Réduction de l'incertitude sur les pannes et donc optimisation et meilleure anticipation des plans de maintenance. • Optimisation de la gestion des stocks. • Optimisation de la gestion logistique (réduire les délais d'approvisionnement, garantir la qualité des pièces). 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de production sur lieu de demande de pièces détachées. • Réduction des délais d'approvisionnement, en particulier pour des pièces peu complexes mais qui peuvent entraîner des indisponibilités d'aéronefs (« indisponibilités idiotes »). 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation dans la conception et la production (maquette numérique). Accélération des délais de production des aéronefs. • Outil de diagnostic de pannes. Couplage avec le big data. • Formation (apprentissage et répétition des gestes, fin des doublons de compagnonnage, fin du lien panne/formation). 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobots : aide pour les tâches d'assemblage (déjà en œuvre sur les chaînes de montage des satellites). • Drones : tâches d'inspection visuelle sur les cellules d'appareils en production (déjà en œuvre sur les avions civils – site de Toulouse).
<p>Safran Military Aircraft Engines Fabrication et entretien des moteurs d'aéronefs militaires</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance prédictive : à partir des informations collectées par les capteurs, recoupage et prédiction/anticipation (stade du POC au début 2018). 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de pièces détachées pour les moteurs M88 (Rafale) et TP400 (A400M). Solidité accrue, allongement des pas de maintenance, réduction du nombre de pièces, réduction des délais d'approvisionnement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visite de sites industriels (validation des postes, implantation des usines). • Aide à la conception des outillages et des bancs d'essai. • Aide à la réalisation de tâches de maintenance. • Télémaintenance : intervention à distance sur des moteurs avec une précision accrue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Robotique dans certaines étapes de la production de moteurs neufs. • Déploiement progressif de la robotique sur les chaînes de montage pour la partie production (gain en efficacité, allègement de charge physique, augmentation de la sécurité au travail).
<p>Naval Group Systèmes navals de combats Énergies renouvelables</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse statistique approfondie des pannes ou dysfonctionnement (ex. COMPASS sur FREMM, analyse des données liées à la propulsion). • Maintenance prévisionnelle : collecte de données via instrumentation des navires de « nouvelle génération » (ex. FTI) mais aussi plus anciens. Traitement centralisé des données (ex. COSIN de Naval Group). • Optimisation de l'outil de production (sites industriels du groupe). 	<ul style="list-style-type: none"> • Réparation de pièces sur les navires (limite : taille des pièces, moindre importance du gain de masse par rapport à l'aéronautique). • Fabrication de pièces de rechanges complexes (ex. hélices). Les technologies d'impression 3D avec fil métallique sont privilégiées par rapport aux technologies avec poudre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aide à la conception (ex. études d'aménagement des navires). Salles de type CAVE, développement des Lunettes de RV. • Assistance cognitive pour des opérations de montage, de soudure, tâches d'inspection, de contrôle, de maintenance. • Aide à la planification de chantiers (en production ou en MCO). 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisation d'inspection des mâtures, des superstructures et des coques par drones. • Usage de cobots pour des tâches pénibles physiquement (ponçage, meulage, port de charge, etc.). Gain de temps, réduction des TMS, précision). Notamment usage d'équilibreurs simples en AI pour faciliter le port de charges lourdes.

<p>Nexter Systems Véhicules blindés Canons et systèmes d'artillerie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance prévisionnelle de type HUMS grâce au traitement de données en big data. Centralisation des données sur des serveurs au COS (centre opérationnel du service). 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de pièces détachées sur le terrain. Idée de pièces détachées moins robustes mais suffisantes pour assurer la continuité du service. • Prototypage facilité. 		<ul style="list-style-type: none"> • Bras robotisé pour des opérations de maintenance (projet abandonné car peu ergonomique, trop complexe).
<p>Arquus [ex-RTD] Véhicules blindés (militaires)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gestion de stocks et suivi des pièces et matériels grâce à la géolocalisation et à la technologie RFID. • Maintenance prévisionnelle de type HUMS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement des obsolescences des pièces. • Simplification de la supply chain et production de pièces détachées sur le lieu de demande. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lunettes connectées et dispositifs de RA pour les télédiagnostics et fourniture d'expertise à distance. • Formation des opérateurs à l'exécution de tâches de maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'application envisagée.

LE POTENTIEL DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 APPLIQUÉES AU MAINTIEN EN CONDITION OPÉRATIONNELLE (MCO) DES ÉQUIPEMENTS DE DÉFENSE

Josselin Droff

ICA Benoît Rademacher

Le maintien en condition opérationnelle (MCO) des matériels de défense constitue un enjeu majeur pour le ministère des Armées, du fait notamment de son impact opérationnel et des coûts afférents. De nombreuses initiatives et expérimentations ont été lancées, ou sont en cours de déploiement, dans l'objectif d'améliorer significativement, voire de transformer, la façon de réaliser les tâches de MCO, tant au niveau des acteurs étatiques que des acteurs industriels. Elles misent en particulier sur le potentiel offert par les technologies à la base de la numérisation des chaînes de valeur, qui recouvrent un spectre très large allant de l'exploitation massive de données issues des matériels de défense en service (big data) à l'utilisation de robots ou de drones pour des tâches d'inspection ou de maintenance, en passant par la fabrication additive (impression 3D).

L'objet de cette étude est de caractériser l'impact de ces technologies et des concepts sous-jacents sur l'organisation et la réalisation du MCO des matériels de défense, pour tous les milieux (matériels aéronautiques, navals et terrestres).

À cette fin, les auteurs ont réalisé une étude bibliographique sur les évolutions des pratiques et sur les évolutions des technologies concernées et ont conduit plus d'une vingtaine d'entretiens auprès d'acteurs étatiques et industriels en charge des questions de MCO.