



MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE
DES FINANCES
ET DE LA RELANCE

Liberté
Égalité
Fraternité

LES **DOSSIERS**
DE LA DGE

Études Économiques

RAPPORT **CARTOGRAPHIE DES SYSTÈMES
CYBERPHYSIQUES**

Réalisation de l'étude :

Cabinet de conseil Katalyse - Lyon

Directeur de la publication :

Thomas Courbe

Date de parution : *octobre 2020*

Édition :

Bureau de la communication - DGE

ISSN : 2727-1501

ISBN : 978-2-11-162211-1 (en ligne)



Avertissement

La méthodologie utilisée dans cette étude ainsi que les résultats obtenus relèvent de la seule responsabilité du prestataire ayant réalisé cette étude, le Cabinet de conseil Katalyse, Lyon. Ils n'engagent aucunement la Direction générale des Entreprises (DGE). Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires à la DGE.

RAPPORT COMPLET

Janvier 2020

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE

Masafumi TANAKA	DGE, Bureau des systèmes électroniques
Fabrice PERROT	DGE, Bureau des systèmes électroniques
Christophe MEILHAC	DGE, Information économique et prospective
Cédric DEMEURE	Embedded France, Directeur Thales Research & Technology France
Jean-Philippe MALICET	Embedded France, Directeur Jessica France/ CAP'TRONIC

La conduite des entretiens et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par le cabinet de conseil :

KATALYSE - LYON

11 rue Guilloud
69003 Lyon
Tél. : +33 (0)4 72 58 08 08
www.katalyse.com

Consultants :

Hervé DISSAUX, Consultant Manager, directeur de mission
Rémy POINDEXTRE, Consultant Senior
Düzgün AKAGÜNDÜZ, Consultant
Albane LECOLE, Consultante Junior
Marceline COUTANT, Consultante Junior

REMERCIEMENTS

Katalyse souhaite adresser tous ses remerciements aux interlocuteurs rencontrés au cours de cette mission. Nous tenons également à remercier spécifiquement Dominique POTIER et Charles ROBINSON, ainsi que l'ensemble des personnes ayant mis leur temps à disposition pour nous aider à définir le périmètre complexe des CPS ainsi que les experts rencontrés pour peser de la particularité de la filière. Nos travaux ont été facilités par la confiance mutuelle des acteurs tant privés que publics et leur motivation à préparer des réponses pour le devenir de la filière des CPS. Enfin, nous remercions les membres du comité de pilotage qui a été d'une aide précieuse tout au long de la mission en nous permettant de bâtir le premier document français sur le sujet.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	4
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	9
Objectifs de l'étude : décrire la filière et sa dynamique	9
PHASAGE ET MÉTHODOLOGIE	11
INTRODUCTION	13
LES CPS COMME TECHNOLOGIE CLÉ POUR LES MARCHÉS APPLICATIFS	17
Caractéristiques d'un CPS	17
Évolution des enjeux technologiques entre 2011 et 2019	18
Points clés du premier chapitre	20
LES ENJEUX TECHNOLOGIQUES PRINCIPAUX	21
Enjeux d'ingénierie, de méthode et de virtualisation	21
<i>Description de la technologie</i>	21
<i>Positionnement des acteurs</i>	23
Enjeu d'architectures horizontales et verticales	25
<i>Description de la technologie</i>	25
<i>Positionnement des acteurs</i>	28
Enjeu d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision	29
<i>Description de la technologie</i>	29
<i>Positionnement des acteurs</i>	31
Enjeu des technologies embarquées de calcul et de stockage, critiques pour l'autonomie	32
<i>Description de la technologie</i>	32
<i>Positionnement des acteurs</i>	33
Enjeu de communication, d'interopérabilité et d'interface	33
<i>Description de la technologie</i>	33
<i>Positionnement des acteurs</i>	35
Enjeu de sécurité, de sûreté et de confiance du système	37
<i>Sûreté de fonctionnement des systèmes</i>	37
<i>Sécurité des systèmes</i>	37
<i>Positionnement des acteurs</i>	38
Enjeu sur les plateformes et les smart services	39
<i>Description de la technologie</i>	39
<i>Positionnement des acteurs</i>	39
Points clés des enjeux technologiques et des défis pour la filière française	41
ÉCOSYSTÈME DES ACTEURS FRANÇAIS	42
Description globale de la chaîne de valeur des CPS	42
Les fournisseurs de composants logiciels et de technologies	44
<i>Chiffres clés</i>	44
<i>Particularité du chaînon</i>	44
<i>Enjeux technologiques à relever</i>	45
Fabricants de composants matériels	46
<i>Chiffres clés</i>	46
Cartographie des systèmes cyberphysiques	4

<i>Particularité du chaînon</i>	47
<i>Enjeux technologiques à relever</i>	47
Les concepteurs et fabricants de sous-systèmes électroniques embarqués : équipementiers et systémiers / OEMs	48
<i>Chiffres clés</i>	48
<i>Particularités du chaînon</i>	49
Les entreprises de service du numérique (ESN)	50
<i>Chiffres clés des ESN</i>	50
<i>Particularités du chaînon</i>	50
<i>Enjeux technologiques à relever</i>	52
Les sociétés d'ingénierie et conseil en technologie (ICT)	54
<i>Chiffres clés</i>	54
<i>Particularités du chaînon</i>	54
<i>Enjeux technologiques à relever</i>	55
Estimation du poids de la filière française	57
APPLICATIONS DES CPS DANS TROIS MARCHÉS APPLICATIFS	59
Applications dans l'industrie	59
<i>Description de la filière</i>	59
<i>Les blocs technologiques prioritaires</i>	60
La production en temps réel	60
Communication et architecture des systèmes	61
Roadmap des CPS vs. Roadmap Industrie du Futur	62
Pénétration des CPS dans les industries traditionnelles et les petites entreprises	62
<i>Place des CPS et positionnement dans la chaîne de valeur</i>	64
<i>Structuration spécifique et réponse aux défis</i>	65
<i>Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025</i>	66
<i>Synthèse</i>	67
Applications dans le bâtiment	70
<i>Description de la filière</i>	70
<i>Les blocs technologiques prioritaires</i>	71
L'interconnexion et la réversibilité des CPS	71
Intégration des CPS dans un environnement aux contraintes atypiques	72
Responsabilités, droits et devoirs	73
<i>Place des CPS et positionnement de la valeur dans la chaîne</i>	73
<i>Structuration spécifique et réponse aux défis</i>	74
Place des acteurs historiques et du rôle des professionnels du bâtiment	75
Intégration des start-up dans un environnement concurrentiel riche et complexe	75
Un écosystème encore fragmenté, entre travail en silo et premiers rapprochements	76
Articulation des acteurs des CPS à ceux du BTP, de l'énergie et du numérique	76
<i>Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025</i>	77
<i>Synthèse</i>	79
Applications dans l'automobile	81
<i>Description de la filière</i>	81
<i>Les blocs technologiques prioritaires</i>	85

Précision des capteurs et fusion multicapteur	85
Intelligence artificielle dans les véhicules autonomes	86
Simulation et modélisation des grands systèmes	86
Connectivité et sécurité	86
Puissance de calcul dans un environnement énergétique contraint	87
Communication fiable et gestion des données personnelles	88
<i>Place des CPS et positionnement de la valeur dans la chaîne</i>	89
<i>Structuration spécifique et réponse aux défis</i>	89
<i>Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025</i>	90
<i>Synthèse</i>	90
Points clés à retenir de l'analyse des filières :	93
<i>Sur le sujet de la production intégrant des CPS</i>	93
<i>Les CPS dans le bâtiment</i>	93
<i>L'intégration des CPS dans la filière de l'automobile :</i>	94
INITIATIVES INTERNATIONALES	95
Le développement des CPS en Allemagne	95
<i>Les facteurs clés de succès</i>	95
Le Fraunhofer et le transfert technologique	95
La stratégie gouvernementale	97
<i>Conclusion</i>	99
Le développement des CPS en Chine	100
<i>Les facteurs clés de succès</i>	100
L'investissement public	100
La volonté de réduire la dépendance internationale	101
<i>Conclusion</i>	103
Le développement des CPS en Corée du Sud	104
<i>Les facteurs clés de succès</i>	104
Une industrie fortement robotisée et dominée par de grands conglomérats	104
Le plan Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy	104
Le développement des semi-conducteurs	105
Le développement des <i>smart cities</i> en Corée du sud (focus sur la ville de Songdo)	105
<i>Conclusion</i>	106
Le développement des CPS aux États-Unis	107
<i>Les facteurs clés de succès</i>	107
La collaboration interagence grâce au programme Networking and Information Technology Research and Development (NITRD)	107
La National Science Foundation et les CPS	108
Les relations entre les États et les constructeurs automobiles	109
La réglementation de la mobilité autonome	110
<i>Conclusion</i>	111
Le développement des CPS en Israël	112
<i>Les facteurs clés de succès</i>	112
La richesse de l'écosystème des start-ups	112
L'attrait des géants de la technologie	114

L'accompagnement de l'État israélien	114
Les partenariats internationaux	114
<i>Conclusion</i>	115
Synthèse des initiatives internationales	116
RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES	118
<i>Rappels des enjeux</i>	118
Des enjeux technologiques pour continuer à être dans la course :	118
Des enjeux économiques différents selon les marchés cibles :	118
Des enjeux de musculation de la filière par un appui des agences et de l'État	119
Des enjeux métiers :	120
<i>Descriptif des recommandations</i>	120
ANNEXES	123
<i>Exemple des CPS dans le secteur de la santé</i>	123
Description du secteur	123
Place des CPS dans ce secteur	123
Enjeux spécifiques des CPS	125
<i>Méthode de calcul du nombre d'emplois dans la filière CPS</i>	126
<i>Les actions recommandées pour une filière des CPS forte et rayonnante :</i>	127
SIGLES	140
INDEX DES ILLUSTRATIONS	141
Index des tableaux	141
Index des graphiques	141
Index des figures	141

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La présente étude, pilotée par la DGE et cofinancée par l'association Embedded France, a pour objet d'enrichir la réflexion globale des pouvoirs publics et des professionnels sur les filières des systèmes cyberphysiques (CPS). Elle contribuera à alimenter une politique publique promouvant le développement de la filière des CPS en France. Par ailleurs, elle sera une source précieuse d'informations pour les domaines technologiques connexes aux CPS.

Objectifs de l'étude : décrire la filière et sa dynamique

L'objectif de cette étude est d'établir une cartographie détaillée et actualisée des technologies et des acteurs des CPS au niveau mondial (comprenant notamment les clients finaux, les intégrateurs, les fournisseurs de technologies matérielles et logicielles, les sociétés de services, les laboratoires de recherche, les organismes favorisant la dissémination, etc.), ainsi que des relations d'interdépendance qui existent entre eux (description de la chaîne de valeur).

Cette étude décrit la chaîne de valeur de la filière française des CPS en étudiant son organisation, son positionnement, ses priorités technologiques, ses acteurs et ses produits. Elle développe une analyse économique des acteurs majeurs des CPS pour les principaux secteurs d'activité concernés et une analyse comparative entre la France et quelques pays leaders sur les CPS.

Cette étude évoque également de nombreux enjeux, ceux-ci ne peuvent être restreints aux seuls enjeux technologiques. Même si les enjeux technologiques ont un poids important pour le devenir de la filière, ils ne suffisent pas à la réussite des CPS français. Les enjeux économiques et sociaux (notamment les compétences) jouent également un très grand rôle.

Enfin, l'étude propose des recommandations aux pouvoirs publics en fonction de l'état actuel et à venir de l'écosystème, et de la structuration de la filière.

PHASAGE ET MÉTHODOLOGIE

La méthodologie s'appuie sur trois phases permettant de répondre aux attentes d'Embedded France et de la DGE. Ces trois phases permettent notamment d'obtenir l'avis d'acteurs français sur la question, mais également de donner un éclairage sur la puissance française dans ce domaine. Il apparaît une difficulté de cartographier la filière des systèmes cyberphysiques CPS par un découpage autour des codes NAF ou d'autres classifications statistiques. La filière se trouve être une partie des codes 26 (fabrication de produits informatiques électroniques et optiques), 28 (fabrication de machines et équipements), mais également 62 (programmation, conseils et autres activités informatiques). À cela s'ajoutent les intégrateurs pouvant se trouver essentiellement dans les codes NAF de l'industrie.

Cette difficulté a obligé le Copil à s'appuyer sur un contour plutôt flou du périmètre et obligeant un parti pris sur le périmètre d'étude et la capacité d'analyser chacune des briques formant cette filière.

Figure 1 – Synopsis de la mission

Phase 1 : État de l'art et analyse de la chaîne de valeur des CPS	Phase 2 : analyse comparative et évolution de l'écosystème	Phase 3 : recommandations et écriture du rapport final
Identification du champ de l'étude Analyse bibliographique pour définir le périmètre des CPS Description des éléments principaux des CPS Entretiens avec une sélection d'acteurs	Constitution des chaînes de valeur sur trois marchés Définition des enjeux des CPS Calcul de la taille de marché Comparatif de l'écosystème existant avec d'autres pays Définition et réalisation des scénarii d'évolution	Réunion de préparation des préconisations Identification et formalisation des pistes d'actions Création du rapport final

Plusieurs types de moyens ont été employés pour réaliser l'ensemble de cette étude.

- Analyser une bibliographie de thèses et documents de recherche, mais également des rapports européens dans le but de définir le périmètre des CPS et les technologies les plus avancées.
- Vingt-quatre entretiens ont été réalisés pour :
 - déterminer les familles des technologies impactantes ;
 - appréhender les évolutions des filières analysées au regard des apports des CPS ;
 - analyser les points forts et faibles des acteurs des CPS et comment cela impacte en affaiblissant ou en renforçant les filières.

Une réunion de travail sur les conclusions de l'étude et des recommandations a été proposée pour permettre à des entreprises et des laboratoires de la filière de les modifier.

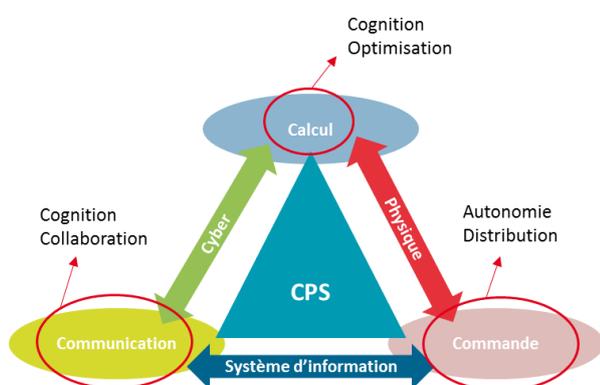
INTRODUCTION

La **transformation digitale** actuelle bouleverse la façon dont nous concevons l'utilisation des nouvelles technologies. De plus en plus d'appareils et d'objets innovants intègrent des technologies leur permettant **d'interagir avec leur environnement et d'échanger des informations**. Actuellement, les secteurs industriels sont en train de s'engager dans de grands chantiers techniques et technologiques sur ce sujet. C'est le cas des véhicules autonomes dans le domaine automobile, des avions connectés dans celui de l'aéronautique, ou encore des réseaux électriques intelligents pour l'énergie. Ces grandes évolutions technologiques ont un enjeu commun : la maîtrise de systèmes connectés et intelligents appelés systèmes cyberphysiques (CPS).

L'engouement pour **l'Internet des objets (IoT)** également qui est une partie des CPS montre bien l'importance de ce sujet. Selon Strategy Analytics¹, l'étude estime le marché à 150 milliards de dollars en 2016 et l'opportunité à 550 milliards de dollars en 2025, soit 11 % du marché global du numérique en prenant en compte les composants, les matériels, les logiciels et les services nécessaires à la mise en place d'applications d'internet des objets. Ici les CPS prennent toutes leurs valeurs en proposant une **évolution des fonctionnalités possibles** : gestion de l'énergie dans les bâtiments, amélioration et automatisation dans le domaine de l'industrie, soutien à l'agriculture, développement de nouvelles modalités de transport ou e-santé.

Le **concept de Cyber-Physical Systems, ou Systèmes Cyberphysiques en français**, a été défini en 2006 lors de travaux réalisés par la National Science Foundation américaine, et notamment par le professeur Edward LEE de l'université de Berkeley, en Californie. Des travaux similaires par la Deutsche Akademie Der Technikwissenschaften (Acatech) ont permis de détailler dès 2010 le périmètre des CPS. Les systèmes cyberphysiques² sont définis comme des **systèmes coopérants et réactifs**, car continuellement soumis aux contraintes imposées par leur **environnement physique et virtuel**. Ils sont l'évolution des systèmes embarqués puisqu'ils intègrent une partie physique, un système d'information, mais également une partie cyber.

Figure 2 - Champs d'action d'un CPS



Source : O. Cardin et D. Trentesaux

Les CPS sont des « systèmes embarqués intelligents » qui rendent les produits encore plus interconnectés, interdépendants, collaboratifs et autonomes. Ils permettent d'améliorer ou de proposer de nouvelles fonctionnalités ou de nouveaux services. Ainsi la définition proposée par MONOSTORI en 2014 synthétise la complexité des CPS :

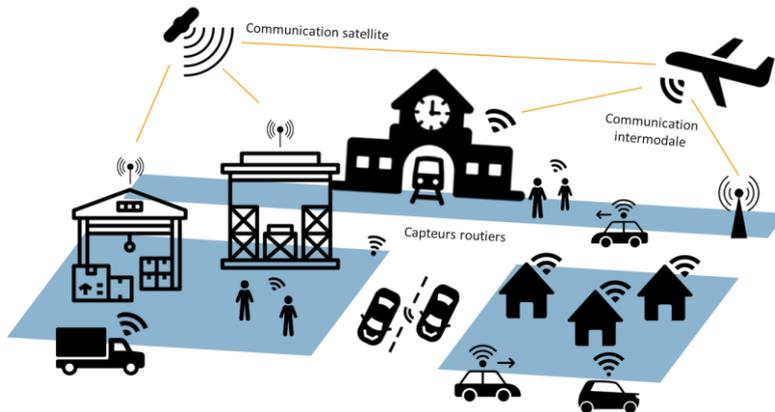
« Les CPS sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacités de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau ».

¹ <https://www.usine-digitale.fr/editorial/l-internet-des-objets-un-marche-de-seulement-550-milliards-de-dollars-en-2025.N394582>

² Acatech, Cyber-Physical Systems : Driving force for innovation in mobility, health, energy and production (december 2011)

Dans la figure suivante sont présentés des exemples d'activités soutenues par des CPS. Nous pouvons remarquer que les CPS du fait des caractéristiques particulières qu'ils proposent, envahissent notre environnement et modifient de manière radicale les différents secteurs de l'économie en bouleversant les positions établies des acteurs dans l'écosystème.

Figure 3 – Les CPS dans l'environnement urbain

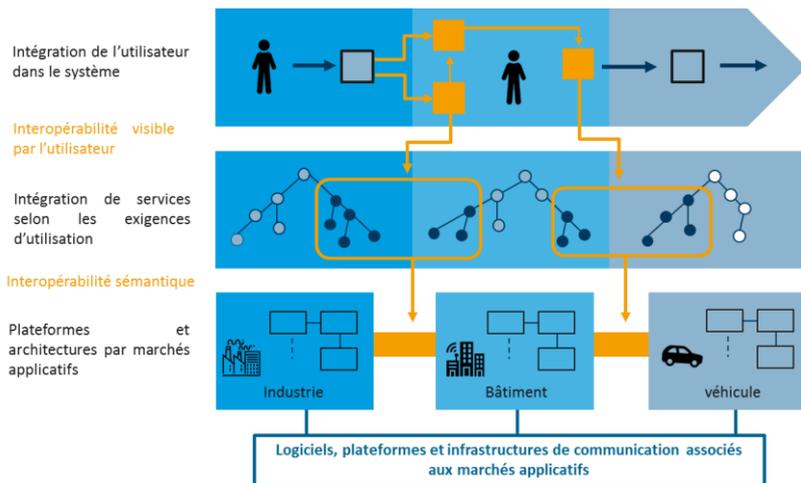


Source : Modélisation de Katalyse

De plus, les CPS sont dits « **intelligents** », car qu'ils embarquent un ensemble de capteurs pour piloter le système. Ils spécifient un **comportement souhaité** et déterminent quelles **fonctions** déployer.

De même, un système cyberphysique possède plusieurs **sous-systèmes** qui interagissent pour réaliser différentes **fonctionnalités**. En plus, des contraintes liées à l'électronique embarquée telles que l'encombrement, la consommation d'énergie, la sécurité ou encore la puissance de calcul disponible, ce système cyberphysique doit intégrer plusieurs niveaux de couche comme le montre l'illustration suivante pour déployer l'interopérabilité.

Figure 4 – Interopérabilité des systèmes



Source : Acatech

C'est pourquoi les CPS se révèlent bien **plus complexes** que les systèmes embarqués, mais proposent des capacités spécifiques :

- des systèmes embarqués liés à un **environnement physique en temps réel** par des capteurs et des actionneurs ;
- la création de **systèmes de systèmes** par la mise en réseau de systèmes embarqués grâce notamment à des architectures spécifiques ;
- le développement de **l'autonomie et de l'adaptabilité du système** ;
- des systèmes coopératifs avec une **distribution des tâches et des contrôles** ;
- une coopération plus fine **entre l'humain et la machine**.

L'évolution des systèmes embarqués vers les CPS nous oblige donc à repenser notre **approche d'innovation technologique** les concernant, mais également les modalités d'intégration et de développement dans les filières économiques. C'est d'ailleurs dans ce sens que sont développés différents programmes européens comme Artemis ou Ecsel. **Des enjeux de tous types naissent alors : qu'ils soient technologiques, économiques, politiques, mais également sociaux.**

Le précédent rapport français de Dominique POTIER sur les briques génériques du logiciel embarqué et l' Embedded Systems Common Technical Baseline du CEA avaient déjà montré, en 2011, le poids de briques génériques dans ce domaine pour la réussite de la filière française. Le rapport de l'OPIEC (Observatoire des métiers du numérique, de l'ingénierie, du conseil et de l'événement) avait, quant à lui, souligné des besoins en compétences et en métiers.

Au nombre de huit, celles-ci appelaient à jouer un rôle important dans la course à l'innovation et la compétitivité de l'ensemble de l'industrie. Cependant, pour répondre aux nouvelles exigences et capacités des systèmes cyberphysiques, la France doit se doter **d'une nouvelle réponse** en adéquation avec une large variété de technologies. Les CPS apparaissent comme des structures hétérogènes incluant des systèmes physiques, électriques et de software. Ce n'est donc plus une simple somme de briques génériques, mais une vision systémique de l'utilisation de technologies qu'il faut avoir.

Il en découle **sept enjeux technologiques principaux** pour répondre aux différentes strates que comporte un environnement de CPS :

- les technologies de conception et de modélisation ;
- les architectures horizontales et verticales ;
- les technologies d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision ;

- les technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie ;
- les technologies de communication, d'interopérabilité et d'interfaçage (notamment IHM) ;
- les technologies de sécurité, de sûreté et de confiance du système ;
- les plateformes et les smart services.

La **complexité des technologies** relevée est d'autant plus grande que la plupart d'entre elles sont encore au **stade de la recherche applicative**. La plupart des solutions ne sont pas encore arrêtées laissant un champ des possibles ouverts sur de nombreux sujets. C'est pourquoi ce rapport fera état des points critiques à prendre en compte sur chacune des familles technologiques et identifiera la place de la filière française dans la compétition internationale.

Derrière le développement obligatoire des familles de technologies citées précédemment, d'autres enjeux notamment économiques sont à relever. L'intégration des solutions CPS dans de nombreuses filières apparaît aujourd'hui comme **primordiale dans la survie ou le développement des filières françaises** (notamment celle de la mobilité, du bâtiment et de la production). Les cartes y sont rebattues à l'intérieur de la chaîne de valeurs et les relations dans l'écosystème se voient redessiner. PME comme donneurs d'ordre ont à **trouver un positionnement dans ce nouveau paradigme**, notamment du fait du besoin d'interdisciplinarité, de montée en compétence ou encore de recherche de nouveaux produits et services. L'écosystème des acteurs français se doit de répondre aux enjeux technologiques particuliers selon leurs places dans la chaîne de valeurs, et se doit de revoir son niveau de coopération : développement, production et exploitation, opération et maintenance, développement logiciel spécifique, gestion des données...

C'est pourquoi, ce rapport s'appuiera à décrire la filière, ses évolutions, mais également l'importance des CPS dans le développement de celle-ci. Pour compléter, cette première analyse, ce rapport montrera comment dans trois marchés applicatifs, les CPS se positionnent et obligent à repenser ces marchés sous un nouvel angle.

- **La smart production :** les CPS sont une clé maitresse du développement de l'Usine du futur dans les entreprises françaises. La mise en réseau global des systèmes et des opérateurs de fabrication sont les points cruciaux pour la réussite de l'intégration des CPS. La diminution du besoin énergétique, l'augmentation de l'efficacité des systèmes et de leur efficacité et le degré de flexibilité sont des résultats indéniables de l'intégration des CPS ;
- **Le secteur de smart building :** les CPS augmenteront le confort, l'efficacité énergétique, mais également la sécurité. Cependant, ce marché porté par la filière du bâtiment est encore loin de la maturité d'intégration de technologies disruptives que l'on peut par exemple retrouver dans l'aéronautique ou l'automobile ;
- **Le secteur de l'automobile :** la majorité des innovations dans le secteur automobile relève des CPS aussi bien dans le confort de conduite, la sécurité ou l'efficacité. Dans les années futures, la place des CPS devrait fortement augmenter notamment du fait de la législation européenne et du développement des véhicules semi-autonomes dans le parc français qui impose une prise en compte de l'interaction du véhicule autonome avec d'autres véhicules, mais également avec son environnement. La difficulté est ici de savoir comment les entreprises françaises interagissent entre elles pour proposer avec leurs homologues européens des solutions innovantes. L'autre question est de savoir si la valeur ajoutée de ses nouveaux véhicules restera dans les mains des constructeurs ou si elle évoluera vers d'autres acteurs de la filière ou de nouveaux acteurs.

Pour répondre aux interrogations précédentes, les États ont choisi depuis plusieurs années des stratégies de développement directes ou indirectes de l'écosystème des acteurs des CPS. Le rapport propose cinq benchmarks mettant en lumière le besoin de la **mise en place de cadres et de politiques proactives** dans le domaine : Allemagne, Chine, Corée du Sud, États-Unis et Israël. Sans une réelle politique de développement des CPS à tous les stades, il sera impossible de proposer les conditions (infrastructures critiques, règles et modalités d'utilisation, financement de l'innovation, accompagnement des PME...) pour développer les acteurs sur le territoire français.

LES CPS COMME TECHNOLOGIE CLÉ POUR LES MARCHÉS APPLICATIFS

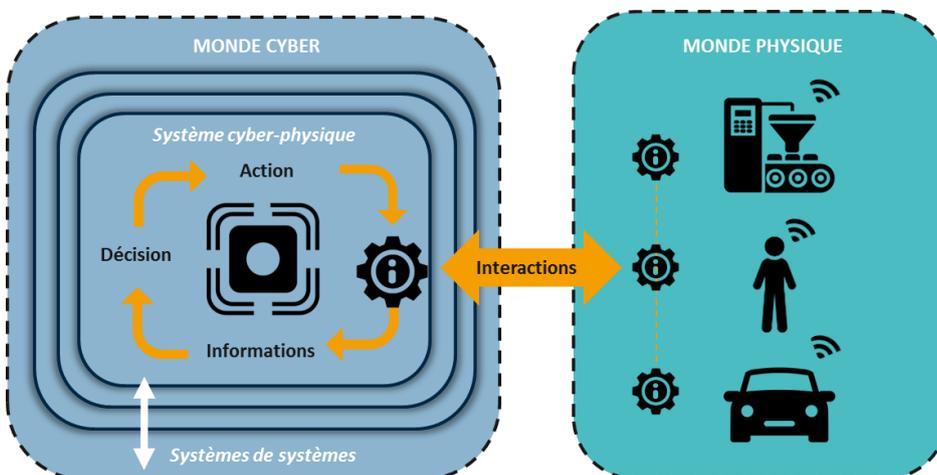
Caractéristiques d'un CPS

Les **systèmes cyberphysiques (CPS)** revêtent différentes formes. Il peut s'agir d'une machine dans un atelier, d'un réacteur d'avion ou d'une climatisation. Dans l'automobile, le scanner laser Scala de Valeo permet au véhicule autonome d'identifier tout obstacle en mouvement tel que les piétons et les autres véhicules en circulation. Dans la logistique, la longueur modulaire de Boa Concept reconnaît la typologie d'un circuit pour proposer au transporteur le meilleur chemin pour livrer un colis. Enfin, dans l'agriculture, le capteur hyper spectral intégré sur un drone, développé par Carbon Bee, permet de détecter les maladies d'une culture pour traiter les plantes à la demande.

Ces quelques exemples illustrent la **prolifération des systèmes cyberphysiques** dans notre société. Présents dans divers domaines applicatifs, ils fournissent à leurs produits hôtes des capacités de calcul, de contrôle et de communication. Ces diverses applications favorisent le développement de fonctionnalités disruptives dont l'impact sociétal et économique semble sans précédent.

Les logiciels intégrés dans les CPS **collectent et traitent des données** en provenance des réseaux dans lequel ils évoluent. Ils utilisent des capteurs et des actionneurs pour communiquer entre eux et interagir avec le monde physique, et donc avec les opérateurs humains. Ainsi, les CPS relie le **monde cyber et le monde physique via des boucles itératives et simultanées** pilotées par des systèmes d'information.

Figure 5 – Interactions entre monde cyber et monde physique



Source : modélisation de Katalyse

Les avancées dans le développement de l'intelligence artificielle et les progrès dans les logiciels informatiques accroissent les **fonctionnalités implémentées dans ces systèmes**. Ils regroupent plusieurs briques technologiques, aussi bien logicielles que matérielles. Ces briques technologiques interagissent en prenant en compte différentes informations afin de réaliser des **opérations complexes**, de façon plus ou moins automatique. Ces technologies sont le résultat d'un haut niveau d'intégration entre le monde physique et cyber.

Les CPS sont « **intelligents** », c'est-à-dire qu'ils embarquent un ensemble de capteurs pour piloter le système. Ils spécifient un comportement souhaité, puis ils déterminent quelles fonctions déployer.

Ainsi, les CPS prennent en compte les contraintes liées à l'électronique embarquée telles que l'encombrement, la consommation d'énergie, la sécurité ou encore la puissance de calcul disponible. L'association du système électronique, de ses capteurs et du logiciel crée donc l'intelligence globale du système.

L'information extérieure est à la fois captée par le dispositif et interprétée afin d'optimiser leur fonctionnement. Les CPS s'appuient sur des réseaux de systèmes numériques interconnectés. Ils interagissent avec leur environnement et sont capables de **collecter et de traiter les données des capteurs du réseau** dans lequel ils évoluent. C'est le cas des compteurs intelligents par exemple. Ces nouvelles générations de compteurs électriques permettent de suivre en détail, et en temps réel, la consommation électrique d'un bâtiment ou d'une habitation. En tant qu'outils communicants, ils transmettent par les réseaux (courant porteur, internet, GSM...) les informations recueillies. Ainsi, les compteurs intelligents participent à la transformation des réseaux de distribution électrique en réseaux intelligents, également appelés « *smart grids* ».

Les systèmes cyberphysiques (CPS) sont des systèmes qui reposent sur l'intégration d'algorithmes de calcul et de composants physiques. Les progrès apportés par les CPS permettent une **augmentation de la capacité, une adaptabilité, une évolutivité, une résilience, une sûreté, une sécurité et une convivialité** qui dépasseront de loin les simples systèmes embarqués d'aujourd'hui.

Le concept de systèmes cyberphysiques élargit donc la définition de **l'Internet des objets (IoT)**, car les périphériques en réseau au sein des CPS communiquent non seulement entre eux, mais sont également des entités autonomes et doivent communiquer et se contrôler mutuellement.

Alors que l'IoT vise la connectivité fonctionnelle et les relations dans l'espace physique (entre les entités analogiques et numériques), les systèmes cyberphysiques créent une **synergie entre les entités de l'espace physique et du cyberspace**, en intégrant du matériel, des *middlewares* et des *cyberwares* analogiques et informatiques.

Le contrôle des opérations de l'IoT est généralement lié à l'objectif et à la mise en œuvre du ou des systèmes. Le contrôle du fonctionnement du CPS au plus haut niveau provient des **processus réels** qu'il met en œuvre, ou supporte, en prenant en compte son environnement. Si nous prenons l'exemple de la voiture autonome, la voiture en question ainsi que les autres voitures et les piétons sont intégrés dans les éléments à prendre en compte.

En plus d'être résilients et adaptatifs, tout comme l'IoT, les CPS (ou ses composants) peuvent évoluer de **manière autonome** et se dupliquer de manière autonome³.

Évolution des enjeux technologiques entre 2011 et 2019

Le rapport de 2010 s'appuie sur une étude ayant retenu « **huit Priorités technologiques** pour la maîtrise des briques génériques du logiciel embarqué » :

- conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués ;
- vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués ;
- virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core ;
- architectures réparties, middleware et réseaux embarqués ;
- plateformes logicielles embarquées de service ;
- IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués ;
- bibliothèques génériques pour le traitement (signal, image, contrôle ...) embarqué ;
- gestion de l'énergie embarquée.

En quasiment dix ans, les systèmes embarqués devenus des CPS ont répondu à des **problématiques bien plus larges et plus complexes intensifiant la course aux briques technologiques et aux nouvelles**

³ Current drivers and obstacles of synergy in cyber-physical systems design, Gerritsen, Horvath, Delft University of Technology, ResearchGate.

solutions, comme le montre le tableau suivant. Les thématiques de 2019 montrent l'étendu des questions aujourd'hui posées à la filière des CPS et les enjeux pour les marchés les utilisant notamment ceux étudiés dans ce document : l'automobile, l'industrie et le bâtiment.

Tableau 1 – intégration des briques technologiques de 2010 dans les thématiques plus larges choisies en 2019

		BRIQUES TECHNOLOGIQUES 2019						
		Ingénierie, méthode et virtualisation	Architectures horizontales et verticales	Autonomie, robotisation, analyse des données et support à la décision	Technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie	Communication, interopérabilité et interfaçage	Sécurité, sûreté et confiance du système	Plateformes et les smart services
BRIQUES TECHNOLOGIQUES 2010	Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués	X						
	Vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués						X	
	Virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core	X		X	X			
	Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués		X					
	Plateformes logicielles embarquées de service							X
	IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués					X		
	Bibliothèques génériques pour le traitement (signal, image, contrôle...) embarqué				X			
	Gestion de l'énergie embarquée			X				

Points clés du premier chapitre

Les CPS sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacités de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau.

Les CPS se révèlent bien **plus complexes** que les systèmes embarqués, mais proposent des capacités spécifiques :

- des systèmes embarqués liés à un **environnement physique en temps réel** par des capteurs et des actionneurs ;
- la création de **systèmes de systèmes** par la mise en réseau de systèmes embarqués grâce notamment à des architectures spécifiques ;
- le développement de l'autonomie et de l'adaptabilité du système ;
- des systèmes coopératifs avec une distribution des tâches et des contrôles ;
- une coopération plus fine entre l'humain et la machine.

Il en découle sept enjeux technologiques principaux pour répondre aux différentes strates que comporte un environnement de CPS :

- les technologies de conception et de modélisation ;
- les architectures horizontales et verticales ;
- les technologies d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision ;
- les technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie ;
- les technologies de communication, d'interopérabilité et d'interfaçage (notamment IHM) ;
- les technologies de sécurité, de sûreté et de confiance du système ;
- les plateformes et les smart services.

LES ENJEUX TECHNOLOGIQUES PRINCIPAUX

Sept enjeux technologiques principaux découlent des fonctionnalités attendues par les CPS :

- les technologies d'ingénierie, de méthode et de virtualisation ;
- les architectures horizontales et verticales ;
- les technologies d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision ;
- les technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie ;
- les technologies de communication, d'interopérabilité et d'interfaçage (notamment IHM) ;
- les technologies de sécurité, de sûreté et de confiance du système ;
- les plateformes et les smart services.

Dans ce chapitre, il sera décrit pour chaque enjeu :

- une définition succincte de l'enjeu pour délimiter la complexité du problème ;
- les points critiques où les acteurs de la recherche et de l'innovation cherchent des solutions technologiques ;
- un état des lieux du positionnement de la filière française.

Ce descriptif est synthétisé à la fin du chapitre par un graphique qui pondère le poids de la filière française au niveau de quatre critères :

- la recherche amont ;
- le transfert de technologie ;
- l'écosystème existant ;
- la place de la France par rapport à la concurrence mondiale.

Enjeux d'ingénierie, de méthode et de virtualisation

Description de la technologie

Les CPS sont des systèmes complexes. C'est-à-dire « des ensembles constitués d'un grand nombre d'entités en interaction »⁴. Ceci rend particulièrement difficile la prévision de leur comportement par un observateur. Or les ingénieurs et designers ont justement besoin de telles prévisions pour optimiser la conception de ces systèmes. Actuellement, ils les obtiennent par des méthodes informatiques dont le temps de calcul augmente très rapidement avec le nombre d'éléments à prendre en compte. Pour atténuer ce défaut, l'une des stratégies utilisées consiste à essayer d'obtenir ces prévisions à partir des seules parties influentes du système. Cependant, plus le système est complexe et plus les concepteurs éprouvent des difficultés à identifier, avec certitude, ces parties parmi celles qui peuvent être négligées. Par conséquent, l'application de cette stratégie atteint ses limites, d'autant plus que les systèmes qui nous entourent tendent à devenir de plus en plus complexes. Il est enfin important de dissocier deux notions, composant toutes deux de l'ingénierie des CPS :

- l'ingénierie des systèmes (ou « *system engineering* »), a pour objectif de maîtriser et de contrôler la conception de systèmes dont la complexité ne permet pas le pilotage simple. Par système, on entend un ensemble d'éléments humains ou matériels en interdépendance

⁴ Encyclopédie libre Wikipédia. Système complexe. http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_complexe.

les uns les autres et s'appuyant sur des technologies variées : mécanique, électronique, réseaux...

- l'ingénierie logicielle (ou « *software engineering* ») couvrant l'ensemble des procédures systématiques qui permettent d'arriver à ce que des logiciels complexes correspondent aux attentes du client, soient fiables, aient un coût d'entretien réduit et de bonnes performances tout en respectant les délais et les coûts de construction.

Les technologies actuelles reposent notamment sur des méthodes de « **model-based design** » (MBD). Depuis une quinzaine d'années, cette méthodologie change complètement le mode de conception et permet de valider et vérifier le comportement des systèmes en les modélisant à chaque étape de la conception. Des solutions abouties existent déjà dans ce domaine, notamment pour la conception de systèmes embarqués. Quelques solutions ont déjà été implémentées dans des CPS, par exemple grâce aux outils Matlab, Scilab et Simulink. Cependant, des progrès doivent encore être réalisés afin de pouvoir définir des objectifs multiples et d'intégrer des modèles hétérogènes. De plus, ce mode de conception doit également pouvoir permettre de faire disparaître la limite entre les étapes de **conception et d'exploitation**.

Il faut pouvoir assurer une relation dynamique entre les différents composants. C'est là qu'intervient la « **modalité de composition** » du système, issu de l'anglais « *composability* ». Elle permet de gérer les relations entre les différents composants. Dans le cadre d'un CPS, cette relation doit pouvoir être dynamique en fonction des besoins de l'utilisateur ou de l'action à exécuter. Le niveau atteint quand il s'agit de la modalité de composition est encore à améliorer et dépend beaucoup des avancées dans les domaines de la modélisation (notamment les métamodèles) et la simulation.

Les méthodes de modélisation peuvent conduire à la mise en place d'un **jumeau numérique**, ou « *digital twin* ». Ces copies numériques 3D reposent sur des modèles et évoluent avec le système réel grâce aux données collectées. De plus en plus utilisé dans le domaine industriel, il est l'un des enjeux clés de l'usine 4.0 puisqu'il permet de modéliser le système de production ou l'usine dans son intégralité. Cette technologie prend en compte toutes les ressources (humaines, matérielles, industrielles) et leurs interactions avec l'usine.

La reproduction virtuelle d'un processus complexe a initialement été développée dans les domaines de l'aéronautique et de la défense afin de faciliter la fabrication de systèmes complexes. Cette technologie est en train de se répandre dans l'ensemble des secteurs industriels, du fait des exigences grandissantes en termes d'efficacité et de rapidité des délais de production et des besoins d'analyse des environnements complexes. Aussi, il semble aujourd'hui indispensable de disposer d'un environnement collaboratif et interconnecté, exploitant les technologies de l'intelligence artificielle, pour améliorer l'efficacité les phases d'ingénierie et optimiser l'exploitation des infrastructures, notamment lors d'opérations de maintenance prédictive. En effet, les CPS sont des systèmes qui évoluent lors de leur cycle de vie (plutôt long par rapport à ce qui se faisait). Cette évolution brouille la limite traditionnelle entre conception et exécution. C'est l'un l'objectif de la méthodologie **devOps**, qui existe depuis 2007. Ce mouvement a pour but d'unifier les parties développement et administration d'un système en informatique. Cette méthodologie est progressivement adoptée dans le cadre des CPS et vient rompre complètement la séparation entre conception et exploitation/exécution afin de faciliter l'amélioration continue des systèmes.

Un autre aspect de la modélisation des CPS est la problématique de l'interdisciplinarité puisque les CPS ont des enjeux énergétiques, électroniques, mécaniques, informatiques, etc. La modélisation est un domaine des mathématiques existant depuis de nombreuses années et très avancée. Cependant, elle se concentre généralement sur un domaine particulier et ses codes varient d'un domaine à l'autre. La multidisciplinarité des CPS demande donc de s'intéresser à la **modélisation interdisciplinaire** afin de modéliser ces systèmes complexes. Ce champ des mathématiques qui vise à développer des modèles couvrant plusieurs disciplines est assez récent. De premiers travaux sur le sujet existent, notamment autour de la problématique des systèmes cybertroniques.

La simulation facilite la mise en place de CPS, car il permet :

- de simuler des scénarii d'utilisation d'un CPS. Selon Toshiba, 15 milliards de kilomètres sont nécessaires en roulage pour valider un véhicule autonome, notamment en prenant en compte la modélisation du trafic et des interactions avec des cas (chantiers, pannes de

système, comportements de voitures classiques...). La simulation apparaît primordiale pour la vérification des comportements des CPS⁵.

- de simuler l'équipement plus en détail, en incluant les flux d'information ; notamment les algorithmes et fonctions nécessaires à la prise de décision (et à la navigation pour les transports utilisant les CPS), depuis le capteur jusqu'à l'action ;
- de générer des tests et des modifications sur les machines de manière virtuelle, sans impacter les situations réelles comme la production en cours ;
- d'auditer la sûreté et la sécurité des systèmes, en mettant en avant les dysfonctionnements possibles ;
- de simplifier l'accès à l'information en offrant des possibilités supplémentaires de surveillance à distance et de télémaintenance. En reliant les capteurs des outils de production à leurs jumeaux numériques ou simulateurs, il est possible de surveiller directement des CPS et de leurs composants. Cette surveillance centralisée permet de prévoir les opérations de maintenance et d'optimiser leur réalisation, par exemple.

Ainsi, ces jumeaux numériques facilitent, par exemple, l'exploitation des CPS et leur déploiement, dans les industries notamment⁶. Le développement de **ces modèles pour des systèmes hétérogènes de grande dimension** est une discipline assez récente et demande la mise en place de métamodèles. Celles-ci permettent de modéliser et définir les structures des différents modèles existants et utilisés. Ils sont essentiels afin de structurer correctement un système, particulièrement quand celui-ci est hétérogène. Ces métamodèles doivent encore être développés afin de répondre aux enjeux soulevés par les CPS.

Pour permettre l'intégration de nouveaux composants au cours du cycle de vie du CPS, il est essentiel de pouvoir modéliser correctement le système, qui est, par essence, hétérogène.

Pour ce qui est de l'**optimisation**, elle représente un enjeu clé puisqu'elle permettra d'augmenter les capacités des CPS. L'optimisation est un domaine des mathématiques très abouti quand il s'agit de problématiques ayant un seul objectif. Cependant, dans le cadre des CPS, il faut développer des outils et méthodologies d'**optimisation**. Dans le cadre des CPS, ces solutions ne peuvent pas toujours être mises en place et la recherche dans ce domaine doit encore évoluer, en lien avec la recherche opérationnelle, pour permettre d'optimiser des systèmes hétérogènes.

Enfin, pour permettre la mise en place de CPS interdisciplinaires, il est nécessaire de faire collaborer plusieurs équipes, ne travaillant pas toujours au même endroit. Pour cela, des outils d'**ingénierie virtuelle** se développent, proposées par des entreprises n'intervenant pas dans la conception des systèmes. Ces plateformes permettent de travailler de façon collaborative sur un projet et existent déjà dans de nombreuses entreprises. Bien entendu, il faut un peu de temps pour que ces nouvelles méthodes de collaboration se mettent en place. Mais un autre enjeu de ces plateformes est de permettre le partage d'architectures et de méthodes standardisées et de référence. En effet, les CPS vont devoir coopérer à l'avenir et doivent pour cela avoir des technologies compatibles et basées sur les mêmes principes.

Positionnement des acteurs

La France est une nation *leader* sur le développement des méthodes d'ingénierie, de méthode et d'ingénierie dans le monde.

Des laboratoires développent des solutions pour répondre à ses problématiques. Sur la question de la recherche, l'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologie du numérique) apparaît sur les questions de la simulation des CPS dans le cadre de la mobilité être l'Institut le plus avancé. Avec plus d'une vingtaine d'équipes sur les questions de simulation et modélisation, l'**Inria** développe des recherches sur les véhicules autonomes autour des questions de la modélisation et gestion du trafic, la sémantique des situations de conduite et contextes routiers, les offres de

⁵ <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-2022-pour-la-conduite-autonome-niveau-4-chez-renault-72103.html>

⁶ The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0, Thomas H.-J. Uhlemanna*, Christian Lehmann, Rolf Steinhilpera, 2017, Elsevier

mobilité intelligente, la validation et la certification, la génération de scénarii ou encore les stratégies de maintenance et le télédiagnostic.

D'autres laboratoires complètent cette liste comme le **laboratoire G-SCOP** à Grenoble, qui cherche à développer des modèles des interactions entre les experts lors de la conception d'un produit dans le cadre de la nécessité croissante de faire collaborer des équipes pluridisciplinaires. Plus généralement, ce laboratoire se concentre sur des problématiques d'amélioration de la production, prenant en compte la variable humaine, de plus en plus limitante dans ce domaine. Dans une autre optique de développer des modèles de plus en plus avancés et proches de la réalité, le **laboratoire Uria** s'intéresse aux modèles de systèmes évolutifs. Les applications pourraient alors toucher non seulement la modélisation des comportements des CPS, par essence évolutifs, mais également la modélisation de l'environnement et des objets le composant.

Le CEA, avec son laboratoire **List** s'intéresse également aux systèmes embarqués, avec un lien fort avec l'industrie. Ils proposent des logiciels d'optimisation de la performance des systèmes pour les industriels, avec notamment des solutions de sécurité et de vérification de logiciels (Frama-C).

Le pôle de compétitivité Systematic Paris Region Deep Tech Ecosystem connecte quant à lui les acteurs du logiciel, du numérique et de l'industrie tout en accélérant les projets numériques par l'innovation collaborative, la mise en relation et le *sourcing* technologique. Ses actions se concentrent sur six « hubs technologiques » dont Digital Engineering, mais aussi Digital Infrastructure & IoT, Data Science & AI, Cybersecurity, Optic & Photonic et Open Source.

Sur la question de la modélisation des systèmes, **Dassault Systèmes** (3 480 M€ de CAHT en 2018, 16 055 emplois) apparaît sur la question des jumeaux numériques et de la simulation de systèmes complexes comme l'acteur incontournable. Au CES 2019, Dassault Systèmes a annoncé, d'ailleurs, un partenariat stratégique avec la *start-up* Cognata, spécialiste de la simulation de conduite pour les véhicules autonomes. Cette dernière a développé une suite logicielle dédiée à la simulation de conduite autonome. Elle répond à la problématique très concrète de l'entraînement de ses systèmes de conduite pour les améliorer. En ce qui concerne les jumeaux numériques tournés vers l'industrie, de nombreux progrès ont été réalisés dans les dernières années, notamment en s'appuyant sur les solutions SolidWorks.

Ansys France (56 M€ de CAHT, 3000 emplois) est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise, Ansys Inc., a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ansys développe et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Elle a absorbé **Esterel Technologies** (20 M€ de CAHT, 100 emplois) en 2019, principal fournisseur mondial d'outils de conception, de validation et de génération de code pour les applications critiques embarquées à partir de leur description formelle sous forme de modèle, dans les industries aérospatiales, de défense, du transport ferroviaire et de l'énergie. Les solutions logicielles Esterel SCADE permettent la conception graphique, la vérification par la simulation et les méthodes formelles, et la génération de code certifié.

ESI Group (86 M€ de CAHT) est le principal créateur mondial de logiciels et services de Prototypage Virtuel, présent dans plus de 40 pays. Spécialiste en physique des matériaux, ESI a développé un savoir-faire unique et innovant afin d'aider les industriels à remplacer les prototypes réels par des prototypes virtuels, leur permettant de fabriquer, assembler et tester leurs produits dans des environnements différents.

Visiativ (163,2 M€ de CAHT), avec son pôle « *industry* » accompagne dans la mise en place de solution de jumeau numérique et est reconnu comme étant l'un des principaux revendeurs des solutions SolidWorks dans le monde.

Les projets de jumeaux numériques ne sont cependant pas limités au monde de l'industrie. La ville de Nantes a par exemple créé une version numérique de certains quartiers dans une optique commerciale. La solution de modélisation 3D et dynamique de la ville a été mise en place par Vectuel, entreprise française spécialiste de la modélisation 3D et numérique des territoires urbains et porteurs de plusieurs projets dans le domaine.

Ce marché de la simulation ne se développe pas seulement par la mise sur le marché des technologies développées par les laboratoires et les *start-ups*, mais également par les départements R & D des grandes entreprises. Historiquement l'aérospatial et l'automobile ont poussé au développement de simulation de conception et d'industrialisation des procédés. Aujourd'hui, les constructeurs comme Peugeot et Renault investissent massivement dans les simulateurs pour modéliser la voiture autonome en complément des sorties automobiles sur les routes. C'est dans ce cadre que Renault a

investi 25 millions d'euros pour créer un simulateur immersif de pointe qui doit servir à étudier le comportement et les réactions des conducteurs face à la voiture autonome, en complément de la simulation numérique et des essais sur route⁷.

Enjeu d'architectures horizontales et verticales

Description de la technologie

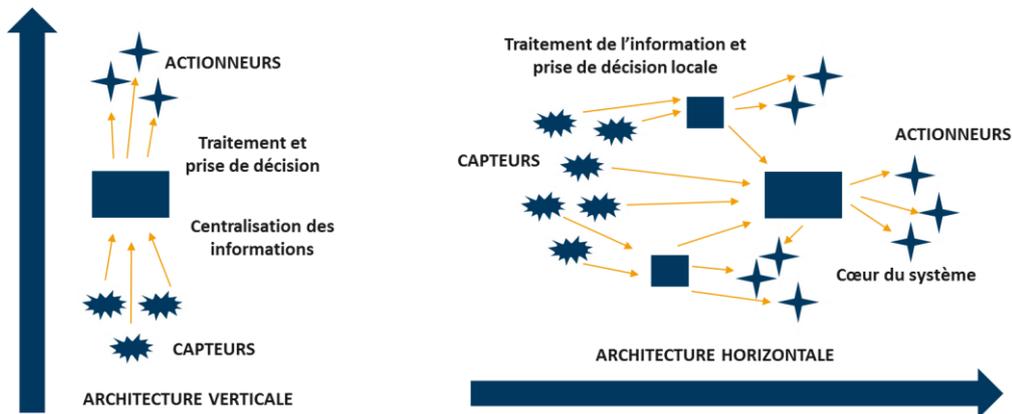
Devant la complexité croissante des CPS, tant sur le plan individuel qu'au niveau de la collaboration avec les autres systèmes, l'architecture devient un enjeu clé. Ces **architectures** doivent permettre l'interconnexion tout en respectant les normes et maintenant la sécurité et permettre l'auto-maintenance des CPS et leur évolution en temps réel.

L'un des enjeux principaux de ces architectures repose sur la question de la multidisciplinarité. En effet, les CPS font intervenir différents domaines qu'il faut faire communiquer. Malheureusement, ces domaines n'ont pas toujours un langage, une ontologie bien difficile, ce qui rend l'échange difficile. Il s'agit donc de bien définir des **ontologies** pour chaque domaine. Il faut ensuite définir des architectures et un langage propre aux CPS et utilisés par tous les CPS.

D'autre part, la question de la répartition de la prise de décision est importante. Traditionnellement, les systèmes « simples » reposent sur une **architecture verticale**. Cela signifie que la **prise de décision est centralisée** dans une unité qui reçoit toutes les informations des capteurs, les traite et envoie un signal aux actionneurs. Cependant, dans le cadre des systèmes complexes que sont les CPS, une **architecture horizontale** peut devenir intéressante. C'est particulièrement le cas pour les **systèmes cyberphysiques de systèmes** (CPSoS) qui sont composés de différents CPS qui sont liés entre eux physiquement ou *via* des échanges d'informations.

⁷ <https://www.usine-digitale.fr/article/renault-investit-25-millions-d-euros-dans-un-simulateur-pour-la-voiture-autonome.N584088>

Figure 9 – Modélisation d’une architecture verticale et horizontale



Source : modélisation de Katalyse

Il est alors judicieux de donner une certaine **autonomie locale** grâce à une architecture horizontale. Les données sont alors traitées localement et seules les plus intéressantes remontent jusqu’au cœur du système. De la même façon, certaines décisions peuvent être prises localement, avec des contraintes permettant d’assurer que l’action va dans le sens de l’objectif global du système.

La complexité des systèmes cyberphysiques nécessite de repenser les modèles que nous utilisons pour les systèmes embarqués, puisque les CPS ont de plus en plus de fonctionnalités et sont de plus connectés à d’autres systèmes. Le rapport Artemis⁸ souligne le rôle déterminant d’une bonne architecture, en rappelant les défis auxquels les CPS sont confrontés :

- **l’ouverture croissante et l’interconnexion des systèmes**, tout conservant les exigences de sécurité. Cette interopérabilité, soit cette capacité des machines, des appareils, des capteurs et des personnes à se connecter et à communiquer entre eux, doit mettre en avant des techniques de connectivité sans fil en temps réel ;
- **la transparence de l’information et la virtualisation**. Les systèmes doivent avoir la capacité de créer une copie virtuelle du monde physique en enrichissant les modèles d’installations numériques avec des données de capteurs ;
- la capacité des CPS à rassembler et à visualiser des **informations de manière exhaustive** afin d’aider les humains à prendre des décisions éclairées et à résoudre les problèmes urgents rapidement ;
- **l’auto entretien et la sûreté des CPS**, du fait de l’ouverture des architectures impactant leur comportement ;
- la capacité des systèmes à prendre leurs **propres décisions** et à s’acquitter de leurs tâches de manière aussi autonome que possible.

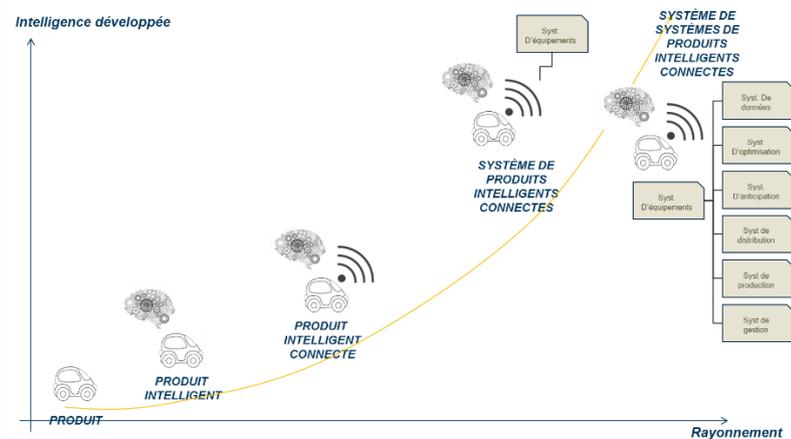
C’est pourquoi la création d’une architecture doit permettre de séparer les sujets communs à tous les systèmes (la communication, la tolérance vis-à-vis des pannes, le stockage des informations, la sécurité et la gestion des droits d’accès...), des sujets spécifiques aux CPS ; les sujets communs à tous les systèmes devant être pris en compte grâce à une approche plateforme. L’architecture doit donc veiller à ce que la plateforme et ses caractéristiques soient développées indépendamment des applications réelles du CPS.

De plus, les blocs développés indépendamment doivent être **réutilisables et recomposables** entre eux. C’est un point important pour obtenir des niveaux d’abstraction dans le processus de conception, et de raccourcir le temps de développement et de mise sur le marché du système.

⁸ Strategic Research Agenda 2016, mars 2016, Artemis

Le schéma suivant illustre l'accroissement de la complexité des architectures présentes dans les produits toujours plus intelligents et connectés :

Figure 10 – Évolution de la complexité des architectures



Source : sûreté et sécurité des systèmes électroniques, Katalyse, IRT NanoElec

Pour développer les CPS et leur permettre de coopérer, il est nécessaire de développer des **architectures standardisées et des architectures de référence**. Elles permettent de donner une base aux CPS afin de répondre à tous les différents enjeux qu'ils ont en commun (sécurité, le stockage des informations, etc.). Elles permettront de gagner du temps lors de la création de nouveaux CPS en se basant sur ce qui existe déjà, fonctionne et a été testé.

L'accroissement de cette complexité oblige à repenser les principes mêmes des architectures en les rendant davantage « collaboratives », et en orientant la réflexion sur leur modèle de référence. C'est dans cette optique que l'Industrial internet consortium (**IIC**)⁹ et le groupe de travail sur l'**industrie du futur** par exemple ont élaboré des recommandations quant à un modèle architectural de référence applicable aux CPS.

Afin d'homogénéiser les processus, ces groupes de travail ont tenté de définir des normes et des standards pour que les communications entre interfaces soient fiables. Aussi, le groupe de travail allemand sur l'Industrie du futur a élaboré le modèle d'architecture de référence appelé Rami, et aux États-Unis, l'Industrial internet Consortium¹⁰ (**IIC**) a mis au point une Industrial Internet Reference Architecture (**IIRA**). Pour donner un exemple dans un autre domaine, l'architecture Autosar (classic ou adaptative) est un partenariat entre des acteurs de l'automobile qui a pour objectif de créer une architecture standard pour les unités de contrôle dans l'automobile. Ces outils partagés et standardisés permettront également de répondre au besoin d'uniformité dans la **testabilité et la certification des CPS**. Dans le secteur aéronautique, l'accroissement permanent de la complexité des systèmes a conduit à la définition d'une architecture appelée Avionique modulaire intégrée (IMA pour Integrated Modular Avionics). Cette architecture se distingue des architectures antérieures, car elle est fondée sur des standards (Arinc 653 et Arinc 664 partie 7) permettant le partage des ressources de calcul et de communication entre les différentes fonctions avioniques. Ce type d'architecture est appliqué aussi bien dans le domaine civil par Boeing et Airbus, que dans le domaine militaire avec le Rafale par exemple¹¹.

Cependant, il ne faut pas définir des architectures de référence trop rigides. En effet, les technologies vont évoluer durant le cycle de vie d'un CPS et il devra pouvoir s'adapter et permettre des mises à jour. C'est là l'intérêt de définir des **architectures de références flexibles**, qui doivent tout de même garantir la sécurité et la sûreté du système. Ces architectures sont notamment étudiées dans le développement du traitement des bases de données. Elles doivent permettre de

⁹ <https://www.iiconsortium.org/>

¹⁰ <https://www.iiconsortium.org/>

¹¹ IIRIT - Institut de recherche en informatique de Toulouse

donner une référence dans la conception des CPS tout en permettant les évolutions qui auront lieu durant la phase d'exploitation.

L'un des autres enjeux essentiels de l'architecture est de définir comment traiter les données récupérées par les capteurs. En effet, pour pouvoir fonctionner, le système doit analyser son environnement et avoir une **sensibilité au contexte**. Cela signifie qu'il s'adapte au contexte, aux conditions dans lesquelles ils se trouvent. Cette caractéristique repose essentiellement sur les capteurs et l'analyse des données récupérées. Pour ce qui est de l'architecture, l'agencement des capteurs et des puissances de calcul a un effet critique sur les performances du CPS.

Une architecture verticale crée une véritable hiérarchie dans le système qui est configuré autour d'un système central qui réalise les calculs. Les capteurs envoient les données au système central, qui les analyse et en tire les informations dont il a besoin. Ces informations sont ensuite envoyées aux actionneurs qui les transforment en action physique. Cette architecture permet de s'assurer que toutes les décisions sont prises permettent d'atteindre l'objectif fixé par le système global.

Dans ces architectures, le calculateur était originellement présent dans un serveur physique intégré au système. Ces dernières années, ces puissances de calcul sont devenues de plus en plus virtuelles, grâce à la technologie du « **cloud** » (informatique en nuage). Le « *cloud* » permet une certaine souplesse et était souvent géré par une entreprise indépendante de celle exploitant le système. Très utilisée, cette technologie a ses limites, ce qui pousse à s'intéresser à des technologies telles que le **edge computing** qui propose une architecture plus horizontale. Cette technologie propose de placer un calculateur (de plus faible puissance) au plus près de la source des données, le capteur. Cela permet de traiter les données une première fois afin de ne transmettre que les plus intéressantes au système central. Cette répartition des tâches, sous forme de **management distribué**, permet de limiter la consommation énergétique du système.

Positionnement des acteurs

Parce qu'ils sont par essence dynamiques et évolutifs, les CPS doivent avoir des architectures évolutives permettant de s'adapter aux circonstances. Pour cela le **laboratoire LAAS-CNRS** développe des architectures dynamiques reconfigurables. Si les applications actuelles se concentrent plus sur les systèmes embarqués, cette technologie sera sans doute essentielle dans le cadre du développement des CPS. C'est également autour de ce sujet que travaille le **laboratoire LIP6 de Paris 6**, en s'intéressant à des architectures hétérogènes reconfigurables permettant une meilleure adaptabilité. Les architectures développées prennent notamment en compte des problématiques énergétiques et de sécurité ainsi les différences de caractéristiques entre les différents composants au système. D'autres laboratoires s'intéressent au sujet des architectures dynamiques et distribuées permettant de prendre des décisions globales à partir d'informations locales tels que le **laboratoire LaBRI** ou encore le **laboratoire Irit** à Toulouse.

Le **laboratoire Irisa** à Rennes s'intéresse au développement d'outils et d'architectures pour les systèmes large-échelle. Il se concentre également sur la problématique de parallélisation dans le cadre de tels systèmes. Ces problématiques seront rencontrées dans le cadre des CPS dont les capteurs et actionneurs peuvent être distribués dans l'espace, mais également pour les CPSoS.

Le **laboratoire IRIF** à Paris s'intéresse également aux problématiques de calcul distribué, particulièrement dans le cadre de systèmes complexes. Cela pourra permettre de développer de nouvelles architectures reposant sur un management distribué avec un premier traitement de l'information au plus près de sa source. Ces travaux pourraient venir compléter et alimenter les solutions de « *edge computing* » déjà mises en place dans certaines entreprises, particulièrement dans le cadre des outils de production industrielle. Sur le sujet du « *cloud computing* », le **laboratoire LACL** s'intéresse à la programmation data-parallèle de haut niveau qui permet notamment de traiter en parallèle une grande quantité de données. Le **laboratoire LIG** à Grenoble s'intéresse aux modalités de parallélisation dans le cadre du traitement d'un nombre toujours croissant de données. Il vise à modéliser le comportement des différentes solutions de parallélisation de calcul afin de mieux les comprendre pour ensuite les adapter et les optimiser.

Les technologies développées dans le cadre de cet enjeu sont encore en partie à l'étape de projets de recherche. C'est le cas notamment des problématiques liées au développement des ontologies générales ou aux systèmes de systèmes. D'autres blocs technologiques sont au contraire très développés et déjà présents massivement dans le monde de l'entreprise. C'est le cas par exemple du « *cloud computing* ». Cette technologie est développée par de nombreux acteurs, mais les principaux

restent américains, avec notamment AWS, Microsoft, Google Cloud. Quelques acteurs français sont cependant présents avec **Orange Business Services** (7400M€ de CAHT en 2018, + de 20 000 emplois) et son projet CloudWatt, **SFR** (8 630 M€ de CAHT, 6600 emplois) avec le rachat de **Numergy** ou **OVH** (2750 emplois).

En parallèle, *edge computing* se développe progressivement en France, sans qu'un acteur particulier ne se démarque encore sur le marché. On peut cependant retrouver l'«*edge computing*» dans le cadre de produits français, tels que Bob l'assistant de Cartesiam, qui permet la maintenance prédictive ou au sein du projet de la **start-up Sequanta** mené en partenariat avec la SNCF.

Enjeu d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision

Description de la technologie

Les CPS doivent pouvoir interagir avec leur environnement de façon autonome. Le CPS doit percevoir correctement son environnement, grâce à des capteurs. Si aujourd'hui l'analyse d'un environnement limité est très concluante, il reste encore de nombreux travaux avant que les CPS puissent analyser un environnement ouvert. Les données récupérées ne sont pas toutes de la même qualité et les capteurs ont également des degrés de fiabilités différents. Aujourd'hui, les technologies existantes permettent d'analyser de façon efficace un environnement limité. Ils sont composés entre autres de **capteurs** (qui récupèrent les informations) et **d'actionneurs** (qui agissent sur l'environnement). Ces deux éléments ne sont pas nouveaux et sont depuis longtemps intégrés dans les systèmes automatiques. Cependant, ils continuent d'évoluer constamment, avec de plus en plus d'autonomie locale et de capacités. Afin de pouvoir être autonomes, les CPS doivent avoir accès à des données sur leur environnement. Ces données sont récupérées notamment *via* le biais de capteurs. L'utilisation des capteurs est aujourd'hui très démocratisée et efficace. Cependant, avec la volonté de diminuer les coûts monétaires et énergétiques des systèmes, avoir des **capteurs miniaturisés et low-cost** est une nouvelle étape dans le développement de cette technologie. La question de la **récolte de l'énergie** est également critique pour permettre l'autonomie du CPS. Les technologies développées se concentrent sur des capteurs basse consommation et de nouvelles méthodes de récolte de l'énergie. Parmi elles se trouvent des capteurs captant de l'énergie grâce aux fréquences radio. Ces capteurs sont déjà disponibles dans le commerce. De façon générale, de nouvelles méthodes de récolte d'énergies se développent, face aux besoins actuels de plus en plus exigeants.

Chaque capteur ne peut pas permettre de connaître de façon exacte l'environnement. De ce fait, des technologies de **fusions des capteurs** sont nécessaires. Elles permettent de regrouper les différentes informations transmises par les capteurs pour en déduire d'autres informations. Ces fusions de capteurs peuvent également permettre d'obtenir un système plus fiable et sûr en introduisant des redondances.

Les données dont disposent les CPS ne sont pas toutes issues de leurs capteurs. En effet, grâce à des plateformes, le CPS peut communiquer et échanger des informations avec d'autres systèmes. Des algorithmes sont proposés pour les **fusions de données** d'origines hétérogènes. Ces algorithmes permettent de compléter et de rendre plus fiables les informations que le CPS va ensuite traiter. Ces technologies sont aujourd'hui déjà utilisées dans de nombreux systèmes dans des domaines particuliers (ex. : cartographie satellite).

Une fois que le CPS a pu récupérer toutes les données, il doit les traiter et les analyser. De nombreuses technologies existent ou se développent dans ce domaine, parfois dans des domaines très spécifiques comme le traitement d'image, ou de la parole par exemple. Elles nécessitent des algorithmes **d'intelligence artificielle**. Ces approches se sont beaucoup développées ces dernières années au vu de leurs potentielles applications dans de nombreux domaines. La première technologie rendue possible par l'intelligence artificielle est l'**apprentissage automatique** (ou «*machine learning*» en anglais). En se basant sur une analyse statistique des données disponibles, elle permet au système d'apprendre, c'est-à-dire de résoudre des tâches de façon plus efficace sans avoir besoin d'être explicitement reprogrammé. Ces algorithmes donnent une plus grande

autonomie et adaptabilité au système, ce qui est un enjeu essentiel pour les CPS. L'intelligence artificielle permet pour les CPS :

- de répondre à des problématiques de **reconnaissance de schémas** principalement utilisée dans le cadre de l'analyse d'images et de la voix ;
- de mettre en œuvre une analyse en temps réel des données ;
- de rendre possible l'analyse du comportement de l'utilisateur ;
- de permettre au CPS d'évoluer et de s'**auto-adapter** ;
- de réaliser des **autodiagnostic**s.

En découlent de nombreuses potentialités pour les CPS, mais également quelques problématiques encore à résoudre : constitution des corpus d'apprentissage, tests, certifiabilité...

Positionnement des acteurs

Au vu des très nombreux laboratoires et entreprises travaillant sur des sujets se rattachant à cet enjeu, la liste des laboratoires et entreprises français ne pourra pas être exhaustive.

Il est possible de citer :

- l'Institut de Recherche technologique (IRT) SystemX se positionnant comme un accélérateur de la transformation numérique de l'Industrie, des services et des territoires : un positionnement transverse à plusieurs blocs technologiques, avec une offre R & D spécifique à l'intelligence artificielle : EngageAI ;
- de même, l'IRT b<>com est à la fois actif dans les domaines de l'intelligence artificielle, mais également des télécommunications (5G) ou des technologies cognitives au travers de projets européens et internationaux majeurs ;
- pour les laboratoires travaillant sur les questions des systèmes embarqués adaptatifs et sécurisés, la gestion de l'énergie et les capteurs associés : les laboratoires **Quartz, Cristal, Greyc, Estia, IETR** de Rennes, **Verimag, Dacle, IES** de l'université de Montpellier, l'**Ensta** Paris, mais également le département FEL du **Centre Microélectronique de Provence**, l'équipe ASR de l'**U2IS**, le département SYRI du laboratoire **Heudiasyc**...
- de nombreux laboratoires se penchent également de l'analyse d'une image, une vidéo ou un texte et y développent de nouveaux algorithmes : les laboratoires **IETR, LaBRI, IRIT ; LASPI, NormaSTIC, COSYS, LISSI, LTCl, LAB-STICC, LTSI, L2TI, LS2N, LISIC** ou encore le département ISPR de l'institut **Pascal**...
- le traitement et la récupération des données sont également des enjeux majeurs dans le cadre des CPS. Le sujet est abordé depuis déjà plusieurs années par les laboratoires de recherche et les établissements français ne font pas exception comme **ICVL** du Centre-Val de Loire, **Lamia** de l'université des Antilles et de la Guyane, l'équipe diNo du laboratoire **Lipade** et les laboratoires **Limos, LIX, LRI, IRISA, LIG**...
- enfin, la technologie de l'apprentissage machine a également été repérée comme étant une technologie clé avec les laboratoires **HEUDIASYC** de l'UTC, **IMAGeS** du laboratoire **iCube**, le laboratoire **Cedric** du Cnam, le laboratoire **Fayol** des mines de Saint-Étienne, **axe AID** du laboratoire d'informatique de Paris 6, mais aussi **LIPN, LIRMM, SAMM, NormaSTIC**. Ce domaine en pleine évolution fait l'objet de nombreux projets de recherche.

Parmi les technologies clés de cet enjeu, certaines ne sont encore qu'à l'étape de développement dans les laboratoires de recherche. D'autres sont cependant déjà en place dans le monde économique. C'est le cas notamment de la question des capteurs. Si des laboratoires s'intéressent à ce sujet (premier point de la liste précédente), c'est surtout les entreprises qui le font évoluer. En France, quelques acteurs se démarquent. Par exemple, **Electricfil Automotive** (179 M€ de CAHT en 2018) propose des capteurs très avancés pour l'automobile. Avec le laboratoire LETI, l'entreprise travaille notamment à améliorer les performances des capteurs *low cost* qui seront présents dans les véhicules autonomes.

D'autres entreprises appartiennent également à la filière électronique :

- implanté en Isère et assurant le développement et la production des composants hautes performances (capteurs d'image, convertisseur) le site français de **Teledyne-E2V Technologie** (100 M€ de CAHT – 400 emplois) est positionné dans le « Top 4 » des sites de l'entreprise ;
- **Ofradir** (200 M€ - 850 emplois) est une entreprise appartenant à Sagem (Safran) et Thales. Il s'agit de l'un des leaders mondiaux de capteurs infrarouges tournés vers les applications militaires, industrielles ou spatiales ;
- L'entreprise **Tronics** (5,3 M€ de CAHT en 2017 - 80 salariés), fondée et basée à Grenoble, est un leader sur le marché des microsystèmes électromécaniques (MEMS) professionnels. Disposant de deux unités de fabrication, à Crolles (Isère) et au Texas, Tronics fournit des capteurs utilisés dans le domaine de l'aéronautique (centrales à inertie).

L'autre problématique essentielle des capteurs, au-delà de leur miniaturisation, est la récolte d'énergie. Des premiers capteurs capables de récolter l'énergie ambiante arrivent sur le marché. Si les premiers à avoir développé cette technologie sont les Australiens, au sein d'un laboratoire de recherche, quelques entreprises françaises s'y intéressent. C'est le cas de **Tekceleo**, qui propose des capteurs récupérant l'énergie *via* les vibrations. **GST (GreenSysTech)** travaille également sur des capteurs autonomes qui n'ont besoin d'aucune source électrique. Cette récolte de l'énergie ambiante propose de nombreux avantages qui semblent séduire les industriels, mais également les collectivités locales.

Pour ce qui est des capteurs d'images, les grands noms du domaine ne sont cependant pas européens. On retrouve entre autres Sony, le spécialiste américain, Samsung Electronics en Corée du Sud ou encore Omnivision Technologies en Chine. Cependant, des *start-ups* se développent sur le domaine. C'est le cas de la *start-up* française **Prophesee**¹² qui développe une caméra inspirée de l'œil humain dédiée à l'analyse visuelle. Elle a levé 25 millions d'euros pour accélérer la commercialisation de son capteur pour l'industrie 4.0 et à s'attaquer aux marchés de l'automobile et de l'internet des objets.

Enfin, sur le sujet de la fusion des capteurs, quelques initiatives françaises sont à remarquer, avec notamment **Altran** (2 916 M€ CAHT en 2018, 46 960 emplois) qui a pu tester le fonctionnement d'un système ADAS (« advanced driver assistance system » ou aide à la conduite automobile) muni d'algorithmes de fusion des capteurs. Dans le cadre plus spécifique de l'agriculture, **Hiphen** propose des solutions d'analyse de données provenant de plusieurs capteurs et de natures différentes. Ces technologies semblent encore être développées dans un certain secret, mais seront essentielles, notamment dans le cadre des véhicules autonomes. Quelques acteurs français existent, notamment **Eurodécision** (5 M€; + de 50 salariés) qui associe analyse de données et recherche opérationnelle pour proposer des solutions adaptables et personnalisées, dans une démarche de SaaS.

Enjeu des technologies embarquées de calcul et de stockage, critiques pour l'autonomie

Description de la technologie

Pour pouvoir traiter les données, les CPS doivent avoir accès à des ressources de calcul et de stockage. Avec la complexité croissante des environnements à étudier, la quantité de ressources nécessaire augmente sans arrêt. Il faut donc optimiser le calcul et le stockage.

Afin de pouvoir être autonomes, les CPS doivent pouvoir stocker et traiter efficacement les données. Au vu du nombre toujours croissant de données, les **technologies de stockage** vont devoir évoluer. Actuellement, le stockage des informations peut se faire localement (sur un serveur physique, dans un disque dur, etc.) ou *via* le « *cloud* ». Cependant, avec la volonté de rendre les capteurs plus indépendants et de donner une autonomie locale, les données devront être partiellement stockées localement. Une des possibilités pour améliorer les performances des CPS pour ce qui concerne le stockage des données est d'utiliser les technologies « **single source of truth** ». Dans ce mode de fonctionnement, les informations ne sont stockées que dans un lieu unique, mais demandent de démultiplier les canaux de communication et de pouvoir s'assurer de leur fiabilité.

L'autre problématique essentielle soulevée ici est la **puissance de calcul** dont dispose le CPS. Cette puissance de calcul peut être totalement ou partiellement embarquée et représente un enjeu d'autonomie. Depuis 2001, les **systèmes multicœurs** se développent. Ils permettent de placer plusieurs cœurs de calcul travaillant en parallèle sur une même puce. Cela permet d'augmenter la puissance de calcul et surtout d'augmenter la rapidité de calcul. Ces technologies reposent sur une **parallélisation efficace** et sont actuellement présentes dans la plupart des machines, même dans le cadre des utilisations personnelles. Cependant, la technologie ne s'est pas arrêtée là et la course à la puissance de calcul continue et évolue chaque jour, grâce aux systèmes comportant des processeurs « **manycore** ». Ces processeurs ont un grand nombre de cœurs et sont bien plus optimisés que les

¹² <https://www.usine-digitale.fr/article/prophesee-lance-une-camera-bio-inspiree-pour-la-robotique-industrielle.N684054>

multicœurs, ce qui leur permet d'avoir des puissances de calcul encore jamais atteintes. Aujourd'hui, le processeur MPPA-256 de Kalray comporte 288 cœurs.

Néanmoins, pour que ces puissances de calcul soient exploitables, il faut **répartir les puissances de calcul de façon stable**. Cette problématique ne semble pas encore aussi importante que celle d'obtenir la puissance nécessaire, mais demandera une analyse poussée puisque de la stabilité du système dépendra sa fiabilité. Cette problématique se rapproche beaucoup du choix entre une architecture horizontale ou verticale.

Enfin, il est à mentionner l'importance de processeurs spécialisés, soit pour le traitement d'images ou de signaux, soit pour les traitements d'algorithmes neuronaux, permettant de développer l'excellence des CPS dans ces domaines particuliers.

Positionnement des acteurs

Pour ce qui est des technologies multicœurs ou même des processeurs « *manycore* », la France n'est pas à ce jour dans le peloton de tête sur cette question. Les processeurs et puces les plus souvent utilisés sont ceux d'Intel (la puce la plus récente possède jusqu'à 8 cœurs), de Nvidia et d'AMD. Aucune technologie française ne s'impose comme une référence aussi importante sur le marché.

Cependant, quelques laboratoires s'intéressent au domaine de la parallélisation afin de répartir les calculs de façon optimisée et diminuer le temps de calcul. C'est le cas notamment du département **SRCPR** du Laboratoire d'informatique de Grenoble qui souhaite développer des méthodes optimisées de traitement de données en utilisant des supercalculateurs et des méthodes de calcul parallèle. Le **LI-PaRAD** s'intéresse également aux sujets liés au recours coordonné à plusieurs entités de calcul, traitant ainsi les aspects réseaux, parallélisme et algorithmique distribuée. Le groupe ICPS du laboratoire **iCube** développé des techniques et technologies très poussées dans le domaine de la parallélisation et de l'optimisation du calcul. Les projets portent tant sur les systèmes multicœurs que sur une parallélisation *via* le « *cloud* ». Au sein du laboratoire **LaBRI**, l'équipe Satanas étudie des solutions de calcul parallèle à haute performance. Elle met en place des supports exécutifs génériques constituant une base flexible et performante.

D'autres laboratoires s'intéressent aux problématiques de parallélisation dans le cadre d'autres travaux, notamment autour de l'analyse de données. C'est le cas par exemple du laboratoire LS2N à Nantes qui traite du traitement de signaux, de la science de données, des systèmes distribués (dont « *fog computing* ») avec une dimension transversale en parallélisation de calcul.

Sur le domaine des technologies multicœurs, les deux leaders mondiaux sont Intel et AMD, deux géants américains. Cependant, la société **Kalray (872k€ de CAHT en 2018)**, dont le siège social est en France, propose également des processeurs technologiquement avancés. Il est l'un des leaders dans le domaine des processeurs parallélisés « *manycore* » et a développé, en 2014, le premier processeur comprenant 256 cœurs. En 2018, Kalray a franchi des étapes importantes sur ses deux domaines applicatifs prioritaires, les *data centers* intelligents et les véhicules intelligents (Baidu a confirmé lors du salon CES de Las Vegas avoir sélectionné la plateforme MPPA de Kalray comme plateforme partenaire pour sa solution Apollo). Kalray a rejoint en tant que membre premium fondateur la Fondation Autoware, visant à faciliter le déploiement des technologies utilisées dans le cadre des véhicules autonomes en soutenant en particulier le projet de suite logicielle *open source* d'Autoware. Pour conforter son avance technologique, Kalray entretient des liens étroits avec le monde de la recherche. Ils collaborent ainsi sur des projets de recherche, avec l'**Inria** notamment.

Enjeu de communication, d'interopérabilité et d'interface

Description de la technologie

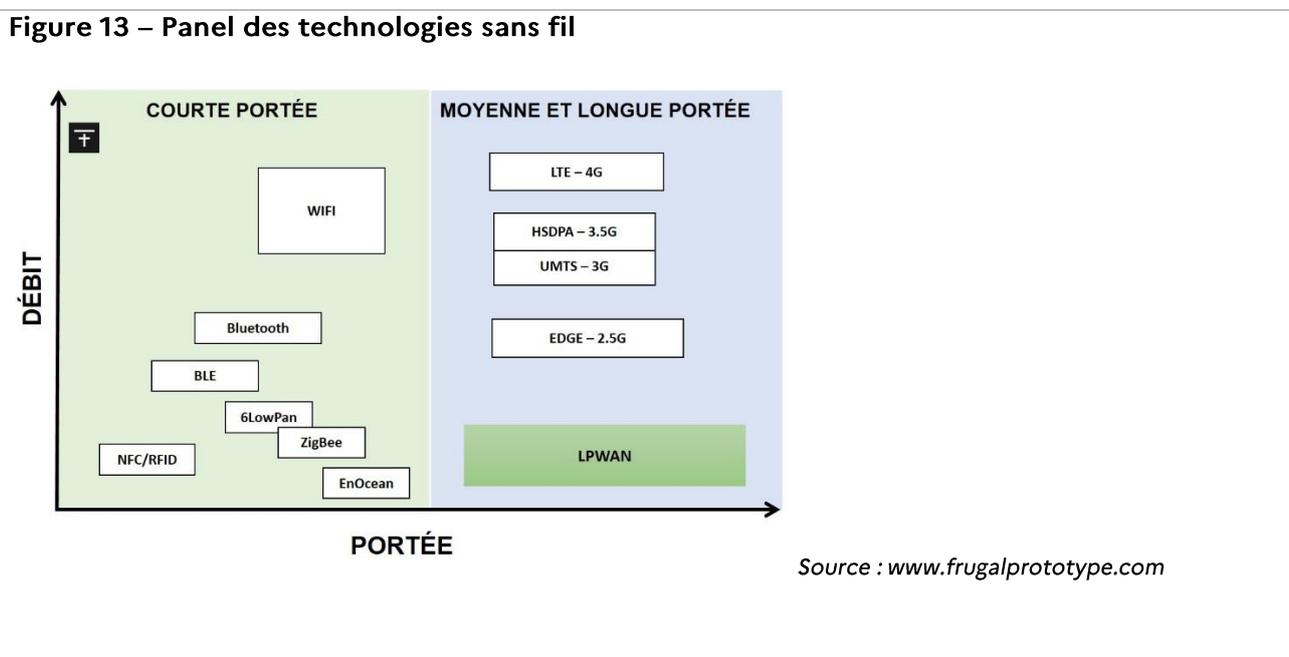
Les CPS, contrairement aux systèmes embarqués traditionnels, ne doivent pas opérer de façon isolée. En effet, la collaboration permet non seulement d'avoir une action à plus grande échelle, mais également d'avoir accès à des données venant d'un plus grand nombre de capteurs.

L'objectif est de pouvoir récupérer des données des autres systèmes afin de les fusionner avec les données récupérées par les capteurs. Cette grande quantité de données alimente notamment les algorithmes d'intelligence artificielle. Il est donc important de mettre en place des **réseaux de communication** afin de relier entre eux les CPS via des canaux de communication. Il existe plusieurs architectures pour ces réseaux, LAN (local, à l'échelle d'une entreprise) ; MAN (métropolitain, à l'échelle d'une ville) ; WAN (wide area, à l'échelle d'un pays) ; Wireless (sans-fil) ; internet (qui relie les réseaux précédents entre eux).

Les réseaux LPWA sont des réseaux sans fil basse consommation, bas débit et longue portée, optimisés pour les équipements aux ressources limitées pour lesquels une autonomie de plusieurs années est requise. Ces réseaux conviennent particulièrement aux applications qui n'exigent pas un débit élevé.

Les LPWAN utilisent les bandes de fréquences à usage libre – sans licence – ISM (Industriel, Scientifique et Médical) disponibles mondialement, contrairement aux opérateurs mobiles qui utilisent des bandes sous licence. Il est à noter que l'utilisation des bandes ISM implique le partage des ressources avec les concurrents et avec les autres technologies (RFID, Wifi, Bluetooth, ZigBee, etc.).

Figure 13 – Panel des technologies sans fil



Compte tenu des faibles débits et de la faible occupation spectrale des signaux, il faut en moyenne, pour un réseau LPWAN, dix fois moins d'antennes pour couvrir la même surface qu'un réseau cellulaire traditionnel. Ces bandes de fréquences sont régulées par des autorités organisatrices et il est tenu de respecter des règles d'utilisation, comme le montre la figure suivante.

Le marché en est encore à ses débuts et se caractérise par une forte fragmentation technologique. Le marché se consolide rapidement autour de quelques-unes de ces technologies LPWAN, en particulier Sigfox et LoRa dans la partie sans licence du spectre radioélectrique, et NB-IoT et LTE-M dans le spectre sous licence.

Rappelons que près de 200 réseaux basse consommation et longue portée (LPWAN pour Low-Power Wide-Area Networks) étaient en service dans le monde fin 2018 pour les besoins de l'internet des objets¹³. Selon l'étude, les réseaux LPWAN constituent la technologie de connectivité IoT qui connaîtra la croissance la plus rapide au cours des cinq prochaines années. Le nombre de connexions LPWAN devrait ainsi augmenter de 109 % par an et dépasser la barre du milliard d'unités en 2023.

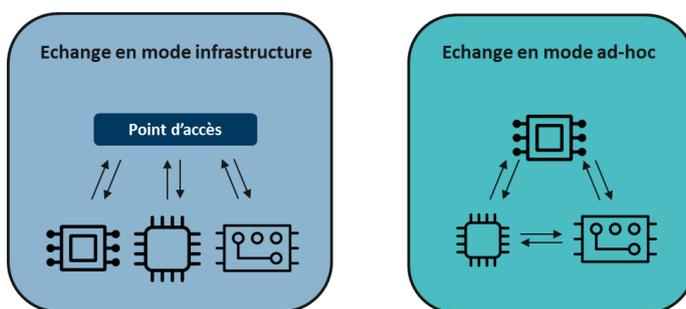
¹³ <https://www.vipress.net/94-reseaux-lte-m-et-nb-iot-ont-deja-ete-deployes-par-50-operateurs/>

Selon Sigfox, en octobre 2018, le réseau LPWAN développé par la PME toulousaine était présent dans 57 pays du monde. Selon les prévisions de GSMA Intelligence, à l'horizon 2025 le total des connexions IoT cellulaires atteindra les 3,5 milliards, y compris 1,9 milliard de connexions LPWA sous licence.

Ces architectures sont développées depuis de nombreuses années, mais de nouvelles technologies pour lier les réseaux entre eux se développent actuellement. C'est le cas principalement des **technologies 5G** qui permettent d'avoir des débits de communication jusqu'à 100 fois plus rapides que la 4G actuelle. Cette technologie devrait se déployer d'ici la fin de l'année 2019 ou le début de l'année 2020. C'est donc une technologie qui devrait permettre aux CPS de communiquer de façon plus rapide et de permettre des applications en temps réel.

L'une des pistes également recherchées par les universités et les industries est la **communication ad-hoc transparente**. Les technologies développées dans ce cadre permettraient d'établir des connexions sans fil dynamique avec n'importe quel appareil sans infrastructure préalable intégrée.

Figure 12 – Communication ad-hoc



Source : modélisation de Katalyse

La recherche s'intéresse également de plus en plus aux **réseaux de communication auto-organisés**. Cette technologie d'automatisation permet de simplifier et d'accélérer la planification, la configuration, la gestion, l'optimisation et la réparation des réseaux.

De plus, de nombreux travaux de recherche s'intéressent aux **interactions hommes-machines**. Cela représente tous les moyens et outils mis en œuvre afin qu'un humain puisse contrôler et communiquer avec une machine. Ces interfaces comportent deux aspects: la perception des intentions et du comportement humains et la communication d'informations à l'utilisateur. Pour ce premier point, des **modèles du comportement humain et l'homme** de façon plus générale sont développés. Ces modèles, encore très peu avancés, demandent une forte collaboration en des équipes spécialisées en intelligence artificielle et modélisation et des équipes spécialisées en psychologie et autres sciences comportementales. À terme, cette modélisation devrait pouvoir permettre de **reconnaître les intentions humaines** en se basant sur les données récoltées lors d'interaction précédente. D'autres technologies se basant sur des aspects plus quantitatifs se développent. C'est notamment le cas de la **reconnaissance vocale**, le **traitement d'image**, la **reconnaissance des objets** et les **écrans capteurs de mouvements**. Ces interfaces innovantes permettront de faciliter encore la communication entre les hommes et les machines en se basant sur la compréhension des mouvements humains.

Positionnement des acteurs

De nombreux laboratoires s'intéressent aux questions de la communication. Sans pouvoir proposer une liste complète, nous pouvons souligner les laboratoires suivants :

- de nouvelles technologies de communication se développent, avec notamment la photonique. Cette technologie repose sur l'utilisation de photons pour le traitement des informations. L'un des laboratoires traitant du sujet est l'Institut **Foton** qui cherche à développer la communication optique et le traitement des signaux optiques. Le laboratoire

LETI développe également des nano et micro technologies avec des applications dans le domaine de la communication sans fil ;

- **LIX**, le laboratoire de Polytechnique, s'intéresse à l'analyse des programmes et systèmes numériques distribués et aux communications hautes performances. Le groupe Systèmes complexes, réseaux, calcul distribué de **l'IRIF** étudie les problématiques liées aux réseaux et au calcul distribué dans le cas de systèmes complexes ;
- le domaine de l'interaction homme-machine est une problématique de plus en plus étudiée avec l'émergence des nouvelles technologies. De nombreux laboratoires étudient le sujet et cherchent à développer des interfaces innovantes. Le laboratoire **CRISTAL** de Lille, déjà cité ; mène des travaux autour du sujet de l'interaction homme-machine. Le groupe **MINT** cherche à développer les interactions *via* des outils tactiles et la reconnaissance des mouvements. Enfin, le groupe **Noce** modélise et étudie comment les interactions humaines sont influencées par les ordinateurs et nouveaux outils numériques. L'objectif est de pouvoir adapter les services en fonction des évolutions du contexte et des besoins.

La modélisation du comportement humain fait l'objet de travaux de recherche dans plusieurs laboratoires, il est la clé pour beaucoup d'applications où les CPS ont une grande autonomie dans un environnement où les humains agissent. La compréhension du comportement humain est une discipline des sciences sociales et peu de laboratoires font aujourd'hui le lien entre les sciences sociales et l'informatique. Certains font cependant exception à cette règle. Ainsi, le laboratoire **CHArt** propose une approche pluridisciplinaire en sciences cognitives, mathématiques et informatique afin de mieux comprendre comment l'homme prend des décisions. Un autre laboratoire s'intéressant au comportement humain dans le cadre de la mise en place de systèmes autonomes ou automatiques est le laboratoire **Isir**. Ses équipes **Agathe**, **Amac** et **Piros** s'intéressent à des sujets de machine assistant l'humain en interprétant notamment des signaux de comportement socio émotionnels. Les laboratoires de recherche sur les interactions homme-machine gagneraient à travailler avec des laboratoires spécialisés dans l'étude du comportement humain, tels que le **CeRCA**, le **LEAD** ou encore le **CAMS**.

Le sujet de la 5G est plus d'actualité que jamais, avec une mise en place en France qui ne devrait plus tant tarder. Cette technologie, d'abord développée par **Huawei**, qui domine encore le marché, arrive dans l'hexagone. Des premiers tests sont en cours grâce aux opérateurs français et les premières répartitions des ondes ne devraient plus tarder. En France, c'est l'Arcep qui guide vers la mise en place de la 5G. Cependant, si le réseau est présent, la technologie permettant aux puces de téléphones de capter et utiliser la 4G n'est pas française. Les grands acteurs sur le marché sont **Qualcomm** (US), **MediaTek** (Taiwan), **Samsung** (Corée du Sud) et **Huawei** (Chine). Cette technologie monopolise l'avant-scène des réseaux de communication et semble au cœur des enjeux des entreprises.

D'autres entreprises sont également positionnées sur la question de la communication et de l'interaction :

Ommic, entreprise spécialisée dans les matériaux III-V est née des anciennes activités de fabrication de Philips qui est installée à Limeil-Brévannes (Essonne). Après avoir procédé à une levée de fonds de 12 millions d'euros, l'entreprise a inauguré en 2017 une ligne de production de puces en nitrure de gallium sur tranches de 150 mm, la première en Europe. Cette PME d'environ centaine de salariés et générant 14 million d'euros de CA compte se positionner lors du développement de la 5G avec ce semi-conducteur, en supplément de ses activités tournées vers le domaine de la défense.

STMicroelectronics (2 650M\$ - 45 500 emplois) propose une vaste gamme de produits incluant notamment les microcontrôleurs STM32 en technologie BI-CMOS programmables par logiciel, des composants de type MEMS (capteur de pression...), mais plus largement des solutions bout en bout (système sur puce ou SoC) incluant des modules de transmission compatibles (Bluetooth basse consommation BLE176, WIFI, NFC, LPWAN – Lora & Sigfox).

Sigfox (60 M€), société basée à Toulouse est une *start-up* française spécialisée dans les réseaux de communication de l'internet des objets grâce au bas débit. En plus de la France, Sigfox s'est déjà implanté dans dix villes aux États-Unis, et est présent aux Pays-Bas, en Espagne et en Russie après l'obtention d'une troisième levée de fonds d'un montant de 100 millions d'euros. Cette société

développe de nombreux partenariats comme celui avec l'opérateur français Eutelsat¹⁴ pour déployer une constellation de 25 nano-satellites ou encore avec Michelin¹⁵ et Argon Consulting pour proposer de faire du suivi en temps réel des conteneurs transportés à travers divers continents.

Enfin, le pôle de compétitivité à vocation mondiale **Images & Réseaux** se positionne comme référent de l'innovation numérique en régions Pays de la Loire et Bretagne et intervient principalement sur 6 domaines couvrant plusieurs blocs technologiques, parmi lesquels Réseaux et infrastructures, Interactivité et immersivité, ou encore Confiance numérique et Sécurité...

Enjeu de sécurité, de sûreté et de confiance du système

Sûreté de fonctionnement des systèmes

La fiabilité d'un système correspond à la capacité du système de réaliser et de maintenir ses fonctionnalités dans des conditions normales d'utilisation. Elle correspond donc à la capacité de ce système d'accomplir une action requise sous des conditions spécifiques et dans un intervalle de temps donné. Aussi, un système est fiable lorsque la probabilité de n'avoir aucune défaillance correspond à celle attendue. Dans le cadre des systèmes cyberphysiques, la fiabilité comprend deux volets : **la fiabilité de l'infrastructure et la fiabilité des informations**. La fiabilité de l'infrastructure s'entend comme le degré de fiabilité de ses composants, compte tenu des erreurs liées aux perturbations extérieures. Tandis que la fiabilité des informations correspond au fait que l'information générée par l'infrastructure est fiable, sachant qu'il existe une marge d'erreur inhérente aux infrastructures liées à des perturbations exogènes.

La **confiance des utilisateurs** dans les CPS intelligents est un enjeu majeur. Elle passe par une réussite dans la réponse à la sûreté de fonctionnement. Le développement à grande échelle des systèmes cyberphysiques est corrélé au fait que les utilisateurs adoptent cette nouvelle technologie en toute confiance. En effet, les pratiques numériques ont besoin de confiance pour se développer. Or, cette confiance est à la fois dépendante de la sécurisation technique et juridique des systèmes et des réseaux, mais également de la fiabilité des systèmes. Ainsi, les nombreux domaines applicatifs des CPS sont dépendants de ces deux variables que sont la sécurité et la confiance dans la sûreté de ces nouvelles technologies.

Il existe à ce jour plusieurs normes sectorielles de sûreté (& sécurité), parmi lesquelles CEI 61508 (norme internationale émanant de la Commission électrotechnique internationale), ED-12C et DO-178C (fixant les conditions de sécurité applicables aux logiciels critiques de l'avionique), ISO 26262 (pour les véhicules routiers à moteur)...

Cependant, du fait des interactions et des modèles d'écosystèmes ouverts, il est bien plus difficile de réussir à obtenir une fiabilité dans le fonctionnement. C'est un débat constant qui met en avant le travail sur les algorithmes de réflexion et sur l'utilisation de technologie comme l'intelligence artificielle.

Sécurité des systèmes

Puisque ce sont des systèmes ouverts évoluant dans des environnements interconnectés, la question de la sécurité de ces nouveaux outils intelligents est fondamentale.

En effet, les objets connectés présents dans les administrations, les entreprises, les habitations, ou encore les villes interagissent continuellement. Cette interaction continue entre les systèmes informatiques et les objets constitue des points d'entrées à de potentielles « cyber attaques » et à leur propagation à l'ensemble des réseaux.

¹⁴ <https://www.usine-digitale.fr/article/eutelsat-va-deployer-une-constellation-de-25-nano-satellites-des-2020-pour-mieux-connecter-l-iot.N890694>

¹⁵ <https://www.usine-digitale.fr/article/sido-2019-sigfox-et-michelin-lancent-safecube-une-co-entreprise-proposant-une-solution-de-tracking-intercontinental.N829035>

Avec l'émergence de la conduite automatisée, des options de connectivité en expansion rapide et d'une complexité sans cesse croissante, les véhicules sont vulnérables à de nouveaux types de cyber attaques. Les voitures deviennent de plus en plus connectées, comme d'ailleurs de nombreux CPS dans d'autres marchés applicatifs. Cela augmente la surface d'attaque (la somme des vecteurs d'attaque et de vulnérabilité, qui représentent des chemins potentiels pour les pirates). Chaque option de connectivité représente un point d'entrée potentiel. Les voitures modernes haut de gamme ont déjà plus de 200 calculateurs (unités de commande électroniques) et 200 lignes de code et plus par calculateurs, ce qui en fait l'un des systèmes les plus complexes utilisés au quotidien.

Les méthodes d'attaque s'améliorent avec le temps et deviennent moins chères, ce qui les rend plus abordables et potentiellement rentables pour les criminels et les terroristes. La sécurité automobile doit également évoluer en permanence. Cela signifie que les constructeurs automobiles doivent prendre en charge la sécurité de manière évolutive (par exemple, en mettant en place des mises à jour des microprogrammes/logiciels en liaison radio (Fota/Sota)) sur le véhicule et au-delà, en collaboration avec leurs fournisseurs.

Les solutions de sécurité d'un CPS se doivent de rester efficaces pendant toute la durée de vie du CPS (plus de dix ans dans l'aéronautique par exemple). Les composants doivent disposer de chemins de mise à niveau inhérents pour maintenir les solutions de sécurité à la pointe de la technologie, et pour résoudre les vulnérabilités potentielles pouvant être détectées à l'avenir.

Le niveau et la nature de la protection doivent correspondre aux menaces inhérentes aux différents domaines fonctionnels, applications et composants d'un CPS. Le niveau de protection d'un calculateur dépend de plusieurs paramètres, notamment la surface d'attaque, la criticité des fonctions implémentées sur celui-ci et l'actif protégé. Les composants dotés de capacités de connectivité externe, comme le système de divertissement d'un véhicule, nécessitent un niveau de protection supérieur à celui de la plupart des modules de contrôle de la carrosserie.

Si les systèmes ne sont pas suffisamment sécurisés, ils peuvent être détournés et les conséquences seront alors terribles. C'est pourquoi le développement des actions gouvernementales pour renforcer la sécurité des systèmes d'information est une condition sine qua non au bon développement des systèmes cyberphysiques et de la réussite de leurs exploitations.

Positionnement des acteurs

Par essence, l'enjeu défini ici est transverse. Il touche tous les autres enjeux et la plupart des laboratoires intègrent ces problématiques dans la mise en place de nouveaux systèmes. Cependant, certains d'entre eux mettent un accent tout particulier sur cette problématique. Le laboratoire **ICVL** du Val-de-Loire consacre un axe entier de sa recherche aux problématiques de Sécurité, Fiabilité et Efficacité en réalisant des travaux permettant d'assurer la sécurité des systèmes et la vérification des programmes. Le laboratoire **GREAH** compte également un département dédié à la sûreté et orienté vers les systèmes robotique. Cette problématique n'est pas nouvelle, mais deviendra de plus en plus complexe avec l'émergence des CPS. Un autre enjeu étudié par ce laboratoire est la détection de défaut dans le système qu'il soit électrique ou industriel, grâce à des réseaux de neurones.

Sur le sujet plus spécifique de la **blockchain**, la France avait pris beaucoup de retard au niveau de la recherche. Plusieurs laboratoires se sont donc regroupés sous un accord mettant en place l'initiative de recherche commune **BART**. Parmi ces institutions, on retrouve **l'Inria, Télécom Paris, Télécom SudParis et SystemX**. L'objectif est de partager les compétences de chaque laboratoire afin de pouvoir atteindre un niveau technologique plus pointu, nécessaire au développement de cette technologie.

L'institut Henri Fayol, et plus particulièrement le département informatique et systèmes intelligents, cherche à développer des modèles, des algorithmes et des architectures informatiques permettant l'interconnexion des mondes physique, numériques et sociaux. Pour ce faire, ils mettent l'accent sur les problématiques de sécurité et de sûreté des outils développés.

En France, près de **mille entreprises**¹⁶ dites « fournisseur ou prestataire », réalisent une part ou la totalité de leur activité en cybersécurité ou sécurité des systèmes. C'est essentiellement dans le secteur du numérique et du conseil où se trouvent les éditeurs de sécurisation des infrastructures informatiques et prestataires de cybersécurité. À l'inverse, les secteurs de l'ingénierie sont composés

¹⁶ OPIIEC, Les formations et les compétences en France sur la cybersécurité, 2017

quasiment exclusivement d'entreprises dites « utilisatrices » de cybersécurité, domaine n'étant pas leur cœur d'activité. Celles-ci proposent plutôt des réponses aux questions portées par la sûreté des systèmes. Elles sont complétées par les ensembliers et systémiers.

En France, les entreprises ayant conservé des activités de production électronique – et plus particulièrement des activités d'assemblage de systèmes et d'ensembles électroniques – constituent aujourd'hui un nombre réduit d'équipementiers et de systémiers ayant des réflexions sur la question de la sûreté. Ces acteurs sont majoritairement positionnés sur les marchés des systèmes embarqués et des applications industrielles (aéronautique & militaire, ferroviaire, automobile, équipementiers basse tension) et parmi lesquels on peut citer :

- **EADS, Safran/Sagem, Thales, Sagemcom** pour le domaine de l'aéronautique et de la défense ;
- Bosch, Continental, Valeo, Electricfil pour les marchés de l'automobile ;
- Alstom, Bombardier, Siemens pour le ferroviaire ;
- mais également des entreprises comme **Schneider, Elster, Cahors, Legrand, Crouzet, Itron, Landis** pour les basses tensions ;
- dans les autres secteurs, à l'image de ceux du médical, de l'informatique ou des télécoms, les OEM Français sont dans leur grande majorité positionnés sur des activités d'intégration et de design de produit et équipements électroniques. Il s'agit par exemple de **Nokia, Bull, CS Communication, Parrot, Ingenico, ou encore GE Healcare**.

Rappelons que seuls trois donneurs d'ordre (**Alstom, Bosch ou Thales**) ont conservé tout ou partie de leur activité de production de cartes électroniques¹⁷.

Enjeu sur les plateformes et les smart services

Description de la technologie

Les CPS sont de plus en plus connectés en réseau, notamment *via* internet. Ils accèdent ainsi aux informations et données disponibles tout en collaboration avec d'autres CPS pour atteindre leur objectif. Ces interactions et échanges se font *via* des plateformes, qu'elles soient universelles ou spécifiques. Ces plateformes sont adaptées aux enjeux des CPS et proposent des services qualifiés de « smart services ». Elles permettent notamment de partager des données, ce qui a donné naissance à un nouveau modèle économique à prendre en compte : le marché biface. Dans ces marchés, une entreprise crée une plateforme qui va être utilisée par des entreprises gérant des CPS. Les données peuvent circuler entre les CPS *via* cette plateforme. Actuellement très peu de plateformes existent, mais elles devraient se développer dans les années à venir. Lors des entretiens, il était estimé que plus de **80 % de la donnée industrielle** n'étaient pas utilisées.

La création de plateformes fait évoluer la chaîne de valeur. Tandis que le modèle traditionnel de la chaîne de valeur est construit autour d'une collaboration et d'une intégration linéaires, les chaînes de valeur intégrant les CPS prônent le passage à des **prestations de valeur non linéaires** et purement collaboratives. Les avantages de ce modèle seront principalement axés sur les métriques, l'exécution opérationnelle, la planification tactique et la collaboration stratégique. L'intérêt de la **désintermédiation** introduite par l'Industrie 4.0, par exemple, est d'intervenir dans des interstices de la chaîne de valeur, où sont logées des rentes de situation à faible valeur ajoutée. Elle y substitue des algorithmes qui vont directement mettre en contact une offre et une demande potentielle – *via* l'exploitation des données d'usage. Il se produit ainsi un transfert de création de valeur de l'amont vers l'aval de la chaîne de valeur.

Positionnement des acteurs

¹⁷ Enjeu et perspectives pour la filière française de la fabrication électronique, DGE, Juin 2019

Le développement de plateformes d'échanges entre les différents systèmes est encore marginal. En effet, avant de faire fonctionner ensemble les CPS, il faut répondre à tous les autres enjeux qu'ils soulèvent. En France, quelques laboratoires ont mis en place des plateformes d'échange.

Le premier exemple est une plateforme sous forme de centre de calcul numérique. Il s'agit de mutualiser la puissance de calcul. Ce mode de fonctionnement est assez largement utilisé dans les centres de recherche ou de R & D. **L'institut Idris** est ainsi un centre de calcul numérique qui permet d'accéder à distance à des ressources de calcul assez importantes pour faire tourner les différents algorithmes. Ces centres de calcul s'avèreront intéressants dans le cadre du fonctionnement des CPS qui ne pourront pas embarquer des ressources de calculs trop importantes.

Le deuxième exemple de plateforme est une plateforme de mutualisation à la fois pour la puissance de calcul et pour les données. Cette plateforme dépend du **Gricad** et permet aux utilisateurs non seulement d'avoir accès à une capacité de calcul plus importante que celle dont ils disposent localement, mais également de partager des données. Si cette plateforme est aujourd'hui exploitée par des utilisateurs humains, elle pourra servir de base aux plateformes permettant à l'avenir la communication entre les CPS eux-mêmes. Mais il ne semble pas qu'une telle technologie soit actuellement développée en France.

Aujourd'hui, quelques entreprises se positionnent sur le développement de plateformes, mais très peu sont déjà assez développées pour répondre aux besoins des CPS. Le positionnement des Gafam (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft), et des Batx pour Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi montre une volonté de se positionner sur ce segment. C'est le cas sur le marché de la voiture avec des alliances entre les acteurs du numérique et les constructeurs automobiles: Volkswagen-Microsoft, Renault-Google, Seat-IBM... Bien qu'incertain à ce jour, ces acteurs pourraient jouer un rôle structurant dans les années à venir au travers du développement de leurs plateformes.

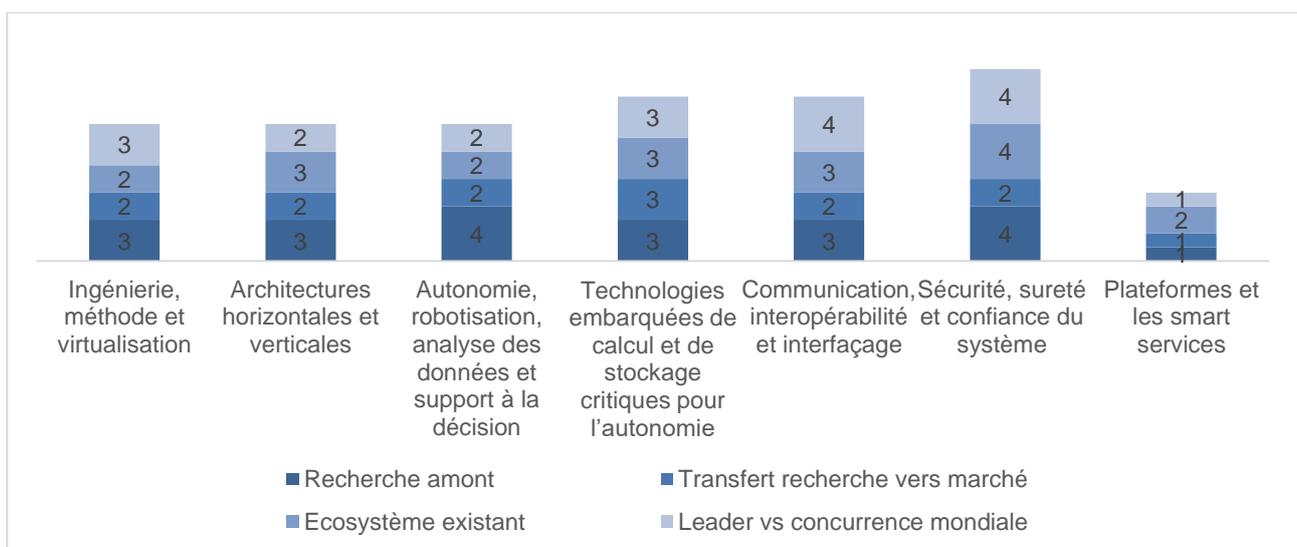
Points clés des enjeux technologiques et des défis pour la filière française

La filière française est très riche en laboratoires sur la plupart des sujets. Elle se distingue en proposant une **large gamme d'actions de recherche**. Cependant, les **relations entre laboratoires restent discrètes**. La participation à des projets européens pourrait être systématisée. La recherche de compétences complémentaires n'est pas dans la logique des laboratoires.

Le transfert de technologie entre laboratoires et monde économique est, quant à lui, encore peu mené. Même si un effort a été fait pour se rapprocher des questions économiques, les laboratoires sont encore faibles sur ce sujet. Le manque de doctorants et de capacité de suivi de la recherche est un exemple parmi d'autres. Les structures d'accompagnement pour le transfert de technologies sont encore pour la plupart démunies face à la question complexe des CPS.

L'écosystème français est comme le montre le graphique suivant avec de fortes spécificités technologiques. Son ouverture aux **autres acteurs européens est très faible**. La participation à des projets européens et à des coopérations entre entreprises montre bien le pas qu'il reste à faire. Seuls les leaders technologiques et marchés participent à certains projets européens. Cette présence faible ne permettra d'appuyer des normes et standards et de proposer une place française à la hauteur des efforts de l'écosystème. De plus, les acteurs technologiques sont peu en relation avec des acteurs complémentaires qui ont souvent une connaissance des usages pour apporter des réponses spécifiques aux différents marchés.

Graphique 1 – Analyse des forces de la filière française (note de 1 à 4 : 1 faible – 4 fort)



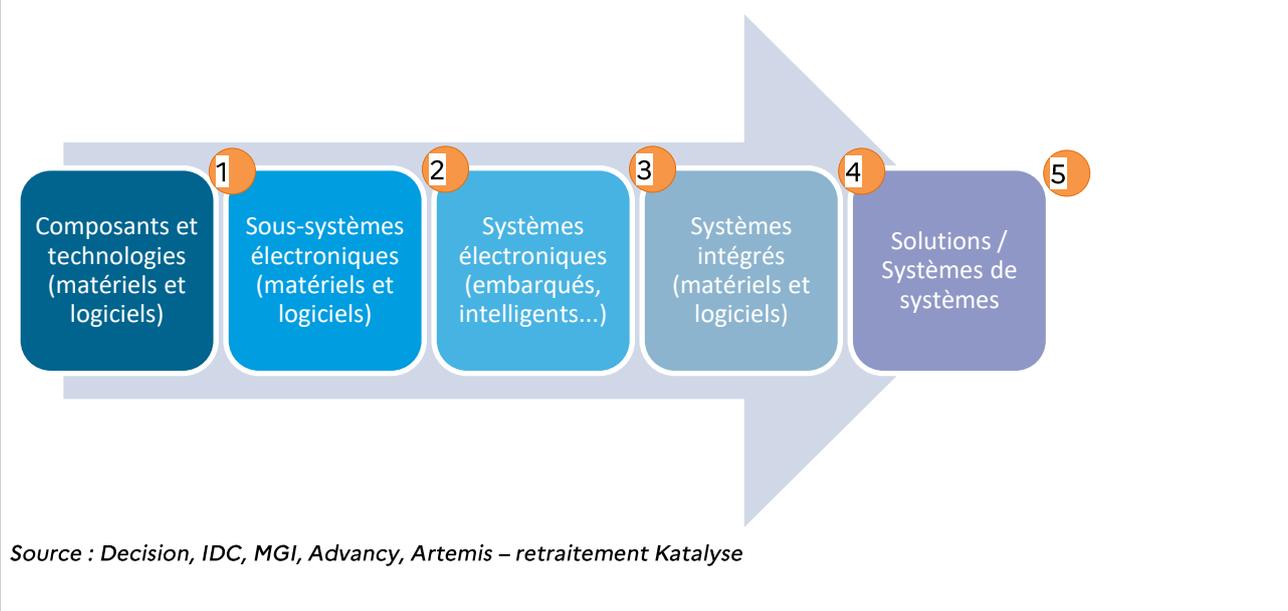
ÉCOSYSTÈME DES ACTEURS FRANÇAIS

Description globale de la chaîne de valeur des CPS

Les systèmes cyberphysiques étant constitués de briques technologiques complexes et variées, l'écosystème d'acteurs économiques intervenant dans leur conception et fabrication est tout aussi riche. Décrire cet écosystème brique par brique, comme une somme d'expertises et de spécialités ne permet cependant pas d'en dessiner la chaîne de valeur. Ce serait négliger une particularité clé des CPS : leur construction en « poupée russe ». **Chaque composant ou sous-système s'intégrant pleinement dans un système plus large, la chaîne de valeur des CPS se construit autour de ces différents niveaux d'imbrication. Ainsi la valeur du CPS n'est plus la somme des valeurs de ses briques, mais bien la valeur issue de leurs synergies.**

Cinq niveaux de la chaîne de valeur peuvent ainsi être distingués, tels que présentés ci-dessous.

Figure 14 – Chaîne de valeur des CPS



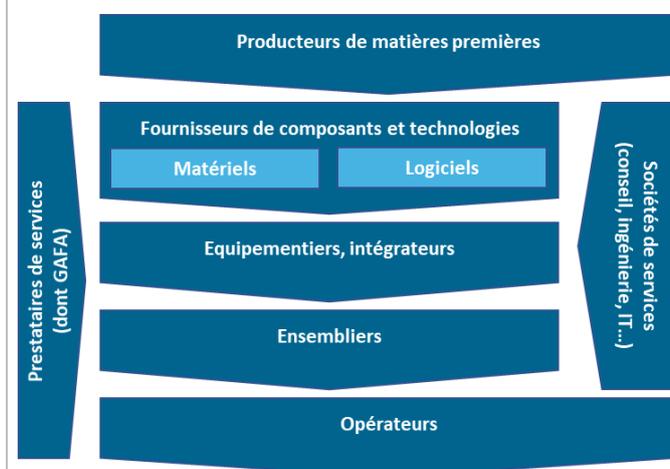
À l'interface des mondes réels et virtuels, les CPS ont pour particularité d'associer des éléments et des systèmes physiques, ou matériels, et des éléments virtuels, ou logiciels. Il faut donc considérer la définition large des termes tels que « **composant** » (**définit comme un « élément qui entre dans la composition de quelque chose »**) et de pas la limiter au composant physique (« pièce qui compose »), excluant à tort de la définition les composants logiciels.

Pour illustrer les différents niveaux de la chaîne de valeur, prenons le cas concret d'un CPS dans l'industrie automobile : les composants électroniques seront aussi bien les semi-conducteurs (matériels) qu'un moteur de calcul (logiciel) (niveau 1) ; le module de traitement du signal qu'ils constitueront sera un sous-système électronique (niveau 2) ; il sera lui-même intégré dans un système électronique embarqué de télédétection par laser (LIDAR) (niveau 3). Le 4^e niveau, celui des systèmes intégrés, sera celui du véhicule autonome dans lequel est installé le LIDAR. Enfin, le dernier niveau de la chaîne de valeur est celui auquel sont considérés les systèmes de système : dans cet exemple, ce serait la relation entre plusieurs véhicules autonomes entre eux, ou entre un véhicule autonome et les systèmes de gestion du trafic implantés en bord de route dans une *smart city*¹⁸.

¹⁸ Embedded Intelligence : Trends and Challenges, Artemis, Mars 2019

Autour de cette chaîne de valeur se constitue un écosystème dense d'acteurs complémentaires, allant des producteurs de matière première jusqu'aux opérateurs des CPS, comme le présente le schéma ci-après.

Figure 15 – Typologie d'acteurs de l'écosystème des CPS



Source : OPIIEC, Juin 2014

Les **fournisseurs de composants et technologies regroupent la plus grande diversité d'acteurs** : ce sont aussi bien les fabricants de semi-conducteurs, que des programmeurs d'applicatifs de cybersécurité par exemple. Ils apportent des briques, des éléments constitutifs distincts dont la réunion aboutira au CPS. On y retrouve donc les éléments relativement standardisés, voire matures, aux côtés de modules de pointes, parfois basés sur des technologies naissantes telles que la *Blockchain*.

Ces briques sont assemblées par des **intégrateurs** pour créer des sous-systèmes et des systèmes, étapes 2 et 3 de la chaîne de valeur. Leur rôle **consiste à associer les briques** pour en faire un CPS : ensemble cohérent, stable, à forte valeur ajoutée. Ils détiennent généralement une expertise métier particulière : la société **Eryma** du groupe français **Sogetrel** propose ainsi des solutions intégrées associant plusieurs technologies du domaine de la sûreté : contrôle d'accès, vidéosurveillance, détection d'intrusion, supervision, produits de détection périmétrique... Les sociétés Thalès, Latécoère (aérostructures et systèmes d'interconnexions), Valéo (équipementier automobile) ou encore Raytheon (défense et cybersécurité) sont d'autres exemples d'équipementiers / intégrateurs parmi les plus connus.

Viennent ensuite les **ensembleurs** : sociétés utilisant les CPS assemblés par les intégrateurs, pour les **intégrer dans un système plus large** (étapes 4 voire 5 de la chaîne de valeur). Ces entreprises disposent d'une expertise permettant d'adapter le CPS pour en exploiter le potentiel maximum, dans le contexte métier qui leur est propre. On peut citer parmi les grands ensembleurs les sociétés telles qu'Airbus, Dassault, Renault, Eiffage, Schneider, Air Liquide...

On les distingue enfin des **opérateurs, propriétaires et utilisateurs des produits finis** intégrant des CPS. Ainsi l'avion assemblé par Airbus pourra être opéré par Air France, ou toute autre compagnie devenant propriétaire d'un des avions du Groupe. Malgré leur distinction, les opérateurs ne sont pas pour autant exclus de la phase aval de la chaîne de valeur : ils peuvent avoir, en fonction de leur **degré d'implication, une forte influence sur les spécifications**.

Aux différentes étapes de la chaîne de valeur des CPS peuvent intervenir des **sociétés de services** : elles se positionnent en appui sur une des **phases du cycle de vie du CPS** (définition des exigences, étude de faisabilité, conception, fabrication, intégration, etc.) ou sur un ensemble de phases. Si les plus grandes sociétés disposent d'un panel quasi-complet de compétences leur permettant de cumuler plusieurs expertises, d'autres privilégient une posture d'expert : ainsi, plusieurs sociétés de services peuvent intervenir simultanément ou consécutivement au cours d'un même projet. Elles sont à distinguer des **fournisseurs de services, tels que les Gafa (m)**, proposant un ensemble de technologies et de services génériques : Amazon AWS, Microsoft Azure IoT hub, etc.

Les fournisseurs de composants logiciels et de technologies

Chiffres clés

Appartenant à la grande famille des éditeurs de logiciels, trois types d'acteurs interviennent au niveau des CPS sur la partie des composants logiciels. Les premiers sont les éditeurs de logiciels systèmes et réseau (12,2 % des entreprises du domaine), travaillant sur le développement de systèmes d'exploitation, de logiciels systèmes permettant l'exécution de logiciels applicatifs ou encore de logiciels réseau. Le second segment regroupe les éditeurs d'outils de développement et de langages (4,9 % des entreprises), essentiels aux éditeurs et aux entreprises pour programmer ou faire évoluer leurs solutions. Dernier segment et le plus important, celui des éditeurs de logiciels applicatifs (82,9 % des entreprises), permettant de réaliser une fonction ou un processus métier spécifique¹⁹, cependant même s'ils représentent la majeure partie des éditeurs de logiciel, une petite partie travaille sur les CPS comme l'a démontré l'étude des briques technologiques. Statistiquement, le secteur se porte particulièrement bien : il regroupait plus de 3 050 établissements en 2017, totalisant près de 56 500 salariés. Entre 2010 et 2017, le nombre d'établissements a progressé de plus de 12 %, tandis que la croissance des effectifs atteignait plus de 22 %²⁰. On constate ainsi que non seulement, le secteur est dynamique en matière de création d'emploi, mais également que la taille moyenne des entreprises croît, traduisant une structuration de plus en plus importante des acteurs.

La région Île-de-France réunit, à elle-seule, 52,8 % des effectifs salariés du secteur, symptomatique d'une hyper-concentration géographique aux répercussions notables en matière de développement (proximité relative avec les donneurs d'ordres, concentration des besoins en recrutements...)²¹.

Il est plus difficile de chiffrer les autres composants technologiques qui ne s'apparentent pas à des logiciels. Cette partie de l'écosystème est très diffuse. Composée de moins de 300 entreprises, celles-ci ont développé des solutions complètes intégrant hardware et software pour la plupart. La plupart sont des TPE et petites PME et peinent à se faire connaître auprès des donneurs d'ordre.

Particularité du chaînon

En termes de marché, les activités et produits de ces sociétés couvrent un très large panel d'applications, et s'adressent à une grande variété de publics. La principale problématique vient de la caractérisation de plus en plus difficile du périmètre de chaque entreprise, et de ses technologies logicielles. Par exemple, des entreprises spécialisées dans les logiciels de biométrie ont connu une croissance exponentielle ces dernières années. De sociétés spécialisées sur une technologie de pointe à destination de secteurs particuliers comme la sécurité et la défense, certaines se sont transformées en expertes métiers de la sécurisation des transactions, tandis que d'autres ont pris le chemin des applications grand public comme le contrôle d'accès (ex. : déverrouillage des smartphones par reconnaissance faciale). Les classer dans la même catégorie des entreprises de technologies biométrique est juste, bien que peu représentatif de la réalité de leurs activités.

On constate ainsi une importante ramification du secteur en sous-secteurs variés, souvent constitués autour d'une brique technologique particulière. Se côtoient donc des acteurs spécialisés tant dans les logiciels de simulation, que dans les logiciels de modélisation, d'analyse et traitement de bases de données, etc. À leurs côtés s'imposent de grandes entreprises plus protéiformes, parmi lesquelles nous pouvons citer le français Dassault Systèmes, ou encore Cégédim, acteur spécialisé dans les logiciels pour le secteur santé.

À cela s'ajoutent des fabricants de briques technologiques utilisant capteurs, actionneurs ou autres produits électroniques dans lesquels sont intégrés du code, notamment dans les briques suivantes :

- les architectures horizontales et verticales ;
- les technologies d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision ;

¹⁹ Données Insee-Esane, 2016

²⁰ Données Acooss, 2018 – À partir des codes NAF 58.29A, 58.29B et 58.29C

²¹ Données Acooss, 2018 – À partir des codes NAF 58.29A, 58.29B et 58.29C

- les technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie ;
- les technologies de communication, d'interopérabilité et d'interfaçage (notamment IHM).

L'écosystème français est donc riche à la fois de l'expertise et de la diversité de ses entreprises, allant des champions internationaux aux *start-up* dynamiques comme le démontre l'état des lieux des briques technologiques. Néanmoins, les principaux poids lourds du secteur, actifs en France et plus largement en Europe, sont les filiales de grands groupes étrangers.

Enjeux technologiques à relever

Si le secteur bénéficie d'une croissance économique synonyme d'une évolution quantitative très favorable, ses évolutions qualitatives n'en sont pas moins importantes. Les entreprises historiquement positionnées sur l'édition de logiciels traditionnels (ERP, CRM...) ont vu leur activité et leur modèle économique fortement évoluer sous l'impulsion du SaaS, l'évolution des réglementations (ex. : RGPD) ou encore de l'internationalisation de leur offre. Certains ont alors saisi l'opportunité de développer de **nouveaux services ou produits en profitant de l'émergence de l'IoT, du Big data ou encore de la cybersécurité**, entrant de fait directement sur le marché des fournisseurs de solutions (applicatives) pour les CPS.

Autre tendance forte relevée par le panorama annuel du marché de l'édition de logiciel publiée par le Syntec Numérique, le **« data-centrisme »** des éditeurs de logiciels. Les éditeurs de logiciels développent leur offre autour de deux composantes clés : d'une part, les deux briques technologiques en question, et d'autre part, la data science (le fait d'extraire des connaissances dans les données). Cela implique cependant plusieurs contraintes, parmi lesquelles une se détache plus particulièrement : la sécurisation des données, et par extension celle des logiciels. Car plus les données traitées sont nombreuses et de valeurs, et plus leur protection devient stratégique. Si la **sécurisation globale de la donnée** passe par plusieurs étapes (sécurisation des composants matériels, sensibilisation des utilisateurs...), celle du logiciel y tient un rôle majeur. Ainsi, d'ici 2020, les investissements des éditeurs de logiciels se concentreront d'abord sur la cybersécurité, puis sur l'internet des objets et l'intelligence artificielle²².

Mais si une tendance devait s'imposer comme la principale évolution du secteur, c'est celle de **l'explosion de l'Open Source**. Un logiciel *Open Source* est un programme informatique dont le code source est distribué sous une licence permettant à quiconque de lire, modifier ou redistribuer ce logiciel. Avec un taux de croissance annuel moyen de 8,1% entre 2017 et 2020, le marché français du logiciel libre et de l'Open Source passera de 4,46 milliards d'euros en 2017 (dont 4,18 milliards d'euros en services et 278 millions d'euros en logiciels) à 5,650 milliards d'euros à horizon 2021, selon le cabinet d'études PAC²³. D'après la même étude, la France tient par ailleurs la place de leader européen, avec 23 % du marché européen de l'Open Source, le Royaume-Uni (4,2 milliards d'euros) et l'Allemagne (4 milliards d'euros) la talonnant de près.

Si ce fort développement déjà observé depuis quelques années dans le secteur, il est particulièrement avéré pour les composants logiciels à destination des CPS. Linux et d'autres logiciels **Open Source s'imposent comme des technologies de référence**, parfois pour des applications très spécifiques aux systèmes embarqués ou aux CPS. C'est par exemple le cas du système d'exploitation Contiki, créé par une équipe de recherche suédoise et disponible gratuitement sous licence BSD. Ainsi, d'autres technologies Open Source gagnent en popularité. **Se pose cependant la question du modèle économique** : quels seront les acteurs qui seront prêts à supporter les coûts de développement, dans l'optique d'ouvrir à tous le fruit de leur travail ? L'alternative la plus immédiate sera sans doute à trouver dans **la mise à disposition (tarifiée) et la normalisation des technologies**. Mais les ressources existent déjà et se développent : 45 % des fournisseurs investissent plus de 15 % de leur chiffre d'affaires en R & D dans des projets libres et Open Source.

Concernant les composants technologiques, les enjeux sont ceux de développement de technologies viables et reconnues par le marché. **La capacité à créer un écosystème de transformation des briques technologiques en intérêt économique se heurte à la taille des entreprises, mais également à une filière qui manque aujourd'hui de structuration pour un travail coordonné**. Cette non-structuration pose également une question sur la capacité à promouvoir des

²² Syntec Numérique, 2016

²³ Syntec Numérique, CNLL, Systematic Paris Région, « Etude sur l'impact du logiciel libre / Open Source en France en 2017-2021 »

standards et des normalisations au niveau international. La multiplicité des technologies et le manque de maturité des solutions techniques rendent ainsi la tâche plus ardue pour les entreprises à développer d'elle-même un marché.

Fabricants de composants matériels

Chiffres clés

Ces fabricants regroupent en réalité trois types d'opérateurs: les **fabricants de composants électroniques dits « actifs »** (les semi-conducteurs: circuits intégrés, transistors...), ceux dits **« passifs »** (comme les condensateurs, les résistances, les inductances...), et **fabricants de cartes électroniques** qui assemblent les composants électroniques sur un support.

Ils ont pour particularité de tous réaliser la conception et le développement de leur produit. Par la suite, la production peut être intégrée (modèle IDM), tandis que d'autres acteurs privilégient des modèles en sous-traitance de production partielle (modèle Fablite) ou totale (modèle Fabless)²⁴.

Entre 2012 et 2017 en France, le secteur a connu cinq années de **consolidation et restructuration**, perdant près de 10 % de ses établissements. En 2017, il regroupait 900 entreprises, totalisant 43 700 emplois salariés (27 100 dans la fabrication de composants, 16 600 dans la fabrication de cartes électroniques)²⁵.

Ce secteur est aujourd'hui très concentré, dominé en France par des leaders d'envergure mondiale tels que STMicroelectronics (semi-conducteur) ou Idemia (carte à puce). À leurs côtés évoluent de nombreuses entreprises sous-traitantes de l'électronique pour le compte d'autres acteurs français, mais aussi internationaux (ex. : Asteelflash).

Cette concentration est aussi géographique : 40 % des effectifs sont basés en Auvergne-Rhône-Alpes (principalement autour du bassin grenoblois).

Les marchés de ces trois catégories de composants sont très inégaux. Le plus important d'entre eux est celui des composants actifs, se chiffrant à plus de 360 milliards d'euros dans le monde en 2017. Les marchés européens et français, s'élevant respectivement à 33 et 2 milliards d'euros, représenteraient ainsi 9,2 % et 0,56 % du marché mondial.

Si le marché mondial des cartes électroniques ne s'élève quant à lui qu'à près de 45 milliards d'euros en 2017, la place occupée par l'Europe y est plus importante : 6,6 milliards d'euros, soit près de 15 % du marché mondial. Avec un marché estimé à 780 millions d'euros la France représenterait quant à elle 1,7 % du marché mondial.

Pour le 3^e marché, celui des composants passifs, l'estimation d'un marché mondial est rendue difficile par la multiplicité des produits. Cependant, l'EPCIA évalue le marché européen à plus de 4,1 milliards d'euros en 2017, dont 560 millions correspondant au marché français²⁶.

La France occupe le 2^e rang des pays européens producteurs de composants électroniques actifs et passifs, derrière l'Allemagne et devant l'Italie. Concernant la production de carte électronique, la France se classe premier pays producteur, devant l'Allemagne et la Hongrie (Italie 4^e)²⁷.

Les fabricants français exportent plus de la moitié de leur production : leur compétitivité coût est l'un des déterminants de leur réussite à l'échelle mondiale, dans un contexte de forte concurrence (notamment asiatique: Chine, Singapour, Corée...).

Toutefois, et bien que disposant d'une position satisfaisante à l'échelle Européenne, il convient de souligner que la France reste une puissance électronique mineure en comparaison avec les leaders asiatiques et nord-américains, qui ont su atteindre des tailles critiques de plusieurs milliards de dollars de chiffres d'affaires, leur permettant d'innover sous l'impulsion notamment de leurs grands

²⁴ L'Usine Nouvelle, d'après ACSIEL Alliance Electronique

²⁵ Données Acoos, 2018 code 26.11Z et 26.12Z

²⁶ Association européenne de l'industrie des composants passifs (EPCIA), 2018

²⁷ Eurostat, 2016

comptes clés positionnés sur les marchés de masse²⁸. **Le marché français des fournisseurs de composants pour l'embarqué est considéré comme un marché de niche.**

Particularité du chaînon

Après deux années 2015-2016 de croissance quasi nulle, l'année 2017 a enregistré une croissance soudaine et imprévisible du marché mondial des composants de 20 %.

Il bénéficie en effet de la **bonne santé économique des principaux secteurs applicatifs**, en France et dans le monde : l'automobile (+ 5 % en 2018), l'aéronautique (+ 3,7 %) ou encore l'industrie électrique, électronique grand public et informatique (+ 2,8 %). S'y ajoutent des applications émergentes en forte croissance : multiplication des objets connectés et, plus généralement, accélération des applications électroniques tirées par des besoins sociétaux tels que l'environnement (EV/HEV, solaire, éolien, *smartgrid*...), la sécurité (conduite autonome, cyber sécurité, défense...), la connectivité (smartphone, réseaux sociaux, *data-centers*...), le confort et les loisirs. En conséquence, la demande de ces composants a explosé.

Cependant, dans le même temps, la **production n'a que faiblement augmenté sur le territoire français**. Sans préavis suffisant, l'augmentation forte et subite de la demande en composants et circuits imprimés a conduit à des changements de mix produits et de saturations de lignes de production affectant toutes les familles de produits (composants actifs, passifs, connecteurs, circuits imprimés). La **pénurie est plus sévère sur certaines lignes de produits** : composants de puissance, condensateurs céramique ou MLCC, capteurs, mémoires. En résulte un fort déséquilibre entre offre et demande, à l'échelle mondiale.

En réponse à cette situation récente, les fabricants français ont réembauché. Cette solution n'en reste pas moins partielle et provisoire : d'une part, elle ne permet pas de **répondre à la totalité de l'excédent de demande** ; d'autre part, elle exacerbe une autre situation de pénurie constatée depuis plusieurs années, celle des **matières premières rares**. Certains matériaux comme le Silicium sont des exemples amplement connus, d'autres comme le Gallium le sont beaucoup moins.

Enfin, il est à noter que ces phénomènes de pénurie ont un effet amplificateur, beaucoup d'acheteurs de composants ayant tendance à surévaluer leurs besoins pour tenter de garantir leurs approvisionnements à court et moyen terme²⁹.

Enjeux technologiques à relever

Les fabricants de composants constituent un domaine industriel à part entière, avec ses propres enjeux de chaîne logistique, de qualité, d'innovation ou encore de production. Ils sont également le premier maillon industriel au contact d'un large panel d'acteurs : assembleur, fournisseurs de technologies, clients finaux... De ce fait, ces fabricants doivent trouver le juste positionnement technologique pour répondre aux besoins multiples du marché, sans pour autant aboutir à des produits trop généralistes (au détriment de la performance, de l'adaptation à l'environnement d'exploitation, etc.). Il existe également, pour chaque grand segment de la fabrication de composants, de réelles disparités entre les acteurs français « figures de proue » minoritaires, et une très grande majorité de PME aux capacités incomparablement plus modestes, en particulier s'agissant de leurs capacités de production, d'innovation, d'internationalisation, et de positionnement stratégique. L'enjeu technologique est donc avant tout un enjeu stratégique : quel positionnement adopter pour les fabricants français ? Si les marchés à très grands volumes (généralement à destination des produits grand public) sont à ce jour très largement dominés par les fabricants asiatiques, les segments historiques de l'électronique professionnelle (automobile, aéronautique, industrie ou encore médical) ainsi que les segments émergents notamment des objets communicants sont susceptibles d'offrir des débouchés durables pour les acteurs français et européens dans tous les maillons de la chaîne de valeur.

Un enjeu connexe au précédent est donc celui de **l'industrialisation et de la montée en cadence des fabricants**, pour réduire les coûts de production. Les entreprises françaises font en effet face à un contexte concurrentiel relativement défavorable : éloignement des gisements de matériaux et

²⁸ DGE, Enjeux et perspectives pour la filière française de la fabrication électronique, Juin 2019

²⁹ Electronique Mag, Janvier 2018

matières premières, concurrence des pays à main d'œuvre à bas coût... Elles doivent donc développer des programmes d'innovation de pointe et investir dans la montée en capacité de l'appareil productif. Cette modernisation de l'appareil productif est une condition sine qua non de la pérennisation de la production française et, à son paroxysme, de la relocalisation de la production en France. Cela induit non seulement des investissements financiers, mais également une montée en compétences liée à l'industrie du futur ainsi qu'une transformation parfois profonde des processus et des organisations.

De façon transverse à l'industrie, et à l'échelle mondiale, on relève une autre tendance durable guidant les progrès des fabricants français : la **miniaturisation**. La miniaturisation des composants n'est rendue possible que par un travail de R & D & I couvrant de nombreux domaines : matériaux, lithographie, outils de conception, intégration des différents éléments, performances attendues, etc. Plus largement, l'immense défi technologique que propose la miniaturisation, et la difficulté croissante à trouver des solutions toujours plus performantes dans le champ de l'électronique poussent les fabricants de composants à explorer de nouveaux domaines jusqu'alors peu envisagés et à s'associer à des acteurs d'autres secteurs d'activité pour trouver des solutions innovantes. Par exemple, des fabricants de semi-conducteurs - dont Intel, STMicroelectronics et Brewer Science - se sont associés au groupe de chimie de spécialité Arkema, lui-même associé au CEA-Leti de Grenoble et le LCPO (Laboratoire de chimie des polymères organiques) de Bordeaux pour développer un procédé de fabrication de nano-composants électroniques, la « lithographie par auto-assemblage dirigé », qui repose sur la capacité de certains copolymères à auto-organiser leurs molécules de façon périodique à l'échelle du nanomètre³⁰. La nano-lithographie permet de concevoir des circuits aux capacités décuplées et de poursuivre la miniaturisation des puces, en doublant tous les 18 mois la performance des processeurs, selon la célèbre « loi de Moore »

Nous n'évoquerons pas en détail les autres (nombreux) avantages qui résulteraient d'un travail plus collaboratif entre les fabricants de composants, travaillant historiquement sur un modèle en silo assez marqué. Mais si les fabricants français s'ouvrent peu à peu à leurs confrères et à de nouveaux partenaires pour faire évoluer les solutions hardware, ils doivent aussi intégrer dès les premières réflexions les enjeux et problématiques liés à la couche software, de plus en plus présent et complexe. Plus la fusion entre la partie hardware et la partie software sera importante, et plus le produit sera performant (rapide, fiable, sécurisé...). Ce postulat étant largement partagé par la profession, on assiste à la naissance lente, mais concrète d'une démarche de coconception matériel - logiciel, qui devra être largement adoptée dans les années à venir.

Les concepteurs et fabricants de sous-systèmes électroniques embarqués : équipementiers et systémiers / OEMs

Chiffres clés

Ce sont les entreprises qui commercialisent les différents systèmes, sous-systèmes et équipements de l'électronique. Il peut notamment s'agir :

- **de « systémiers », ou « assembleurs »,** qui intègrent les différentes pièces détachées d'un système en pouvant se spécialiser dans la conception, le développement et le maintien en opération de ce système ;
- d'« OEM » ou « équipementiers », qui conçoivent et fabriquent des pièces détachées ;
- d'« ODM », qui conçoivent et fabriquent entièrement leurs produits, mais pour le compte d'une tierce marque...
- ... ou sous leur propre marque : on parle alors « d'OPM ».

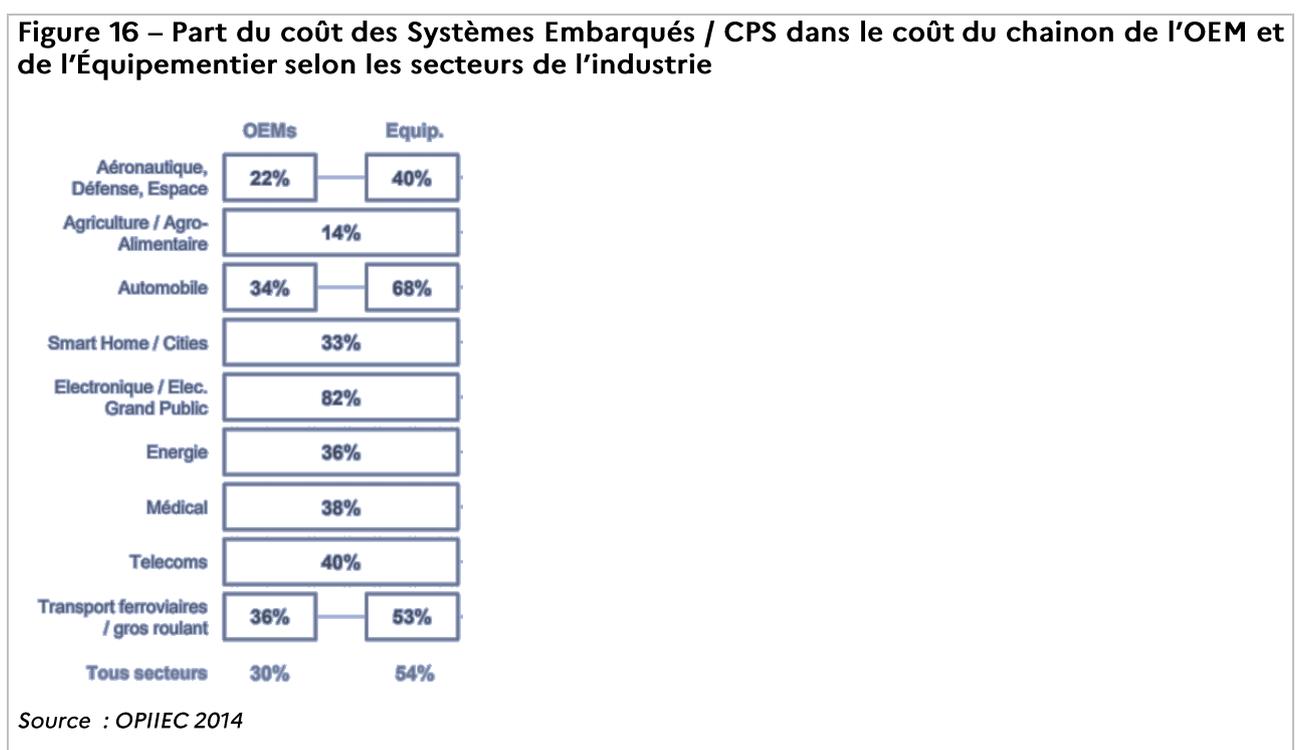
³⁰ <https://www.arkema.com/fr/innovation/solutions-pour-lelectronique/>

Le **périmètre d'activité de chacun des acteurs du maillon est ainsi très variable** selon la typologie de produits, le secteur applicatif et son organisation historique... De fait, dans la plupart des secteurs, les systémiers et OEM sont considérés comme un seul et même groupe d'acteurs. Trois secteurs clients nécessitent une distinction nette entre équipementiers et industriels / systémiers :

- Aéronautique, Défense, Espace :
 - Systémiers – Airbus, Nexter, Dassault Aviation...
 - Équipementiers / OEM – Safran, Zodiac...
- Automobile :
 - Systémiers – Renault, PSA, Bugatti...
 - Équipementiers – Valeo, Bosch, Continental...
- Transports Ferroviaires :
 - Systémiers – Alstom, Bombardier...
 - Équipementiers – Faiveley, Knorr-Bremse...

Dans les autres secteurs, le donneur d'ordre industriel ne fait pas nécessairement appel à des équipementiers. Il conçoit, développe et réalise le système intégrant des CPS de bout en bout, avec des éventuels appuis de compétences d'ingénieries tierces.

Il a ainsi été possible d'identifier, pour chaque type d'acteur et selon le secteur applicatif, la part du coût que représentent les systèmes embarqués et CPS dans le coût de son intégration.



Particularités du chaînon

Les équipementiers jouent souvent le **rôle d'ensemblier, d'intégrateur des CPS**. En lien avec les sociétés de services et les fournisseurs de technologies, ils apportent une compétence permettant de concevoir, de produire ou faire produire, et parfois d'assembler le système.

À ce jour, tous les secteurs de la filière CPS sont adressés par les **concepteurs et fabricants de sous-systèmes**. Le sentiment d'appartenance à la filière est plus fort dans certains secteurs, notamment les secteurs historiquement en avance sur les systèmes dits « critiques » comme l'aéronautique ou l'automobile, qui n'apparaissent pourtant pas aux trois premiers rangs des secteurs applicatifs (automatique industrielle, télécommunications, électronique grand public).

Les entreprises de service du numérique (ESN)

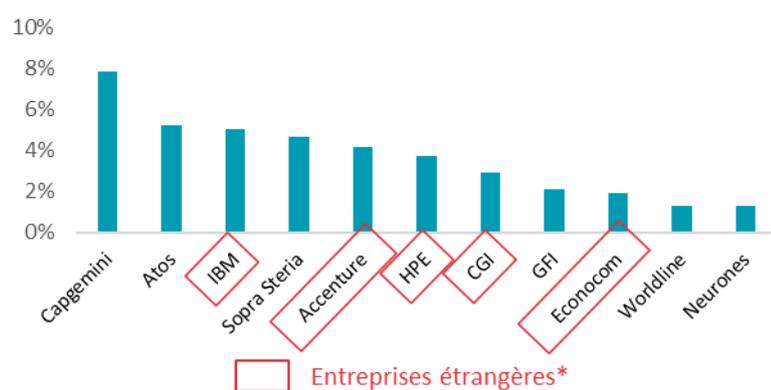
Chiffres clés des ESN

Les entreprises de services du numérique (ESN) sont expertes dans le domaine des nouvelles technologies et du numérique. Elles peuvent englober plusieurs métiers (conseil, conception et réalisation d'outils, maintenance ou encore formation) et elles ont pour objectif principal d'accompagner une société cliente dans la réalisation d'un projet. Elles proposent des prestations qui sont destinées à améliorer le **fonctionnement et les infrastructures internes de leurs clients, leurs outils et leurs process de gestion et d'administration**.

La production française des ESN était estimée en 2017 à 25,7 milliards d'euros, en augmentation de + 2,9 % cette année-là. Cette croissance, confirmée pour 2018 (+ 3 %), est cependant inégale selon la taille des entreprises: tandis que les grandes ESN ont enregistré une nette accélération de leur croissance, leurs donneurs d'ordres n'hésitant pas à investir massivement dans leur transformation numérique, les petites entreprises ont souffert des pressions concurrentielles du secteur³¹.

Le marché a pour particularité son importante **fragmentation et internationalisation**. Les grandes entreprises ne se partageaient que 40 % du marché, et le leader Capgemini n'en représentait pas plus de 8 %. L'une des raisons est la forte internationalisation des marchés. Capgemini réalise 80 % de son chiffre d'affaires à l'export, tandis que cinq des dix premiers acteurs du marché français sont étrangers (figure 10).

Figure 17 – Parts de marché des grandes entreprises ESN en France en 2017



Source : Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

En 2017, une seule ESN française était présente dans le Top 10 mondial: Capgemini. Un classement dominé par les Américains (cinq entreprises, dont IBM et Accenture, respectivement numéro 1 et 2 mondiaux).

Particularités du chaînon

Selon leur activité et leur rayonnement géographique, les ESN peuvent être classés selon **quatre profils types** :

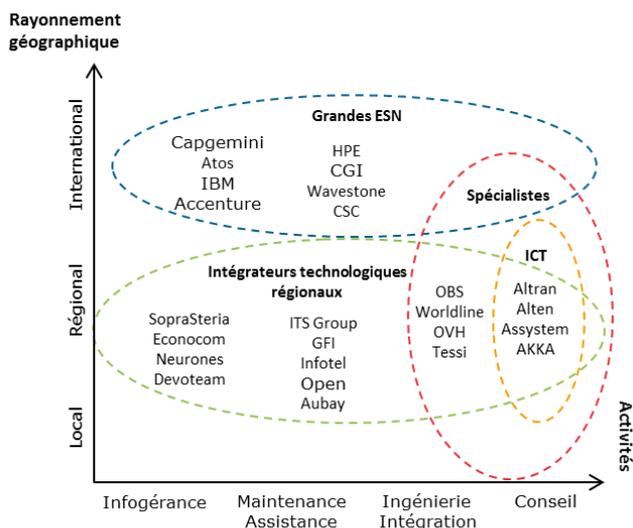
- les grandes ESN sont les majors du secteur, adressant principalement les grands comptes, par l'intermédiaire d'une offre de prestations complète allant du conseil jusqu'à la maintenance en passant par l'intégration ;
- les **intégrateurs technologiques régionaux** sont des acteurs au périmètre d'intervention limité à la France voire l'Europe, s'adressant tant aux PME qu'aux grands comptes, en

³¹ Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

s'appuyant sur des fournisseurs technologiques externes et des éditeurs tiers pour l'intégration de services applicatifs ;

- les ESN spécialisées sur une **expertise technologique** ou un secteur client, fournissant des prestations de conseil et des solutions clés en main généralement développées en interne ;
- les **ICT diversifiées vers les activités ESN**, proposant des prestations de conseil et d'assistance technique en lien avec le déploiement de nouvelles technologies chez le donneur d'ordres.

Figure 18 – Les quatre profils d’ESN (Top 25 des ESN selon leur CA réalisé en France en 2017)



Source : Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

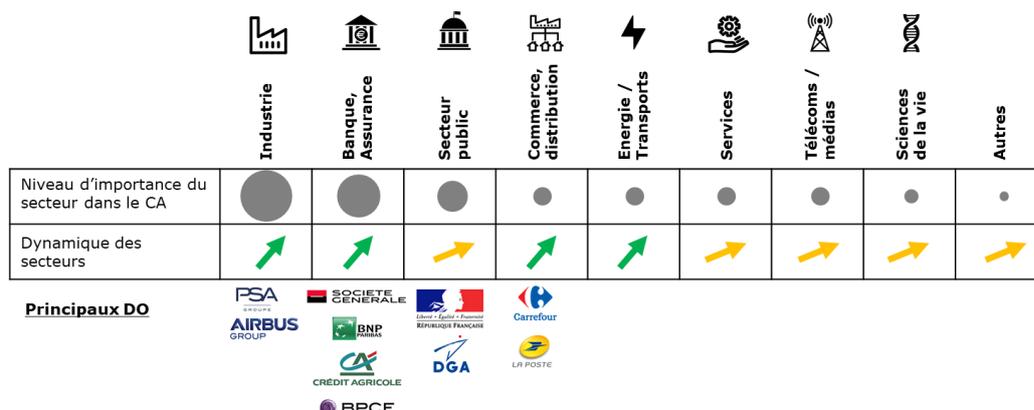
Enjeux technologiques à relever

Historiquement, le rôle d’une Société de services en ingénierie informatique (SSII ou SS2I) était de répondre à un besoin d’expertises et des compétences en informatique pour les entreprises qui souhaitaient les externaliser. Avec l’avènement des réseaux et d’internet, l’informatique n’a cessé de muter, intégrant les nouvelles technologies et ce qu’elles impliquent. Ainsi, il a fallu apprendre à composer avec la **sécurité, la sauvegarde, la mobilité et la disponibilité des données** ainsi qu’avec la capacité à fournir des informations en temps réel³². Ainsi, à partir de 2013, les SSII ont pris le titre d’ESN (Entreprises de services du numérique), reflétant mieux la réalité, la valeur et la complexité de leurs expertises nouvelles.

Les ESN ont généralement des activités variées, couvrant plusieurs secteurs d’activités, et dont le portefeuille client est assez fortement influencé par son bassin économique d’origine. Cependant, quatre clientèles fortes se détachent : Banque/assurance, Énergie/transports, Commerce/distribution et Industrie. Ces clientèles, à la demande dynamique, tirent positivement l’activité des ESN françaises.

³² Infologo, 2019

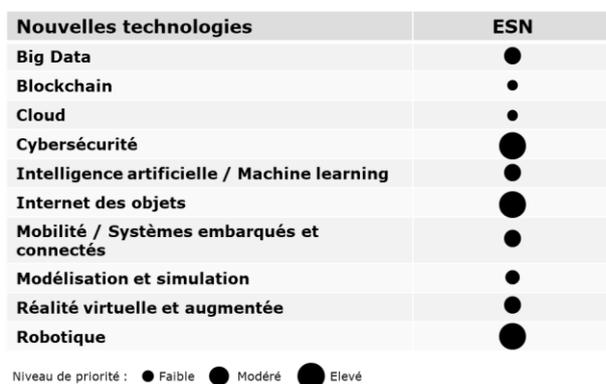
Figure 19 – Principaux secteurs clients des ESN en France



Source : Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

Mais le dynamisme des marchés support n'est pas la seule raison au développement de l'activité des ESN. Si 78 % des ESN augmentent leur chiffre d'affaires en 2018, cela devrait perdurer avec le développement des nouvelles offres de **services à forte valeur ajoutée (comme la cybersécurité et l'intelligence artificielle / les systèmes cognitifs)** et celui des offres *cloud* qui s'intensifie. De fait, l'infogérance d'infrastructure recule, en raison du développement du *cloud*. De façon générale, les ESN se positionnent très fortement sur les **SMACS** (Social, Mobilité, Analytics et Cloud) : les SMACS atteindront 28,5 % du marché logiciels et services, et afficheront une croissance de 14,7 %.

Figure 20 – Priorités de développement des nouvelles technologies au sein des ESN



Source : Katalyse

Les sociétés d'ingénierie et conseil en technologie (ICT)

Chiffres clés

Les **sociétés d'ingénierie et conseil en technologie (ICT)** ont pour mission de contribuer à la conception et/ou à la fabrication d'un produit ou d'un équipement. L'ensemble des prestations des ESN et ICT jalonnent le cycle de vie d'un produit ou d'un équipement, et vont de l'assistance à l'expression du besoin à la sûreté de fonctionnement et le maintien en conditions opérationnelles, en passant par le **développement et l'accompagnement des clients dans les processus d'industrialisation**. La frontière entre ces deux types d'acteurs est aujourd'hui de plus en plus poreuse, l'offre des ESN se diversifiant généralement vers celle des ICT, et *vice-versa*.

On comptabilise à ce jour environ 4 600 ICT en France. La production française des ICT était estimée à 9,2 milliards d'euros en 2017, avec des taux de croissance supérieurs à ceux des ESN : + 4,2 % en 2017 et + 4,5 % en 2018. Là encore, les acteurs de grande taille tirent les chiffres vers le haut : 87 % des entreprises de grande taille ont augmenté leur chiffre d'affaires en 2017 contre 59 % des PME³³.

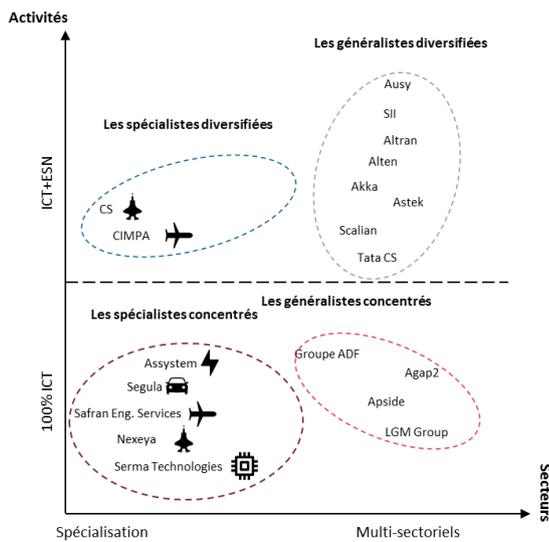
Particularités du chaînon

Selon leur activité et leur niveau de spécialisation sectorielle, les ESN peuvent être classés selon quatre profils types issus du croisement de deux facteurs d'analyse :

- une première distinction s'opère entre les ICT ayant fait le choix stratégique de rester concentrées sur les **activités liées à l'ingénierie constituant leur cœur de métier** (ex. : Assystem, Segula, etc.), avec celles qui se sont diversifiées vers les services du numérique dont le poids dans l'activité globale de l'entreprise peut atteindre plus de 50 % pour Ausy ;
- une seconde distinction naît de la considération de la spécialisation sectorielle des ICT : certaines sont reconnues pour leur **expertise métier dans un ou deux secteurs spécifiques** tels qu'Assystem dans l'énergie ou encore CS qui est spécialisée dans l'espace, la défense/militaire et le naval ; d'autres visent une large gamme de secteurs.

³³ Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

Figure 21 - Les quatre profils d'ICT (Top 25 des ICT selon leur CA réalisé en France en 2017)



Source : Katalyse / D & Consultant – OPIIEC 2018

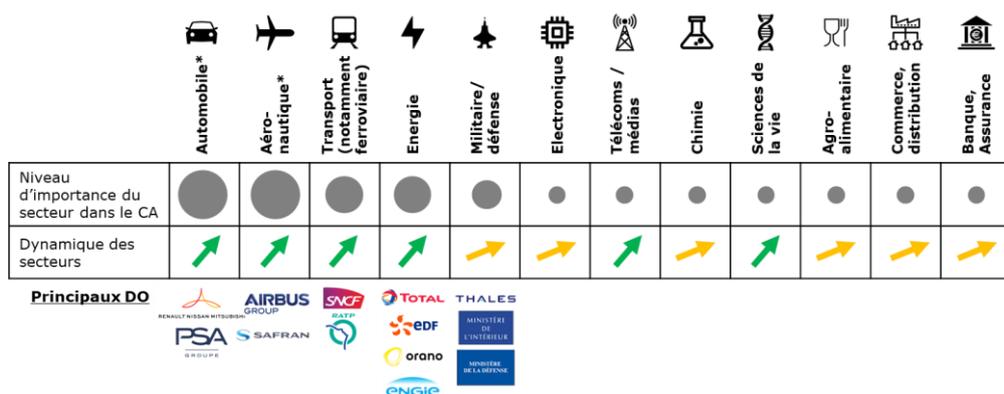
Si l'écosystème des ESN est relativement atomisé, celui des ICT est **beaucoup plus concentré** : le top 10 des ICT se partageait près de la moitié du marché français en 2017. C'est également un marché plus préservé des concurrents internationaux : la totalité des entreprises du Top 10 en France sont des entreprises françaises. Mais à l'inverse, le poids des entreprises françaises sur la scène internationale est plus important. En 2016, quatre ICT françaises étaient présentes dans le Top 10 mondial : Altran (3^e), Alten (4^e), Akka (8^e) et Egis (9^e). C'est le pays le plus représenté dans ce classement, complété par deux entreprises néerlandaises, Arcadis (1^{er}) et Brunel (6^e), une britannique, WSAtkins (2^e), une autrichienne, une suédoise et une allemande.

Enjeux technologiques à relever

Les activités des ICT recouvrent (en totalité ou en partie) le conseil en R & D, les études techniques, les études de faisabilité, la conception et l'ingénierie produit, le prototypage, les essais, l'assistance à l'industrialisation... soit un large panel d'opérations de conception et d'industrialisation de produits et d'équipements au service des sociétés industrielles (mais pas uniquement).

De ce fait, les ICT sont en mesure de couvrir la quasi-totalité des enjeux technologiques liés à leurs industries clientes, et par extension, les enjeux spécifiques aux CPS. Selon une étude réalisée par les cabinets Katalyse et D & C, l'automobile, l'aéronautique, l'énergie et les transports sont les principaux secteurs qui tirent la croissance depuis 2017. **L'automobile et l'aéronautique sont les secteurs qui se prêtent le mieux à l'externalisation de la R & D** : ils représentent à eux deux près d'un tiers du marché des ICT.

Figure 22 – Principaux secteurs clients des ICT en France

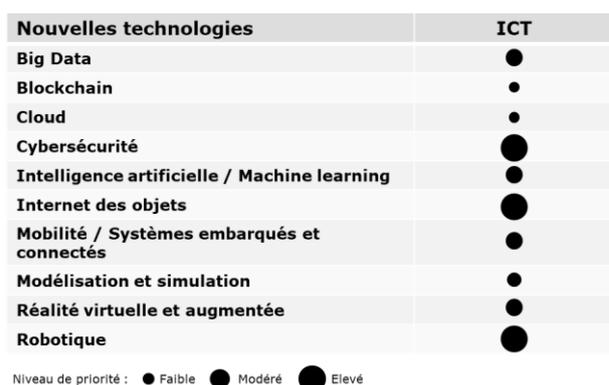


Source : Katalyse / D&Consultant – OPIIEC 2018

Pour relever ces nouveaux défis, ces acteurs embaucheront en très grand nombre dans les années à venir : 80 000 recrutements sont annoncés sur la période 2018-2028, du fait notamment d'un fort *turn-over*, mais également de croissance des marchés porteurs. Parmi ces embauches, cinq thématiques clés porteront la dynamique :

1. Industrie du futur : 14 000 recrutements prévus
2. Objets connectés / IoT : 12 500 recrutements prévus
3. *Smart grid* / transition énergétique / nouvelles énergies : 11 500 recrutements prévus
4. Véhicule autonome / mobilité : 9 000 recrutements prévus
5. *Smart city* / *smart building* : 9 000 recrutements prévus
5. Responsable usage et communauté

Figure 23 – Priorités de développement des nouvelles technologies au sein des ICT

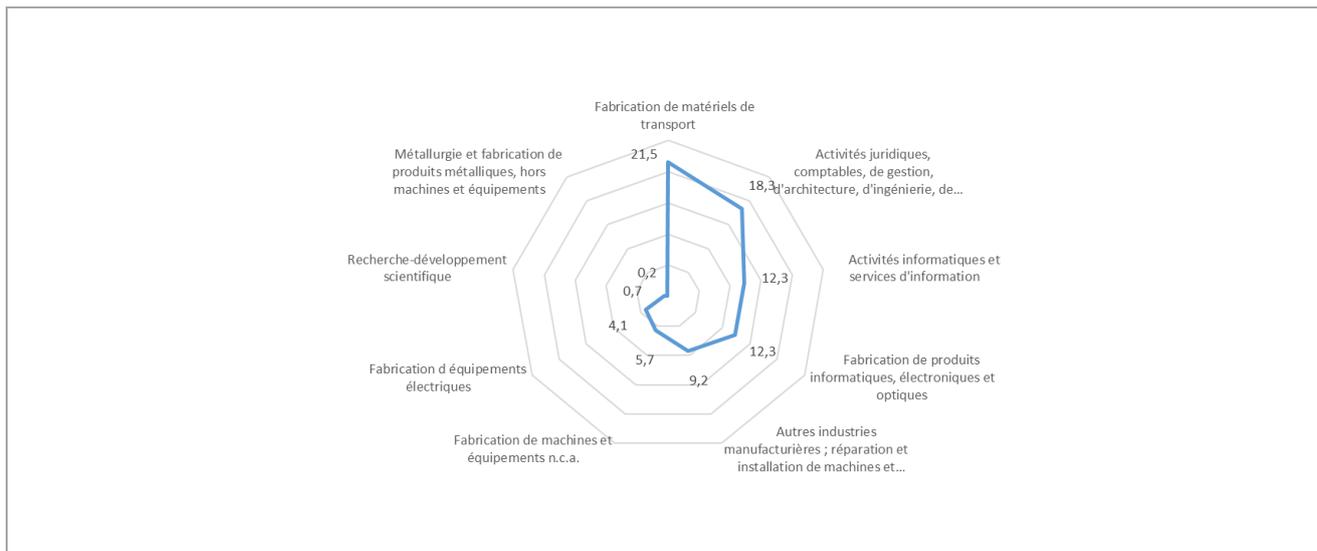


Source : Katalyse

Estimation du poids de la filière française

À partir de la production à prix courants de 2018, il est possible de donner une approximation sur les différentes branches produisant des CPS (la production est rattachée aux branches productives et non aux marchés applicatifs) du poids en milliards d'euros des CPS. En dehors de la **fabrication de matériels de transport** qui regroupe les secteurs automobiles et aéronautique déjà matures dans les CPS, on peut remarquer que **l'ingénierie, les activités informatiques et la fabrication de produits électronique** représentent près de la moitié de poids de la production estimée des CPS.

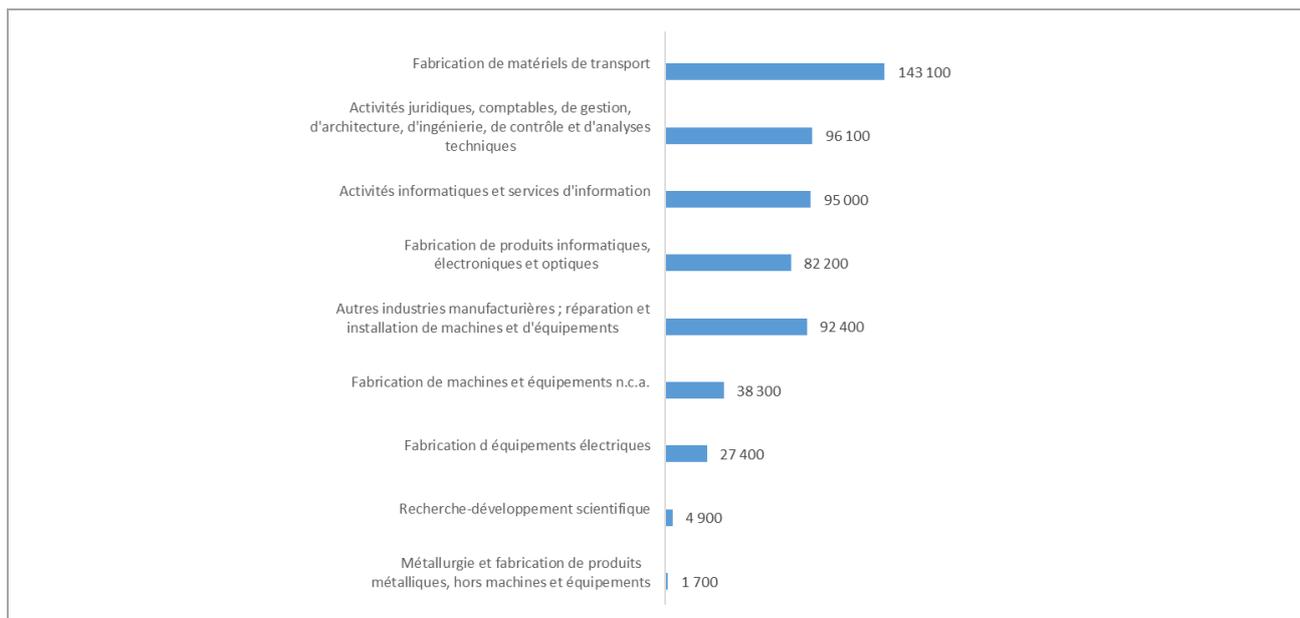
Figure 24 – Estimation en milliards d'euros du poids de la production des CPS dans les branches productives en 2018



Source : entretiens, estimation Katalyse et Production par branche à prix courants Insee, 2018.

Cette puissance de production peut s'estimer en effectifs également. **L'OPIIEC en 2014** avait estimé selon un périmètre plus restreint le poids de la filière système embarqué à **387 500 employés**. Katalyse estime aujourd'hui que plus de **580 000 emplois** sont sur des sujets traitants des CPS, dont 110 000 en lien avec l'électronique et le secteur électrique. Sur un périmètre proche de celui de l'OPIIEC, le taux de croissance annuel moyen (TCAM) serait de plus de **5,2 %** par an contre 3,3 % estimé à l'époque par l'OPIIEC. Selon les estimations de Katalyse, plus de **42 % des emplois sont internalisés sur les métiers en lien avec le développement des CPS**.

Figure 25 – Estimation des effectifs des CPS en 2018



Source : entretiens, estimation Katalyse

Les CPS représentent une part déjà importante des emplois en France comme le montre le tableau suivant qui reprend les emplois fin 2017 des secteurs français repartis selon les codes NAF.

Activités (Code NAF 732)	Effectif en 2018
Total des emplois dans la construction et d'installation des réseaux électriques, gaz, climatisation (hors Travaux publics et autres travaux)- codes 41 à 43	612 000
Total des emplois de l'industrie (hors agroalimentaire, tissus)- codes 19 à 33	1 885 000
Dont	
26.11Z Fabrication de composants électroniques	27 100
26.12Z Fabrication de cartes électroniques assemblées	16 600
26.20Z Fabrication d'ordinateurs et d'équipements périphériques	6 300
26.30Z Fabrication d'équipements de communication	16 400
26.40Z Fabrication de produits électroniques grand public	1 200
26.51À Fabrication d'équipements d'aide à la navigation	23 100
26.51B Fabrication d'instrumentation scientifique et technique	24 000
Total de la filière électronique sur les codes 26.11 à 26.51	114 700
62.01Z Programmation informatique	70 700
62.02À Conseil en systèmes et logiciels informatiques	258 900
63.11Z Traitement de données, hébergement et activités connexes	44 200
71.12B Ingénierie, études techniques	275 900
Total	649 700
Dont ESN	212 300
Dont ICT	116 000
TOTAL ESTIME des emplois CPS en FRANCE	581 000

APPLICATIONS DES CPS DANS TROIS MARCHÉS APPLICATIFS

Applications dans l'industrie

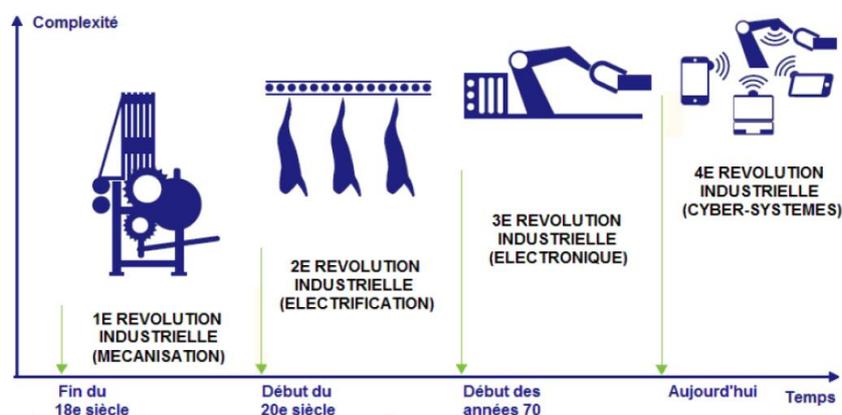
Description de la filière

L'évolution globale de la société crée de nouveaux défis pour le secteur industriel, aussi bien en matière d'équipements que de méthodes de gestion et de production. Sur le plan économique, l'enjeu est de faire face à la concurrence des pays à faible coût de main-d'œuvre et à l'augmentation de la demande de matières premières. L'accroissement des prix d'achat impacte les coûts de production, et donc la compétitivité des industries françaises et européennes. Sur le plan environnemental, les préoccupations de la société civile poussent à améliorer la qualité des produits et à diminuer les externalités négatives liées à la production. Les exigences des consommateurs, en termes de réactivité et de personnalisation des produits, imposent également aux industriels de revoir leurs procédés de conception, de fabrication et de contrôle. Le délai de mise sur le marché d'un produit étant de plus en plus court, la traçabilité des produits et des composants est désormais au cœur des sites de production. Ainsi, les sites de production sont devenus de plus en plus agiles, communicants et intelligents pour pouvoir répondre à toutes ces demandes.

C'est pourquoi le concept de « *smart factory* » ou « industrie du futur » correspond à une nouvelle façon d'imaginer les moyens de production. Avec la révolution numérique, les frontières entre le monde physique et le monde virtuel s'amenuisent et transforment les lieux de production en lieux interconnectés, favorisant l'interaction entre les collaborateurs, les machines, les produits et les consommateurs. L'objectif est de mettre en place des usines, des lieux dits « intelligents », capables d'une plus grande adaptabilité de la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle révolution industrielle.

Le schéma ci-dessous illustre la métamorphose des sites de production. Passant d'une industrie mécanisée, à la fin du XVIII^e siècle, à une industrie peu à peu robotisée, le XXI^e siècle marque les prémices d'une industrie interconnectée grâce à la diffusion des systèmes cyberphysiques.

Figure 24 – Révolutions industrielles successives



Source : Kohler Dorothee, Weisz Jean-Daniel, « Industrie du futur, une révolution sociétale ? », Allemagne d'aujourd'hui, 2017/4 (N° 222), p. 44-58.

Cette transformation s'appuie sur un ensemble de technologies interdépendantes et communicantes, regroupées autour de problématiques clés telles que la logistique intelligente, la sécurité industrielle, ou encore l'interopérabilité des systèmes. La 4^e révolution industrielle est ainsi fondée sur l'accroissement de la vitesse de traitement et de stockage de l'information et sur le développement massif de réseaux de communication.

Cette nouvelle mutation technologique, liée à l'arrivée du numérique, est caractérisée par une interconnexion des machines et des systèmes au sein des sites de production ainsi qu'à l'extérieur de ces sites. Elle ouvre ainsi la voie à une nouvelle organisation des moyens de production. Si ce phénomène est appelé révolution, c'est que l'industrie du futur ne se contente pas d'optimiser des solutions existantes, mais intègre de réelles transformations amenant de nouvelles solutions pour les technologies et les modes d'organisation.

La France a entrepris deux plans successifs, l'un en 2013 et l'autre en 2015, afin d'accompagner la mutation de ses industries, rattraper le retard en termes d'investissements et améliorer la position du pays face à la concurrence internationale.

Ainsi en 2013, la France a initié le plan « Nouvelle France Industrielle » sous l'égide du ministère du Redressement productif, qui a défini 34 priorités orientant la politique industrielle française, associant acteurs publics et entreprises privées. Parmi les grandes tendances induites par le numérique dans l'industrie, le livre blanc 2016³⁴ de l'industrie du futur de Syntec numérique évoque notamment :

- l'économie de la fonctionnalité, c'est-à-dire une économie plus orientée services et usages, qui s'impose à tous les secteurs, dont l'industrie, nécessitant de revoir les modèles économiques ;
- les évolutions des exigences des clients en termes de produits personnalisés ;
- l'évolution des produits, devenant plus intelligents et communicants, mais également l'évolution des outils de production, de transport et de logistique.

Aujourd'hui le besoin est d'intégrer de nouvelles technologies disruptives, mais également d'intégrer des investissements déjà existants des entreprises dans un flux plus global de l'information. Rappelons qu'en 2016, les branches industrielles avaient dépensé 28,5 milliards d'euros en investissements (investissements corporels bruts, hors apports), soit un taux d'investissement de 13,2 %. Cet élan d'investissement va se poursuivre dans les années futures pour améliorer l'appareil productif et les organisations pour répondre aux défis de l'industrie de demain.

De nombreuses technologies portant sur les capteurs, les communications, les systèmes embarqués, les objets connectés ou l'aide à la décision ont pu atteindre un haut degré d'innovation et une maturité d'usage, relative à l'industrie.

En parallèle, de nombreux sujets transverses sont au cœur des réflexions des industriels :

- une gestion collaborative de la conception prenant en compte les retours d'expériences et les communautés de pratiques ;
- l'optimisation de la production et la diminution de la pénibilité ;
- l'amélioration de la maintenance notamment par une maintenance préventive ;
- le développement d'une chaîne logistique révisée.

Les blocs technologiques prioritaires

La production en temps réel

L'usine 4.0 est un système interconnecté qui relie machines, méthodes de gestion et produits. Aussi, un ensemble de technologies clés la constitue afin que l'usine traditionnelle devienne totalement digitalisée, flexible, tournée vers ses parties prenantes et responsables sur le plan sociétal et environnemental. Les technologies de l'intelligence artificielle sont les moteurs de cette quatrième révolution industrielle. Elles reposent sur le Machine Learning (apprentissage automatique à partir de données) et le *Deep learning* (apprentissage profond). L'utilisation des outils numériques, associés

³⁴ https://syntec-numerique.fr/sites/default/files/Documents/2016_05_syntec_numerique_-_industrie_-_livre_blanc.pdf

à l'IA, participe donc à atteindre l'excellence opérationnelle et à optimiser continuellement les moyens de production.

Avec ces nouveaux outils d'analyse, les entreprises disposent d'une vision globale de leur chaîne d'approvisionnement. Avec l'intelligence artificielle, elles peuvent optimiser leur production, en d'autres termes produire plus rapidement et à moindre coût à une optimisation des étapes de production.

Les « ERP communicants » (progiciels de gestion intégrée) facilitent la supervision des lignes de production en temps réel et la réalisation de la maintenance prédictive. Historiquement corrective, puis réactive, la maintenance est désormais prédictive, grâce à des logiciels intelligents qui détectent des signes de panne en amont. Ainsi, ces outils améliorent la capacité de veille des industriels. L'utilisation des outils industriels est maximisée, la cadence de production accélérée et le temps d'arrêt des machines limité.

En combinant les données des capteurs IoT à ceux installés sur les machines, l'IA surveille et analyse le comportement des machines pour en définir leurs modèles de fonctionnement afin d'anticiper les défaillances. Ainsi, les technologies d'intelligence artificielle dotent les systèmes numériques d'une certaine forme d'intelligence pour qu'ils adoptent, dans un contexte donné, un comportement particulier, caractéristique d'un CPS à part entière.

Communication et architecture des systèmes

Le concept de l'industrie du futur repose sur une infrastructure de communications hautement fiable qui procure aux décideurs les moyens d'extraire des données stockées dans les machines, les usines et les appareils utilisés sur le terrain. La connectivité sans fil à des fréquences inférieures au GHz (sub GHz) permet d'automatiser les opérations de comptage et de télédétection. Souvent alimentés par batterie, les appareils sans fil envoient les données à des nœuds collecteurs ou à des passerelles pour agrégation et traitement. Ces solutions sans fil sont des percées dans le domaine de l'automatisation industrielle.

Une nouvelle chaîne de mesure se crée en prenant en compte toutes les briques du capteur au *cloud*. Durant l'industrie 3.0, la fonction standard était le stockage dans le *cloud* des données mesurées. Toutefois, dans la perspective de l'industrie du futur, la technologie du « *cloud* » a un potentiel beaucoup plus intéressant notamment du fait de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique. Les données deviennent automatiquement utiles pour réaliser de la maintenance préventive ou encore du contrôle de machine par exemple. Dans la chaîne de mesure, les données mesurées à un instant T peuvent être transmises à un centre de données en parallèle, de sorte que la surveillance de la mesure peut être coordonnée et gérée partout dans le monde. Les données brutes à haute fréquence peuvent également être enregistrées dans le *cloud* en parallèle et à certains intervalles. Cependant, l'infrastructure se veut encore trop consommatrice de bande passante et en énergie, et l'essor attendu de la 5G ouvre la porte à de nouveaux questionnements, sur un spectre technologique de faible maturité.

Les discussions sur les normes et les processus de gestion des données sont les plus abouties. De plus, les protocoles tels que http, CoAP, XMPP et MQTT sont déjà largement mis en avant. Le débat porte actuellement sur l'activation de protocoles de communication machine-to-machine (M2M). Les nouvelles discussions devront prendre en compte non seulement le transport des données de la machine (variables de contrôle, valeurs mesurées, paramètres...), mais aussi de leur écriture pour les rendre lisibles par les différents CPS.

Cependant cette nouvelle couche CPS s'avère difficile à intégrer pour un grand nombre d'entreprises. Il peut être difficile de lier les systèmes informatiques existants avec ce nouveau flux d'information. L'évolution du marché et les besoins technologiques semblent indiquer que ces obstacles seront bientôt surmontés :

- les processus de développement des protocoles deviennent plus rapides et plus internationaux ;
- les normes évoluent également rapidement ; relier les nouvelles technologies aux infrastructures informatiques existantes sera de plus en plus simple ;
- le problème de la sécurité des données devra passer par le respect de la réglementation européenne.

Roadmap des CPS vs. Roadmap Industrie du Futur

Aussi, l'application des CPS dans le domaine industriel c'est fortement répandu ces dernières années, sous le terme de système cyberphysique de production (CPPS). La généralisation des CPPS au sein des usines facilite l'optimisation des processus de production, la personnalisation des produits, la meilleure allocation des ressources et l'accentuation du pilotage centré sur le capital humain.

Ils sont définis comme étant des systèmes de systèmes autonomes et coopératifs, reliés les uns aux autres selon leur environnement et leur place dans la chaîne de production. Ils permettent de prendre des décisions en temps réel et de trouver des réponses à des événements non prévus.

Tout comme les CPS, les systèmes cyberphysiques de production sont composés de logiciels qui collectent et traitent les données provenant des machines de production. Ils utilisent des capteurs et des actionneurs pour communiquer et délivrer des informations aux opérateurs, favorisant ainsi une communication continue et instantanée entre les chaînes de production et d'approvisionnement.

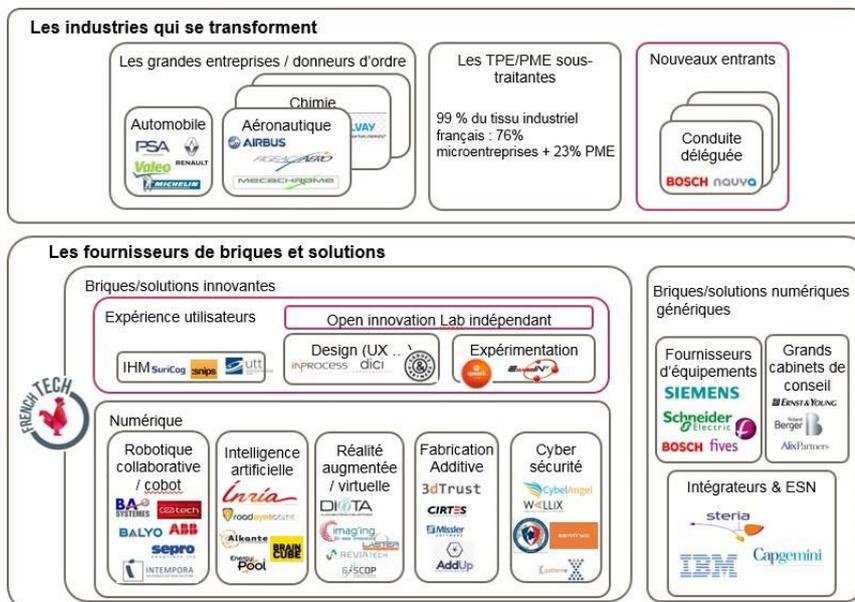
Des initiatives de mutualisation des investissements de R & D existent depuis de nombreuses années pour faire évoluer les technologies des composants notamment qui sont à l'origine de l'effet de levier de l'industrie électronique sur l'ensemble de l'économie.

Un soutien continu à ces initiatives est nécessaire afin d'appuyer le rayonnement de la France en matière de R & D (ex. : programme IPCEI dans la filière nanoélectronique, ou Meredit dans les circuits imprimés). Dans le même temps, des démarches de codéveloppement doivent être menées pour faire évoluer les procédés de fabrication et faire émerger des technologies de rupture. Le rapprochement avec les grands donneurs d'ordre des industries d'application est ici primordial pour faire converger les roadmaps CPS et les roadmaps de l'industrie du futur notamment sur la partie *manufacturing* et logistique intelligente.

Pénétration des CPS dans les industries traditionnelles et les petites entreprises

L'écosystème industriel est en pleine mutation. Comme le rappelle Bpifrance³⁵, il est composé de plusieurs types d'acteurs ayant des logiques d'innovations particulières.

Figure 25 – Écosystème de la transformation 4.0



Source : Bpifrance

³⁵ <https://blog.lehub.bpifrance.fr/industrie-du-futur-au-dela-transformation-technologique/>

Le volet « expérience utilisateur » est émergent et composé de petites structures. Il mérite d'être mis en valeur, car son objet est de mieux appréhender la dimension systémique de la transformation dans une démarche cohérente centrée sur les usages, mêlant sciences humaines et sociales avec sciences et techniques. Les grandes entreprises dotées de département d'open innovation ont bien compris l'intérêt de recourir aux services de ces entreprises dès la phase de R & D, pour concevoir des solutions adaptées aux opérateurs en gérant si nécessaire le recours à un bouquet de technologies.

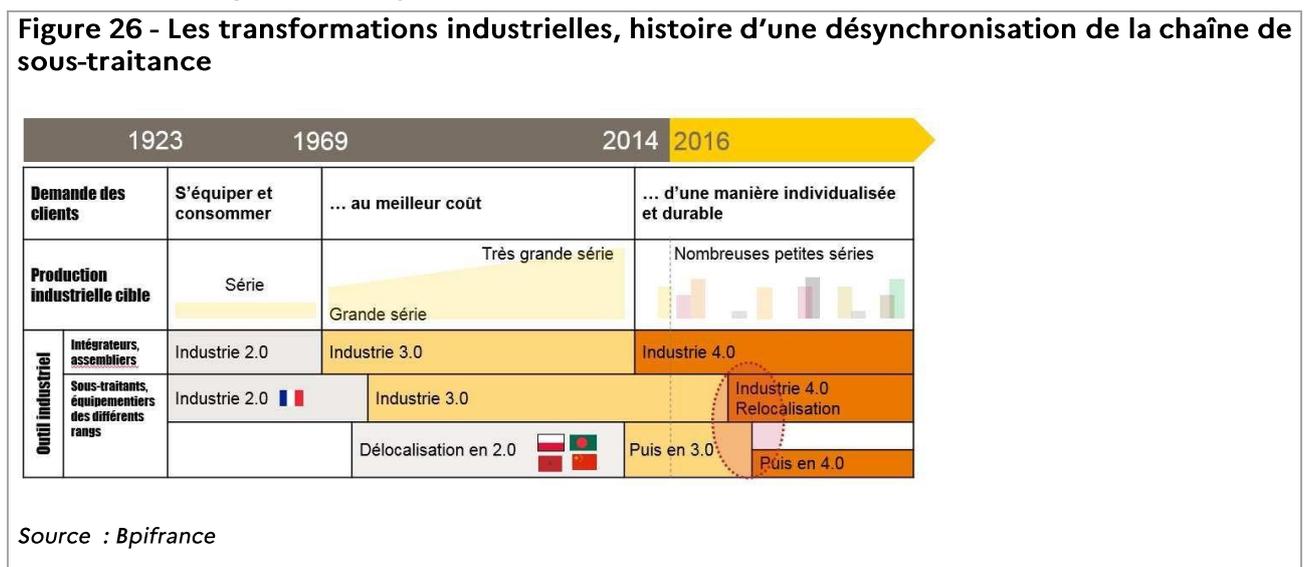
Des structures visibles d'open innovation indépendantes des grandes entreprises de type « fablabs », positionnées sur un spectre large de différentes technologies et multiplateforme, favoriseraient l'accélération du passage de la brique à la solution, tout en permettant aux PME de mieux s'imprégner de la richesse de la French Tech. Les structures existantes comme les incubateurs restent centrées sur les *start-up*.

L'industrie du futur répond à une demande individualisée de plus en plus orientée vers l'accès à un service, plutôt que vers la possession d'un bien et à des aspirations sociétales croissantes en matière de consommation raisonnée. Afin de satisfaire ces nouvelles demandes, l'industrie du futur cherche à produire des séries courtes, tout en maîtrisant ses coûts. Aussi, les lignes de production se doivent d'être réactives pour optimiser les coûts de production, tout en proposant une offre personnalisée.

Il s'agit là d'un changement de paradigme par rapport aux préoccupations des industries précédentes, concentrées sur la recherche d'une compétitivité-prix.

Aussi, l'industrie est devenue complexe, car elle doit à la fois interagir avec des parties prenantes externes (les clients, les marchés, les fournisseurs...) et en interne jongler avec les différents systèmes technologiques et organisationnels qui cohabitent.

Le schéma suivant illustre la position de ces entreprises quant aux révolutions industrielles successives, soulignant les désynchronisations de la chaîne de sous-traitance :



Les ensembliers et intégrateurs, composés essentiellement de grandes entreprises et d'entreprises de taille intermédiaires, ont successivement mis en place les nouveaux outils des différentes révolutions industrielles. Ils sont donc relativement en phase avec l'industrie du futur. Bien qu'ayant souffert des délocalisations, les sous-traitants industriels français, sont également en phase de transition.

Néanmoins, l'essentiel du tissu industriel français, les microentreprises et les PME industrielles, n'a pour l'instant pas démarré sa mutation. Ces entreprises sont financièrement d'autant plus affaiblies par la transformation 3.0 qu'elles sont de rang éloigné. Disposant de moyens limités dans un environnement de plus en plus complexe, elles peinent à définir un projet de transformation pour réaliser des investissements pourtant nécessaires à leur pérennité.

Place des CPS et positionnement dans la chaîne de valeur

Comme évoqué jusqu'à présent, les CPS sont une composante de plus en plus importante de l'équipement des sites de productions, allant de l'ajout de CPS sur des systèmes existants, jusqu'à la création de sites 4.0 entièrement construits à partir des systèmes cyberphysiques.

En parallèle de la connexion croissante des sites de production, le pilotage par les produits est un enjeu majeur du produit connecté : en intégrant des CPS dans le produit, il devient possible de piloter les phases de fabrication, d'entreposage et de distribution. Durant la phase de production industrielle, le produit connecté peut interagir au stade de la fabrication (on pense en particulier au cycle « fabrication/essais/reprise ») et au stade de la logistique. La personnalisation (customisation) des produits pourra être traitée par un logiciel embarqué spécifique. La personnalisation des achats amène à développer les opérations de préparations des commandes (*picking, cross-docking...*) durant lesquelles le produit intervient dans le pilotage des opérations.

Mais la valeur d'usage se développe également en amont et en aval du site de production. L'agilité de l'usine pose également le sujet de l'agilité des moyens de transports des matières et produits (avant, pendant et après le processus de fabrication), de leur entreposage et de leur expédition. Des solutions nouvelles doivent être trouvées. L'approche de la logistique du futur est de pouvoir reconfigurer les éléments physiques de gestion et de stockage des flux matières en leur associant les commandes, contrôles et supervisions qui correspondent aux applications métiers.

La maintenance 4.0 est un sujet qui prend de plus en plus de place grâce à l'intégration des CPS dans les processus de fabrication. La machine devient connectée avec son fabricant. Dans la mise en œuvre de la maintenance 4.0, les données sont traitées à base de réseaux de neurones, bayésiens, des corrélations et régressions. En conséquence, les acteurs de la maintenance ne définiront plus un plan de préventif, mais ce sera l'analyse prédictive des données qui proposera une maintenance plus proactive³⁶. Le jumeau numérique prend ici toute sa place en prenant en compte le comportement de l'équipement sous surveillance avec un apprentissage (IA) au fur et à mesure. La maintenance 4.0 change l'organisation des interventions du fait d'une planification des maintenances au gré des alertes en provenance des recommandations du système de traitement des données dans un « *Big data* ». La stratégie de maintenance peut évoluer en augmentant la délégation au constructeur.

Dans les usines intelligentes, les systèmes cyberphysiques surveillent les processus physiques et prennent des décisions décentralisées. Via leur connexion IoT, ces systèmes cyberphysiques peuvent communiquer et coopérer les uns avec les autres et avec les humains en temps réel.

Deux types d'acteurs proposent des solutions complémentaires :

- des entreprises avec une gamme de produits dont les CPS permettent de répondre à de nouveaux défis et usages tels que la modularité, l'interopérabilité, la virtualisation, la décentralisation... comme les produits d'entreprises comme Schneider, Legrand, MGI dont la gamme se complète de produits intégrant des CPS.
- d'autres entreprises se sont spécialisées dans l'intégration de CPS pour compléter les fonctions de process déjà existants ou de matériels. Ce sont souvent des solutions de capteurs qui permettent de proposer la position ou de donner des informations d'utilisation, de pression, de température d'un point précis du système.

Le choix d'une solution CPS se fait autour de six critères :

- le prix de la solution ;
- la notoriété de la marque et la capacité à maintenir le système durablement ;
- l'intégration dans un processus ou une organisation déjà existante ;
- l'interopérabilité des solutions proposées ;
- la modularité des solutions proposées ;
- la traçabilité des données et leur sécurité.

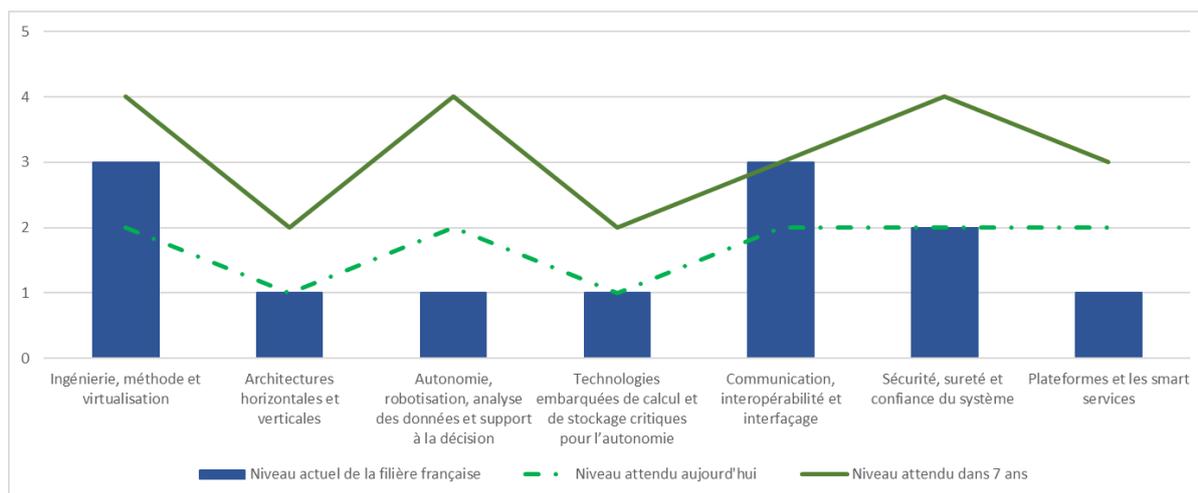
36 Du préventif au proactif, quels rôles pour la maintenance à l'ère de l'Industrie 4.0, Mars 2019, Production maintenance

Les trois derniers critères sont plus spécifiques du fait de l'intégration des CPS et des nouvelles fonctionnalités engendrées.

Cependant, il a été remarqué que l'intégration massive de CPS dans un processus n'a que peu d'impacts sur le temps du retour sur investissement qui reste sensiblement le même entre cinq et sept ans en moyenne. Les gains attendus en flexibilité, traçabilité ou encore diminution des besoins énergétiques devraient couvrir le coût complémentaire.

Structuration spécifique et réponse aux défis

Graphique 2 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'industrie (Entretiens Katalyse)



La filière française est une filière qui apparaît comme répondant aujourd'hui aux besoins des industriels et ayant pris de l'avance sur les attentes au niveau de la simulation, une des spécificités françaises. Les attentes futures des entreprises devraient s'accroître drastiquement obligeant l'écosystème à proposer des nouvelles solutions et à acquérir de nouvelles solutions.

Cependant, le nombre d'assembleurs de technologies reste bien largement inférieur aux nombres d'entreprises allemandes proposant des solutions pour l'industrie du futur. Le tissu industriel de fournisseurs de solutions s'est appauvri entre les années 1990 et 2000 notamment. Pour autant, une nouvelle vague d'entreprises, comme le montrent les exposants du Sido 2019, se développent autour de la mise à niveau des processus industriels et le retrofitage des solutions existantes complétant l'offre des industriels déjà présents sur le marché et qui proposent leurs nouvelles gammes de machines ou process.

Les solutions technologiques suivantes vont permettre la modernisation attendue sur les machines, les robots et les procédés industriels :

- des capteurs plus petits, résistants, plus précis (MEMS, température, pression, caméras...);
- des circuits intégrés dédiés, plus petits, moins consommateurs en énergie pour être en adéquation avec les exigences du monde industriel;
- une connectivité optimisée avec des systèmes sans contact, des gateways, 5G et des réseaux bas débit permettant les échanges entre les objets;
- des infrastructures Cloud facilitant l'accès aux données industrielles de n'importe où et permettant la synchronisation de sites de production distants : on constate un transfert progressif des datas du Cloud (énormes data centers) vers le Fog (data centers spécialisés déportés vers les utilisateurs et traitements des données en multisites);
- les technologies Big data Analytics pour mieux comprendre les tendances et prendre des décisions clés, comme la maintenance prédictive ainsi que le Deep learning et l'IA pour automatiser la prise de décision.

Les solutions françaises devront développer des approches encore plus pertinentes autour de l'analyse des données et de support de décision en temps réel, augmenter la sécurité et la sûreté en

l'intégrant notamment à l'intérieur des couches de hardwares comme le montrent les essais des acteurs de l'IRT NanoElec sur ce sujet, mais également des nouveaux modèles économiques. Cependant, le nombre d'acteurs proposant des réponses aux projets H2020 ou d'Artemis sont relativement restreints.

Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025

Alors que l'industrie du futur redessine le paysage industriel international et redistribue les cartes, la France sait qu'elle a en main des atouts qui peuvent lui permettre d'être maître de la partie. L'usine du futur sera économe en énergie, mais aussi agile grâce à des moyens de production flexibles et reconfigurables. Conférer ces propriétés aux procédés existants est un challenge complexe qui induit souvent une réorganisation des unités de production et une intégration de CPS. Les raisons de ce constat sont certes financières, mais aussi pratiques. Les solutions proposées ne tiennent pas compte de la variabilité du procédé qu'il s'agisse de perturbations non maîtrisées sur les températures et les débits ou des points de fonctionnement multiples (changement de campagne, évolution de la charge...).

Selon l'enquête de Bpifrance d'avril 2017³⁷, les trois principaux obstacles à la transformation numérique, étaient, d'après les chefs d'entreprise : les résistances au changement en interne, le manque de compétences en interne, et le manque de moyens financiers.

Selon l'enquête du 11 février 2019³⁸ de Bpifrance, 63 % des PME-ETI étaient entrées dans un cycle de transformation, aussi modeste soit leur degré d'avancement. En revanche les 37 % de PME-ETI qui n'avaient pas entamé de transformation, se partageaient entre :

- 15 % d'entreprises classées comme « les attentistes », pour lesquelles leurs dirigeants anticipaient une stabilité de leurs activités. Ce sont souvent des entreprises de petite taille et non innovantes ;
- 22 % d'entreprises classées comme « les dilemmes », pour lesquelles leurs dirigeants percevaient la nécessité d'un changement, mais étaient confrontés à des obstacles dans sa mise en œuvre. Ce sont souvent des entreprises de petite taille, avec un outil de production âgé et luttant pour leur survie.

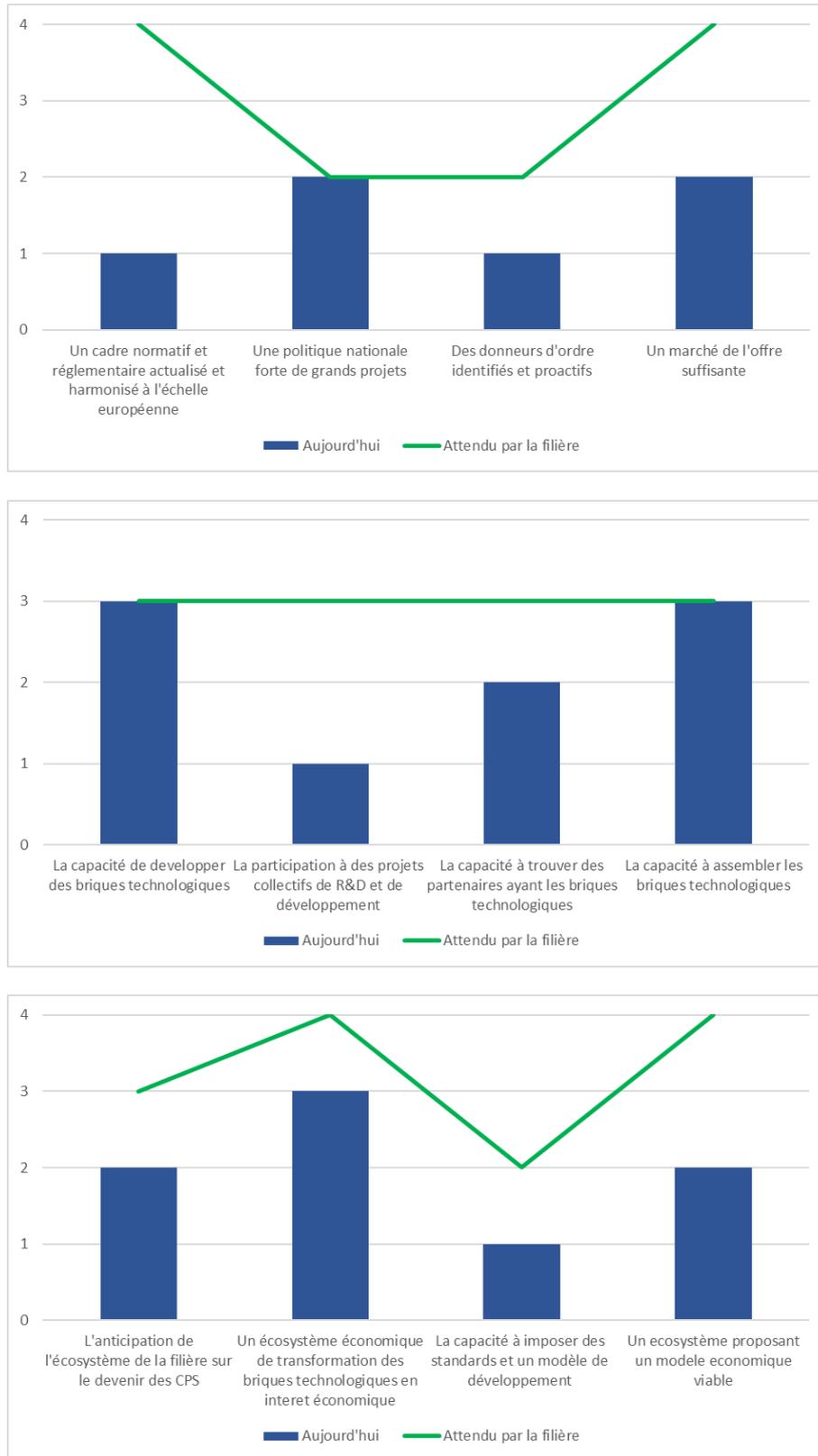
L'évolution des CPS dans l'industrie suivra donc la tendance d'intégration globale de l'Industrie du futur.

37 Source : Bpifrance Le Lab, Enquête « Histoire d'incompréhension », février-avril 2017

38 Source : "L'avenir de l'industrie" de Bpifrance-Le Lab, publié le 11 février 2019

Synthèse

Graphique 3 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière industrielle



L'Europe représente plus du tiers des investissements mondiaux dans l'industrie du futur et les CPS sont une carte à jouer pour le développement de l'industrie française dans la compétition mondiale.

La pénurie de spécialistes qualifiés³⁹ et de solutions pertinentes crée des opportunités supplémentaires pour les acteurs des CPS et les intégrateurs de solutions, notamment sur trois domaines :

- processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement et des entrepôts - suivi en temps réel de la demande, du traitement des commandes, du flux de fabrication, des retours, etc. ;
- lignes de production - contrôle en temps réel des performances, de la durabilité, diminution des besoins énergétiques et de la sécurité des produits ;
- maintenance prédictive - la surveillance en temps réel des dispositifs de fabrication industrielle permettant aux entreprises de prévoir à quel moment la maintenance est nécessaire.

Cependant, le peu de cadres de normalisation, la faible participation à des projets collaboratifs de R & D, la taille de l'écosystème de solutions technologiques, mais également la pénétration des CPS dans les industries traditionnelles sont de réelles problématiques pour le développement durable des CPS sur ce sujet en France

Pour une mise en œuvre réussie de l'industrie du futur, la normalisation est cruciale. C'est dans ce sens que l'alliance Industrie du Futur organise et coordonne, au niveau national, les initiatives, projets et travaux tendant à moderniser et à transformer l'industrie en France. Un groupe de travail sur les questions de normalisation notamment sur deux thèmes notamment les systèmes robotisés à usage collaboratif et la continuité numérique. Sur ce dernier point, la circulation de normes internationales n'est plus assez rapide (évolution rapide des technologies industrielles), et se voit complétée de nombreux standards développés par des consortia, notamment américains, qui répondent plus rapidement aux nouveaux besoins exprimés par les industriels. Parmi ces consortia américains un certain nombre ne sont pas spécifiques à l'industrie, et mettent plutôt en avant les standards génériques des technologies de l'information. C'est un obstacle considérable pour les entreprises. En fait, le besoin de normalisation est le principal défi qui les empêche de mettre en œuvre les systèmes de l'industrie du futur.

Quatre consortia ayant pour but de créer une architecture de référence sont présents :

- *Alliance for internet of Things Innovation* qui développe et supporte le dialogue et l'interaction entre les acteurs de l'IOT en Europe. Il s'appuie sur l'IIoT Research Cluster (IERC) pour transformer les idées en solutions et en business modèles et assiste également la Commission Européenne dans la préparation des travaux futurs de recherche sur l'IOT et les politiques de standardisation.
- Alliance Industrie du Futur qui fournit un modèle permettant d'illustrer l'ensemble des sujets de l'industrie du futur, afin de cadrer les objectifs, d'identifier les normes et standards et de faire ressortir les cas d'usages • Ce modèle s'applique principalement au domaine de la Production (Architecture *BigPicture*).
- Industrial internet Consortium qui fournit des orientations pour le développement de systèmes, de solutions et d'architectures applicatives. Ce modèle s'applique au secteur de la Production, et aussi à l'Énergie, la Santé, *Smart cities* et Transport (Architecture IIRA).
- Plateforme i4.0 qui fournit un modèle permettant d'illustrer l'ensemble des sujets de l'industrie 4.0 afin de cadrer les objectifs, d'identifier les normes et standards, et de faire ressortir les cas d'usages. Il s'applique principalement au domaine de la Production (Architecture RAMI4.0).

La stratégie française s'appuie sur l'Alliance Industrie du Futur qui promeut une architecture de référence basée sur le projet de norme *BigPicture* (projet hébergé par le comité ISO TC184, sur la base d'une proposition française), tout en confirmant l'intérêt de l'architecture RAMI4.0 de la plateforme Industrie 4.0 allemande. Son souhait est de faire converger ces différentes architectures de référence au niveau international.

³⁹ <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

Pour soutenir cette stratégie, l'Alliance favorise également le développement d'un écosystème d'offres capables :

- d'héberger les données *manufacturing* des utilisateurs finaux de manière sécurisée (sur le *cloud*, sur des serveurs privés ou dans un noyau logiciel embarqué dans les équipements)
- de connecter des applications logicielles innovantes sur ces données de manière sécurisée, payables à l'usage, utilisables des donneurs d'ordres aux PME et assurant ainsi la continuité numérique.
- de fournir des solutions sécurisées (matériels et services) capables de se connecter aux équipements industriels Cette stratégie doit permettre d'enrichir l'écosystème existant, et de le déployer largement dans l'industrie, notamment auprès des petites et moyennes entreprises.

Applications dans le bâtiment

Description de la filière

D'année en année, les techniques et technologies de construction des bâtiments évoluent : de nouveaux matériaux sont utilisés, pour améliorer les performances thermiques ou acoustiques par exemple ; de nouvelles règles de conception apparaissent, pour optimiser l'espace ou l'accessibilité (aux personnes à mobilité réduite, aux mobilités douces...). Aujourd'hui encore, la marge de progression reste importante, tant dans ces exemples précis que plus généralement en matière de réduction de l'impact environnement ou d'amélioration de la valeur d'usage. Aux côtés de ces innovations incrémentales, qui se poursuivent donc aujourd'hui, un nouveau levier d'innovation est apparu : les NTIC, et plus largement les technologies du digital et du numérique mises au service du bâtiment. C'est ce vaste domaine qui, appliqué au bâtiment, a donné naissance aux notions de *Smart building* ou Bâtiment Intelligent.

Les objectifs poursuivis par le *Smart building* sont plus précisément de quatre ordres :

- l'optimisation de la gestion des ressources ;
- l'amélioration du confort des usagers ;
- le développement de nouveaux services pour toutes les parties prenantes (propriétaires / locataires, occupants / gestionnaire, etc.) ;
- le renforcement de l'inclusion du bâtiment dans son environnement immédiat : quartier, ville...

Il est à noter que, si ces objectifs généraux peuvent s'appliquer pour tout ou partie à une large typologie de bâtiments, certains objectifs particuliers peuvent naître de contextes différents. C'est le cas, par exemple, du bâtiment intelligent dans un contexte industriel : dans le cas d'une industrie chimique ou agroalimentaire par exemple, le maintien d'une température ambiante stable et précise peut ne pas relever uniquement de l'optimisation des ressources ou du confort des usagers, mais avoir également des enjeux productifs (qualité des matériaux, optimisation de la productivité ou baisse des non-conformités...). Pour aller plus loin, il est même envisageable de relier les données du *Smart building* avec celle de l'industrie du futur, pour agglomérer, visualiser et piloter ces infrastructures de manière centralisée. Ces sujets encore trop récents, et trop immatures pour trouver des cas d'application concrets, n'en restent pas moins une des finalités vers lesquelles tend le *Smart building*.

Enfin, le terme de *Smart building* s'articule à deux notions clés du bâtiment connecté : la Smart City (ville intelligente) et la *Smart Home* (domotique).

La « *smart city* » répond aux mutations de la société et à l'accélération de l'urbanisation mondiale. Elle consiste globalement en l'optimisation des coûts, au management optimal des ressources, des infrastructures et au bien-être des habitants. Aussi, les nouvelles technologies favorisent les synergies entre les différents secteurs de l'économie en interconnectant l'environnement urbain. Pour être « smart », les villes s'appuient sur des projets d'Open Data, consistant à traiter et analyser intelligemment les données créées. L'objectif étant de développer des moyens et des solutions aptes à répondre aux besoins de la population tout en optimisant les ressources et préservant l'environnement. Le concept de « *Smart building* » s'y intègre comme l'une des unités de base de la *Smart Grid*, dont l'existence repose sur l'assemblage des données générées par les bâtiments et quartiers intelligents.

Cependant, considérer le bâtiment comme un ensemble homogène serait ne pas tenir compte de ses occupants, aux comportements et aux attentes variées. Ainsi, la domotique consiste en la mise en réseau de l'ensemble des équipements d'un sous-ensemble immobilier (appartement, maison, bureau...) et de leur contrôle par une intelligence centralisée. Les utilisateurs programment alors les différents équipements localement ou à distance à l'aide d'outils de pilotage (ordinateurs, téléphone, télécommandes...). Afin de répondre à ces nouveaux enjeux, de nombreux services d'efficacité énergétique se sont développés, tels que les services relatifs au suivi des consommations. Ces nouveaux services transforment les bâtiments ordinaires en bâtiments intelligents, intégrant des solutions de gestion, de sécurité, de maîtrise de l'énergie et de communication.

Figure 27 – Smart building



Source : modélisation de KATALYSE

Les blocs technologiques prioritaires

Longtemps le bâtiment intelligent s'est réduit à la GTC (Gestion technique centralisée) ou GTB (Gestion technique du bâtiment) qui se limitait à remonter des informations d'état vers un poste de contrôle pour un lot donné (contrôle d'accès, éclairage, circulation d'air...). La GTB a apporté une dose d'automatisme et de monitoring en s'appuyant sur des capteurs et des systèmes de supervision, mais avec des solutions le plus souvent propriétaires et cloisonnées.

L'interconnexion et la réversibilité des CPS

Pour répondre aux attentes croissantes envers le *Smart building*, l'interconnexion des lots devient une nécessité. Les principaux lots techniques du bâtiment doivent désormais être parfaitement interconnectés pour assurer la transversalité des différentes fonctions et permettre ainsi une intégration homogène des équipements au réseau tant en aval du compteur qu'en amont. L'idée motrice étant que seul un système global et homogène permettra d'atteindre les objectifs d'efficacité attendus (pouvant être évalué en kWh économisés, en pourcentage d'autonomie du bâtiment, en confort, etc.), là où une superposition de systèmes n'aura qu'un impact moindre.

L'enjeu est donc double : il faut non seulement que les systèmes puissent communiquer (liaison filaire ou sans fil), mais aussi qu'ils puissent s'interconnecter, et ainsi devenir interopérables.

L'interopérabilité peut être définie comme la capacité d'un produit ou d'un système A à fonctionner avec un produit ou système B, sans restriction d'accès ou de mise en œuvre. Il s'agit donc là d'un enjeu d'universalité des solutions : que les systèmes A et B soient conçus par des entreprises différentes, à des moments différents, installés pendant ou après la construction ou encore intégré à des systèmes différents (réseau d'eau ou d'électricité, domotique...), l'interopérabilité des offres est une condition essentielle du développement du marché dans son ensemble.

Pourtant cette approche de coopération, bénéfique à l'échelle du marché, pourrait être menacée par les stratégies individualistes d'acteurs visant le leadership, en essayant d'imposer leurs propres technologies comme standard, ou pire en créant des systèmes volontairement incompatibles pour verrouiller le marché. Pour prévenir ce scénario, les principales parties prenantes s'organisent pour définir des règles et standards communs. Ainsi, une centaine d'acteurs du bâtiment ou du numérique se sont récemment engagés à participer aux évolutions dans le domaine numérique, à suivre des principes communs et à partager leurs bonnes pratiques, en signant, fin 2017, la Charte « Bâtiments connectés, bâtiments solidaires et humains » du ministère de la Cohésion des territoires⁴⁰. L'initiative la plus avancée est l'élaboration du label Ready2Service (R2S), développé par la *Smart building Alliance* (SBA) en partenariat avec Certivea (qui délivre le label en France, et *via* sa filiale Cerway à l'étranger). Ce label vise à évaluer la qualité des services numériques et IT offerts par un site et, notamment, leur interopérabilité. L'une des finalités du label est de définir les prérequis pour un bâtiment connecté, cadre de référence pour la maîtrise d'ouvrage afin que le bâtiment puisse

⁴⁰ Certivea, 2019

s'interconnecter avec son environnement et devienne une plateforme de services. Pour cela, il va jusqu'à prescrire l'architecture réseau standard par exemple : le protocole IP doit régir toutes les communications, même au niveau de la couche matérielle. Bien que sujette à débat, la SBA défend cette approche depuis sa création, afin de faciliter les échanges d'information entre les différents systèmes. Ce souci d'interopérabilité se traduit également par plusieurs autres critères : la possibilité d'étendre l'installation câblée et la couverture internet radio, la programmation des interfaces numériques dans des langages standardisés...

Douze immeubles ont déjà reçu ce label à la suite d'une opération pilote⁴¹. Le champ d'application est aujourd'hui encore assez restreint : Le Label R2S-Ready2Services concerne les bâtiments non résidentiels (bureaux, commerces, hôtels, équipements sportifs...), neufs ou existants, en construction/rénovation ou en exploitation. Il n'adresse donc pas encore le vaste marché des bâtiments résidentiels. Mais il pose ainsi les premières pierres d'une normalisation essentielle à la préservation de la liberté d'accès au marché des *Smart building*, et devrait être prolongé et complété dans les années à venir par de nouvelles initiatives.

À terme, cette interopérabilité permettra de penser l'urbanisme différemment, à l'échelle de l'opérateur public (EPCI, ville...) et à l'échelle de l'opérateur privé : un écoquartier par exemple, comme celui aménagé par Eiffage à Marseille : l'écoquartier Smartseille, 5 à 6 bâtiments, une crèche, un parking...⁴²

Intégration des CPS dans un environnement aux contraintes atypiques

Techniquement et technologiquement, les contraintes imposées aux CPS par le *Smart building* varient sensiblement de celles des autres marchés.

De prime abord, l'environnement peut être considéré comme moins contraignant envers les CPS.

En effet, l'énergie est facilement accessible : les bâtiments sont pour la quasi-totalité reliés au réseau électrique, apportant ainsi une ressource énergétique quasi-illimitée. Il n'est donc que peu ou pas question de stockage d'énergie ou encore de réduction drastique des consommations. Au contraire, l'alimentation relativement aisée des CPS leur offre un potentiel d'exploitation accru.

De même, la définition des performances des CPS du *Smart building* est différente. Par exemple, considérons l'enjeu d'instantanéité dans l'automobile : certains CPS sont performants s'ils permettent de choisir une trajectoire ou une vitesse adaptée à la situation de conduite. Or ladite situation est en constante évolution : chaque mètre parcouru, chaque millième de seconde passée offre un environnement différent. Il faut donc que les CPS soient en mesure d'identifier (capteurs), analyser et agir (actionneurs) le plus vite possible pour que la réponse apportée corresponde à la situation identifiée. Or la majorité des applications et des objectifs associés au *Smart building* s'inscrivent dans des durées bien moins contraignantes. Dans le cadre d'un fonctionnement normal du bâtiment, le déclenchement des chauffages à une température donnée ou l'abaissement de volets selon la luminosité extérieure ne demandent par exemple qu'une relative réactivité ou précision. Ce constat s'étend même aux situations d'urgence ou d'incident : alerter les secours en cas d'incendie et déclencher les dispositifs d'évacuation, ou encore détecter une fuite d'eau dans une canalisation sont autant de situations d'urgence nécessitant un processus d'identification – analyse – action rapide de l'ordre de quelques secondes. Soit un ordre de grandeur mille fois plus grand que celui des situations d'urgence d'un véhicule autonome.

Enfin, les contraintes physiques envers les CPS du *Smart building* sont généralement moindres : du fait de leur intégration dans un bâtiment « fixe », leur exposition aux nuisances extérieures sont dans l'ensemble réduites (vibration, forces multidirectionnelles, écart thermiques ou hydrométriques soudains...). Il n'est pas question de considérer les CPS du *Smart building* comme préservés de toute contrainte d'environnement, mais son éloignement des conditions d'exploitation des systèmes embarqués doit cependant être pris en compte pour redéfinir la notion de résistance du CPS.

Car le principal enjeu technique et technologique des CPS sur ce marché, c'est celui de la durabilité. Les bâtiments ont une durée de vie moyenne allant de 70 à 100 ans⁴³ ; une durée qui tend à s'allonger, avec l'amélioration des techniques de construction et de rénovation. Or, il est attendu des CPS d'assurer leur rôle tout au long de la période d'exploitation du bâtiment. S'ils sont intégrés à une

⁴¹ Le Moniteur, d'après Certivea et SBA, Juin 2018

⁴² <https://www.eiffage.com/ouvrages/ecoquartier-smartseille.html>

⁴³ Données Swiss Life

structure préexistante, leur durée de vie est calibrée proportionnellement à celle restante estimée de la structure en question. S'ils sont intégrés dès la construction, alors leur longévité attendue est supérieure ou égale à celle de l'édifice. En effet, les standards d'obsolescence programmée sont calqués sur le même modèle que ceux de l'aéronautique par exemple : tant qu'un avion vole, le CPS doit fonctionner. La durée de vie du CPS doit donc être très supérieure à l'utilisation attendue. Il n'est pas question de retrofit ou de changement de CPS à intervalle régulier. Si la raison de cet état de fait est – évidemment – en grande partie liée à des raisons de sécurité dans l'aéronautique, c'est plutôt des raisons pratiques qui s'imposent dans le *Smart building* : l'accessibilité parfois difficile aux CSP (intégrés dans un mur ou un plafond par exemple, ou encore dans des espaces privés difficiles d'accès à une entreprise tierce sans accord préalable, disponibilité de l'occupant...) s'ajoute à la très forte atomisation des CPS dans le bâtiment intelligent. Tandis que la flotte mondiale d'avions commerciaux ne comptait que 28 200 appareils en service à travers le monde en 2017, selon le recensement réalisé par le site de presse professionnelle Flightglobal.com, on ne dénombre rien qu'en France plus de 36,3 millions de logements en 2018... Au-delà du coût économique astronomique du renouvellement ou de la maintenance régulière des CPS, si leur durabilité n'était pas suffisante, le temps et les ressources (matérielles, humaines...) nécessaires seraient rédhibitoires pour couvrir ces millions de logements. Cette double notion de durabilité/fiabilité est donc essentielle au développement des CPS sur ce marché.

Responsabilités, droits et devoirs

Il n'existe donc à ce jour que peu ou pas de frein à l'industrialisation des projets de *Smart building* sur le plan technique, les différents composants matériels et logiciels étant maîtrisés. C'est principalement un problème de contractualisation, et par extension de maturité du marché. Sans définition claire des parties prenantes du contrat et des responsabilités de chacun, les risques encourus prennent le pas sur les avantages potentiels et ralentissent fortement le développement du marché. Les dysfonctionnements majeurs de CPS dans le secteur du *Smart building* se font, à ce jour, exceptionnels, et les cas de jurisprudence sont de fait tout aussi rares. Or les conséquences potentielles d'un défaut de fonctionnement d'un CPS sont majeures : un défaut de ventilation ou une défaillance du système de chauffage peuvent être la cause de sérieuses atteintes aux occupants, jusqu'à occasionner leur décès dans les cas théoriques les plus extrêmes. Qui en serait alors responsable, entre celui qui a conçu le CPS, construit le bâtiment, exploite le site, effectue la maintenance, etc. ?

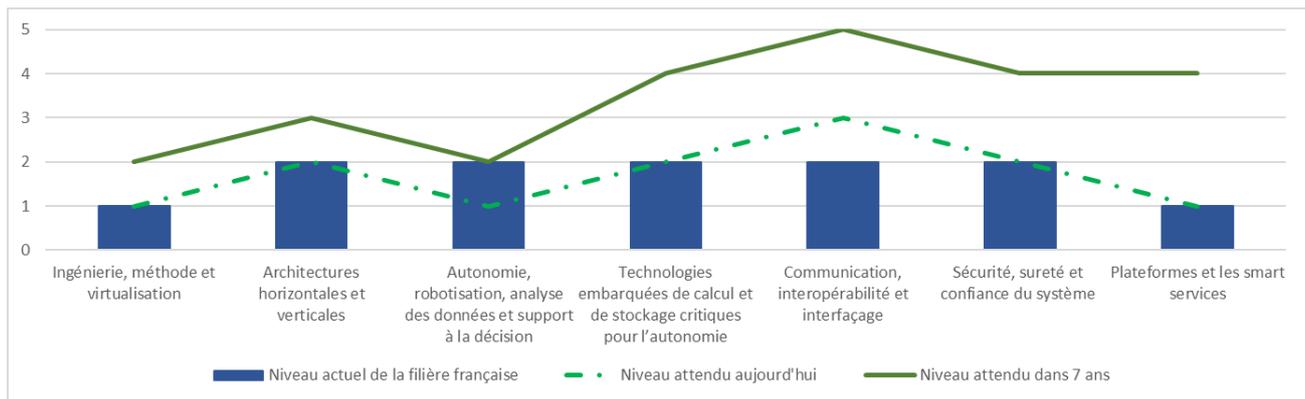
À ces problématiques de sûreté s'ajoutent de forts enjeux de (cyber) sécurité. Protéger les données des bâtiments et des opérateurs est une nécessité. C'est d'autant plus vrai qu'avec l'augmentation des objets connectés et la communication des offres entre elles, la vulnérabilité des infrastructures numériques n'a jamais été aussi élevée⁴⁴. Contrairement aux CPS présents dans l'aéronautique par exemple, les points d'interface des CPS du *Smart building* avec l'utilisateur final/le grand public sont très nombreux : tablettes ou ordinateurs personnels, interface domotique du logement, application smartphone, équipements installés dans les parties communes... Cette atomisation forte, couplée à la proximité avec l'utilisateur final, expose d'autant plus les systèmes à d'éventuelles erreurs de manipulation ou tentatives de piratage.

Place des CPS et positionnement de la valeur dans la chaîne

En GTB, l'implémentation des technologies était assez aisée, chaque domaine disposant de spécialistes de la fabrication et de l'installation du système, le plus souvent en phase de construction du bâtiment. Ainsi, l'installateur du système de régulation de température travaillait indépendamment de son confrère installateur de système de contrôle d'accès. La valeur créée est alors une valeur d'usage, et de continuité d'exploitation : ces systèmes, dont le coût est relativement modéré au regard du coût total de construction d'un bâtiment, ne permettent que d'en assurer la bonne exploitation. L'utilisateur final (habitant du bâtiment, salarié de l'entreprise...) n'a donc ni lien direct, ni d'action sur ces systèmes : il n'a pas conscience de leur présence en cas de fonctionnement normal, et ne les remarque généralement qu'en cas de défaillance.

⁴⁴ Baticatu, Le marché du smart building n'est pas encore mûr, Octobre 2018

Graphique 4 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels du BTP (entretiens Katalyse)



Avec l'arrivée des CPS dans le bâtiment, on assiste à la démultiplication du coût des CPS, des acteurs, et de la valeur créée.

La valeur s'est en effet accrue avec l'émergence d'une série de nouveaux services qui concernent aussi bien l'amélioration des performances énergétiques et la maintenance prédictive que la gestion numérisée du bâtiment. Plus que de piloter le bâtiment, les CPS permettent d'anticiper son évolution *via* des modèles prédictifs d'analyse et de simulation, s'appuyant sur la remontée d'information en temps réel des capteurs.

L'enjeu d'interconnexion des CPS a accru la valeur apportée par les acteurs de la communication : réseaux et câbles, d'une part, acteurs du *cloud* d'autre part, et enfin de tous les acteurs connexes à ce bloc technologique à l'instar des acteurs de la cybersécurité (chiffrement et stockage des données en transit). Ainsi le *cloud*, permettant de supporter la connexion de plusieurs millions de capteurs, prend une importance stratégique croissante.

Les enjeux en termes de calculs sont relativement faibles, le but étant essentiellement de récupérer de la donnée (ex. : température) puis de la restituer à l'utilisateur (occupant ou gestionnaire du bâtiment) (ex. : en coupant les chauffages au-dessus de 20 degrés). Les points clés sont ainsi le capteur (conditionnant la qualité de l'information), l'actionneur (conditionnant la qualité de la réponse) et l'interface utilisateur/ergonomie (restitution de l'information et pilotage). Or, l'interconnexion croissante des différents bâtiments entre eux, et le développement des services apportés aux utilisateurs a pour effet de déplacer cette valeur. L'information ne doit plus seulement être verticale, mais aussi horizontale : entre deux utilisateurs, entre deux bâtiments. Cet accroissement et cette diversification des flux de données induisent la montée en puissance des éléments de traitement et de stockage de la donnée, les calculateurs devant agglomérer plusieurs sources d'informations et dans des contextes d'exploitation plus variés. Mais le plein déploiement des offres de services suppose d'aller plus loin que l'exploitation de la donnée présente, en anticipant l'évolution des métriques du bâtiment. A ce besoin répondent les acteurs de la modélisation et de la simulation, et plus largement du développement logiciel : apporter une intelligence prédictive permettant d'adapter le bâtiment.

En synthèse, la valeur se déplace donc peu à peu des composants hardware vers les composantes logicielles, et du produit vers le service. La valeur générée par l'étendue de l'offre de services pouvant découler des CPS permet d'en justifier le coût de plus en plus facilement : le retour sur investissement de ces solutions paraît de plus en plus concret, facilitant l'augmentation des dépenses des différents acteurs en faveur du développement des CPS liés au *smart building*.

Structuration spécifique et réponse aux défis

L'atomisation des acteurs et des solutions CPS appliquées au *Smart building* a généré plusieurs conséquences négatives. La première est un manque de structuration : les offres sont encore peu lisibles, complexes, et leur promesse de valeur est perfectible. À ce jour, il n'existe encore que peu d'entités et/ou de marques dédiées au *Smart building*. La seconde, c'est la relative fuite en avant entre acteurs : volonté de sortir une offre en premier sur le marché, forte concurrence sur les coûts, manque de formation et qualification des ouvriers/installateurs... En conséquence, la qualité des produits et services des *Smart building* est très inégale. Enfin, la multitude de solutions concurrentes

qui émergent sur le marché pose la question de la réversibilité (ou l'interopérabilité) des CPS, évoquée précédemment.

Mais face aux nombreux défis, et conscients de l'impossibilité d'adresser seul le marché, les acteurs des CPS du *Smart building* se structurent progressivement. La complexité technologique des projets et l'éclatement des ressources entre de multiples acteurs incitent ces derniers à coopérer au sein d'écosystèmes, passant ainsi d'une relation de compétition à une relation de coopération. Ces groupements se structurent généralement autour des acteurs historiques, précurseurs du *Smart building*: les fabricants d'équipements et de matériel, et les acteurs intégrés de la construction.

Place des acteurs historiques et du rôle des professionnels du bâtiment

Les bâtiments commerciaux et l'immobilier de bureaux ont vite progressé et continuent d'évoluer rapidement. Faire face à l'évolution des bâtiments intelligents nécessite une solution pouvant gérer la complexité de l'utilisation conjointe de nombreux systèmes et suffisamment agile pour s'adapter au nombre croissant d'objets connectés. En apportant une innovation à tous les niveaux (produits connectés, contrôle de la périphérie du réseau, applications, analyses et services), les acteurs principaux tendent à proposer de nouvelles solutions techniques.

Ce sont les cas, par exemple :

Du système EcoStruxure™ Building de Schneider Electric qui rend les bâtiments plus intelligents. Il fournit l'information sur une interface ergonomique et design. Le protocole de base offre la liberté de choisir le bon équipement (contrôleurs IP et sondes d'ambiance) pour une application unique.

Du programme Eliot de Legrand qui visent à développer des solutions connectées et interopérables apportant un bénéfice durable à l'utilisateur particulier ou professionnel. Eliot repose d'ailleurs sur trois piliers : le développement de solutions connectées, la création d'infrastructures adaptées et la promotion de l'interopérabilité, permettant à des tiers de délivrer des services au travers des solutions du groupe.

Parallèlement, la législation mondiale telle que la directive sur la performance énergétique des bâtiments au sein de l'Union européenne, a élevé l'efficacité énergétique des bâtiments au rang d'obligation pour la filière. Les avantages fiscaux pour les bâtiments écologiques et certifiés LEED, aux États-Unis, ont également aidé les propriétaires et gestionnaires de bâtiments à appréhender l'impact positif de l'efficacité énergétique sur leurs résultats nets, et ce, tout en améliorant les conditions de vie des occupants. Enfin, l'efficacité des espaces de travail, par la création de lieux confortables, productifs et moins énergivores, est également au centre des préoccupations.

L'exploitation des données issues du bâtiment a par ailleurs détourné l'attention – jusqu'alors centrée sur les fabricants d'équipements – sur les intégrateurs systèmes et les équipes de maintenance. Même les systèmes de gestion des bâtiments (BMS), véritables épines dorsales de tout bâtiment intelligent, ont été banalisés au fil des ans. De fait, ce virage vers l'IoT fait considérablement évoluer le rôle des professionnels du bâtiment.

La gestion des systèmes BMS intègre désormais ces nouvelles technologies. Elle relève des gestionnaires de bâtiments qui voient, en conséquence, leur rôle évoluer. Mais pour appréhender pleinement ces technologies connectées, il leur est nécessaire d'acquérir de nouvelles compétences telles que l'analyse des données. Ils doivent au même titre étendre leurs connaissances afin de gérer efficacement l'ensemble des technologies du bâtiment moderne. Enfin, il leur est nécessaire de collaborer avec les bons intégrateurs systèmes capables d'installer et de gérer des solutions énergétiques complètes, intelligentes et optimisées.

Pour ce faire, les acteurs historiques ont développé des produits et des services :

- l'accès à des solutions technologiques de pointe (interfaces, capteurs, réseaux) qui accompagneront le futur des bâtiments intelligents, mais également ;
- a création de réseau ouvert de professionnels du bâtiment et d'intégrateurs systèmes, qui favorise le partage d'idées et la mise en œuvre de bonnes pratiques ;
- des formations pointues autour des solutions développées comme chez Schneider avec les centres de formation Energy Training.

Intégration des start-up dans un environnement concurrentiel riche et complexe

Le secteur du BTP bénéficie de la forte visibilité d'entreprises dont la notoriété se constate tant auprès de leurs confrères, que du grand public : Vinci Construction, Bouygues Construction, Eiffage... Et c'est un constat qui peut s'étendre aux acteurs de la domotique (Somfy, SoWee...) et aux fabricants d'équipements électriques et électroniques (Honeywell, Legrand, Schneider...). Or ces figures de proue ne représentent qu'une minorité des acteurs des CPS du bâtiment intelligent.

Un bâtiment intelligent apporte désormais des services totalement nouveaux. Conséquence : les business modèles évoluent, notamment sous l'influence des *start-up* innovantes du secteur qui fleurissent. Ces entreprises se développent selon deux modalités. De nombreuses *start-up* se créent en proposant un service innovant, spécifique au *Smart building*: ce sont les *start-up* dites « verticales », et elles représenteraient environ 75 % des *start-up* du secteur⁴⁵. On peut citer par exemple la *start-up* lilloise StereoGraph, qui a développé une solution à destination des gestionnaires de patrimoine pour faciliter la maintenance des bâtiments grâce à la 3D, et qui cherche actuellement à lever plusieurs millions d'euros⁴⁶. Les *start-up* transverses (25 %) se positionnent elles comme expertes sur une brique ou un enjeu technologique particulier, mais transverses à plusieurs marchés applicatifs; c'est le cas par exemple d'entreprises spécialisées dans la sécurisation d'objets connectés, le traitement de la donnée, ou le développement d'application de services sur smartphones.

Ainsi, les *start-ups* se multiplient et offrent un panel croissant de services tels que des plateformes de supervision (équipements GTB, énergie, etc.) ou des applications mobiles de services aux occupants (réservation de salles, gestion de l'éclairage, badge sécurité, géolocalisation, etc.).

Or, comme évoqué précédemment, la valeur générée par le pourvoyeur de services est de plus en plus importante dans le *Smart building*. Ces *start-ups* attirent donc les convoitises des grands acteurs du BTP, mais aussi des fabricants de produits électriques et électroniques, ainsi que des énergéticiens. Preuve de l'intérêt de ces groupes pour les jeunes pousses du secteur, la division des technologies de l'immobilier de la firme allemande Siemens a acquis 3 *start-up* en l'espace de moins de deux mois : Enlightened Inc., J2 Innovations, et Building Robotics, trois entreprises spécialisées dans le *Smart building*⁴⁷.

Un écosystème encore fragmenté, entre travail en silo et premiers rapprochements

Pour tirer profit de leurs complémentarités, les entreprises de la filière s'associent en groupements, et au sein d'associations.

Par l'intermédiaire des groupements, les entreprises se réunissent pour former un pool d'acteurs complémentaires par leur positionnement, leurs technologies et leurs ressources (financières et humaines) permettant d'innover et de développer des offres globales basées sur les CPS. Plutôt que de s'appuyer sur des alliances éphémères le temps d'un projet, ces entreprises misent sur un rapprochement plus durable, permettant de cumuler les effets d'expérience et une relative confiance mutuelle. À l'instar des groupements existants dans le BTP pour les grands travaux, plusieurs groupements concurrents se créent et s'opposent concernant le *smart building*, nuançant l'aspect collectif du développement à l'échelle de la filière.

Parmi les associations majeures, la SBA (*Smart building Alliance*), créée en 2012, fédère à ce jour 300 entreprises et organisations représentantes de l'ensemble des corps de métiers liés au bâtiment et aux acteurs de la *Smart City*, pour penser et définir le *Smart building* ensemble: collectivités, installateurs, opérateurs, promoteurs, énergéticiens...⁴⁸ La SBA s'est donnée pour mission de tisser une transversalité permettant aux différents acteurs du marché d'échanger en amont en prenant en considération les enjeux majeurs que sont le numérique, mais aussi l'environnement et le développement durable.

Articulation des acteurs des CPS à ceux du BTP, de l'énergie et du numérique

Historiquement, la question de la maîtrise énergétique a été l'une des premières à être adressée par le *Smart building*. Cela en fait aujourd'hui l'une des thématiques sur lesquelles les acteurs et l'écosystème sont les plus structurés. Ce passé explique aussi la forte proximité entre deux types

⁴⁵ Wavestone, Le radar des start-up IoT B2B françaises 2019, Avril 2019

⁴⁶ <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Dossiers/Le-Smart-Building>

⁴⁷ Immobilier2.0, Siemens rachète trois start-up du monde du *SmartBuilding*, Juillet 2018

⁴⁸ <https://www.smartbuildingsalliance.org/association/a-propos/>

d'acteurs : ceux évoluant traditionnellement dans le secteur du BTP (promoteurs, bureaux d'études, architectes, installateurs), et ceux issus du monde de l'énergie (énergéticiens, distributeurs, opérateurs réseaux...).

Avec la montée en puissance du *Smart building*, un troisième type d'acteurs est venu s'ajouter aux précédents : ceux des CPS. Ce sont les fabricants d'équipements électroniques (capteurs, actionneurs, calculateurs, systèmes de communication...), mais également les sociétés de services (conseil, études, modélisation, développement...). Ils se sont rapidement positionnés comme partenaire prescripteur et fournisseur des majors du BTP, prenant le rôle de moteurs et assembleurs des solutions de *Smart building*. Ainsi, Schneider Electric a annoncé un partenariat stratégique début 2019 avec le hollandais PLANON, un des *leaders* sur le marché des logiciels de gestion immobilière et de gestion d'installations. Les deux acteurs travaillent ensemble depuis un an sur le développement d'une plateforme informatique unique (solution *cloud*) au sein de laquelle s'effectue la convergence entre d'une part des données en temps réel sur les bâtiments et des analyses basées sur l'intelligence artificielle, et d'autre part des réponses qui généreront des workflows à l'usage des exploitants et occupants d'immeubles et des prestataires de services avec lesquels ils travaillent⁴⁹.

À titre d'exemple, un GIE « Enjeu énergie positive » cherche à favoriser la diminution de la consommation en énergie des futurs bâtiments collectifs et à augmenter leur production énergétique au moyen d'énergies renouvelables. C'est Bouygues Immobilier qui est à l'origine de ce projet avec Lexmark, Philips, Schneider Electric, Siemens, Sodexo, Steelcase et Tandberg⁵⁰.

Mais cet équilibre relatif a récemment été mis à mal par la percée des géants (étrangers) du numérique tels que Microsoft, Amazon, IBM... Ils misent en effet sur deux forces pour investir le marché. D'une part, leur notoriété et leur très forte diffusion mondiale laissent entrevoir la possibilité, par leur intermédiaire, de proposer des offres interopérables. Sur ce sujet, ils entrent en confrontation directe avec les fabricants d'équipements des CPS : qui sera en mesure d'imposer un standard, ou tout du moins un référentiel de travail commun, à partir duquel les solutions de *smart building* (et les CPS) seront développées ? La question reste encore ouverte (et brûlante) à ce jour. D'autre part, les géants du numérique ont une forte expérience et proximité avec le grand public, tant en matière d'offre de service, d'ergonomie ou de force marketing. Ils deviennent de fait des concurrents redoutables dans la course au développement d'offres de services aux occupants. Cependant, leur approche très technologique ne leur permet pas (encore) de rivaliser avec les *start-up* du secteur (présentées précédemment). Ils se positionnent donc comme fournisseurs de technologies numériques clés (*cloud*, internet des objets, *Big data*, etc.) pour leurs partenaires, comme les fabricants d'équipements, mais sont surveillés attentivement par tous les acteurs français de la filière.

Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025

Seul le marché de la gestion technique des bâtiments (GTB) est à ce jour bien connu, estimé à près de 75 millions d'euros en France en 2018. Il se porte bien même, avec une croissance forte en 2018 (+3,5%). Xerfi estime que 6,5% des immeubles français seront équipés de système de GTB à l'horizon 2020. Le marché du bâtiment intelligent est quant à lui difficile à quantifier aujourd'hui notamment en raison de l'éclatement des acteurs (et des solutions) et aux difficultés à estimer le poids économique et la valeur précise de deux ou trois briques technologiques qui le composent (équipements électriques pour intégrer le bâtiment tertiaire à un *smart grid*, et NTIC pour le piloter, etc.).⁵¹ Une première estimation conduirait à un marché européen du *Smart building* approchant les 2 milliards d'euros en 2017. Par ailleurs, les chiffres existants concernant les marchés support tendent à démontrer le potentiel gigantesque de pénétration des CPS dans le *Smart building* : d'après Michael SULLIVAN, Segment Président Buildings de Schneider Electric, « on prévoit, à l'échelle mondiale, 5,5 milliards d'objets connectés dans les bâtiments d'ici à 2021 ».

À ce jour, c'est le marché de la performance énergétique qui entretient la forte croissance du marché, dans un contexte réglementaire et technologique favorable. Le cadre réglementaire est tout d'abord incitatif. En effet, la loi de transition énergétique votée en 2015 vise à une réduction de la consommation énergétique finale de 50 % entre 2012 et 2050 notamment grâce au développement

⁴⁹ Le Moniteur, Schneider Electric mise sur le smart building avec PLANON, Mars 2019

⁵⁰ <http://www.rt-2020.com/>

⁵¹ Xerfi Percepta, 2018

de bâtiments basse consommation, voire de BEPOS (bâtiments à énergie positive qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment) et à la rénovation de bâtiments anciens peu performants⁵². De plus, les réglementations thermiques mènent à des exigences environnementales poussant à plus de sobriété énergétique. L'actualisation régulière et le durcissement progressif des normes telles que les normes RT (norme RT2020 à venir) a notamment permis une montée en puissance rapide des réponses nécessaire à leur satisfaction.

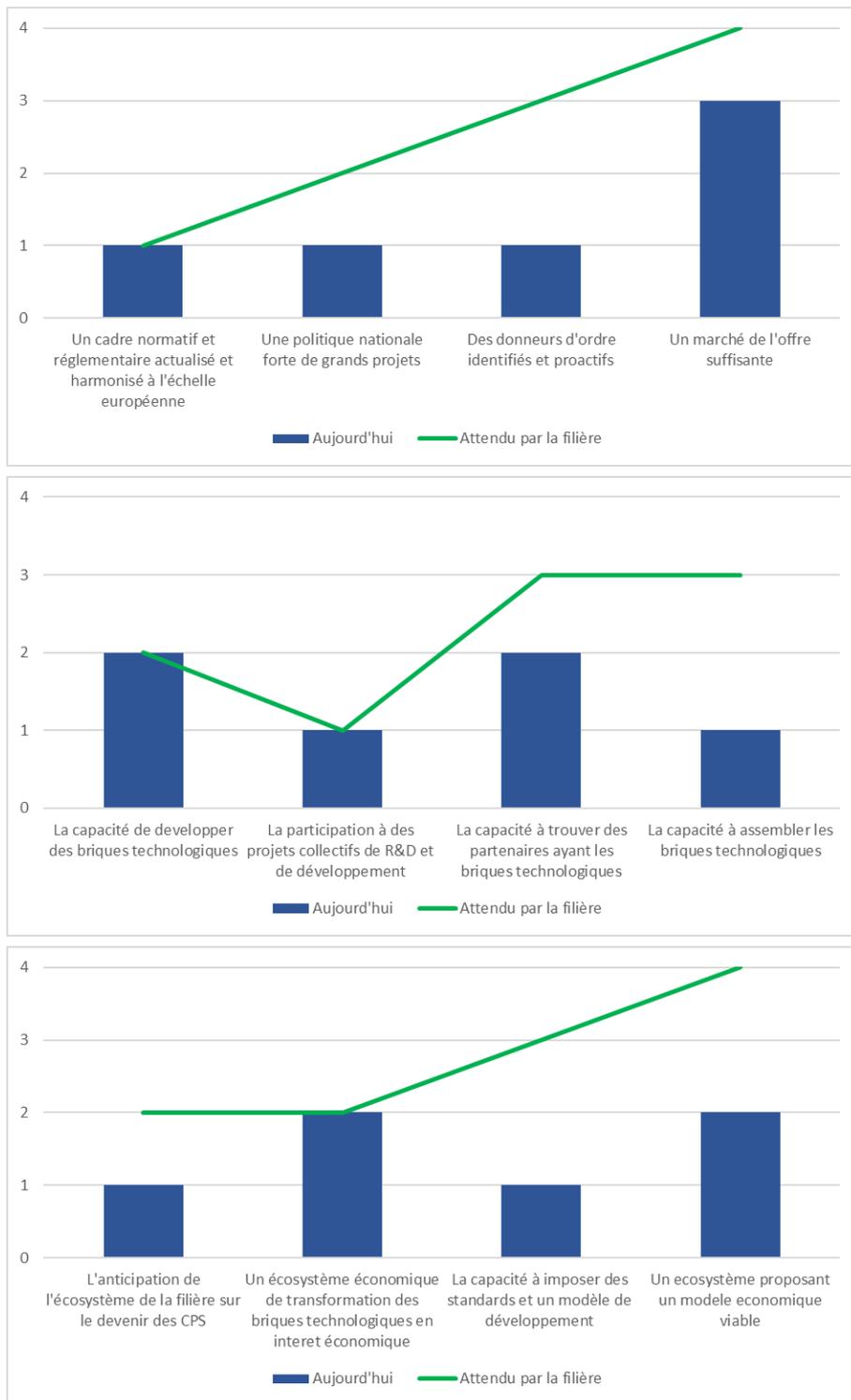
Aujourd'hui donc, la problématique du retour sur investissement est essentiellement abordée sous l'angle de la performance énergétique. Mais le prix bas de l'électricité en France n'est pas un levier suffisant pour garantir le ROI du *smart building*. Il faut donc regarder globalement les services (énergie, fluides, sécurité, bien-être...). Ils sont la clé de la rentabilité et compenseront rapidement le coût d'investissement initial. Le *smart building* se révélera alors moins cher qu'un ouvrage similaire conçu et mis en œuvre selon les pratiques conventionnelles en silos. Selon les estimations, 75 % du coût total d'une bâtisse relève de l'exploitation sur l'ensemble de son cycle de vie, contre seulement 25 % du coût attribué à sa construction⁵³.

⁵² Wavestone, *Smart Buildings* : les acteurs du bâtiment qui se lancent dans la course, Mars 2018

⁵³ Smart Building Alliance, 2019

Synthèse

Graphique 5 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière Bâtiment



Le segment des CPS dans le BTP est une formidable opportunité pour augmenter les fonctionnalités des bâtiments (sécurité, maintien à domicile des seniors, bien-être), mais également en permettant une meilleure prise en compte des mix énergétiques et des utilisations des besoins énergétiques. L'intérêt pour les producteurs d'électricité et pour les fournisseurs de services est de pouvoir réduire la consommation au moment des heures de pointe et les répartir à d'autres moments dans la journée. De nombreux leaders de l'IoT, comme IBM, soucieux de l'environnement et de la standardisation des réseaux sont déjà bien implantés sur le marché. Des grands groupes tels que Bouygues

Immobilier, Vinci font appel à des innovateurs spécialisés dans l'IoT pour faire face à la concurrence. Ces entreprises n'interviennent pas tous dans les mêmes types de solutions techniques. Les acteurs traditionnels du BTP ont donc besoin de s'entourer de *start-up* innovantes (Vesta System, Smart Impulse, Igenko...) pour s'implanter au plus vite dans ce nouveau marché.

Cependant la filière française ne peut se développer durablement que si le marché continue à se développer et que la volonté politique d'améliorer la qualité de vie et de diminuer l'impact énergétique continue. De plus, l'écosystème majoritairement fait de *start-up* et PME doit encore se structurer. Cet écosystème doit être soutenu par des programmes d'accélération, des structures d'incubation et de développement en lien avec les leaders du bâtiment. Enfin, la filière a besoin d'un cadre compétitif plus affirmé. Une stratégie d'approche globale du s'impose, loin des logiques de silos actuelles qui pèsent sur la rentabilité et la performance des projets.

Applications dans l'automobile

Description de la filière

Les transports et la mobilité sont au cœur de notre économie. Le secteur des transports emploie en Europe environ 10 millions de personnes et représente environ 5 % du produit intérieur brut (PIB). L'efficacité et la qualité des systèmes de transport sont essentielles. Ils ont un impact majeur sur la qualité de vie des personnes. En moyenne, 13,2 % du budget des ménages est consacré aux biens et services de transport. L'activité des transports de marchandises devrait augmenter de 40 % en 2030, par rapport à 2005, et de plus de 80 % d'ici à 2050.

L'augmentation du trafic exige une approche durable de la mobilité dans la société. Les infrastructures de transport doivent désormais être efficaces, sûres, fiables et écologiques afin de répondre à ces nouvelles exigences. Elles comprennent non seulement des infrastructures routières et ferroviaires, mais également les véhicules, les réseaux de communication, les services liés et la gestion du trafic.

Le développement du véhicule automatisé, ou autonome, représente ainsi un enjeu considérable pour répondre à la question de la mobilité. Il s'agit de répondre aux nouveaux modes de déplacements des utilisateurs et aux nouvelles façons de les consommer. Aujourd'hui, l'achat d'un véhicule se fait dans le cadre d'un usage personnel ou professionnel. Or, le développement de services reposant sur des flottes de véhicules autonomes pourrait remettre en cause ce modèle de consommation des véhicules. L'industrie automobile passerait alors d'une industrie de biens à une industrie de services.

De plus, les questions de sécurité routière sont au cœur des préoccupations, impactant la mobilité. Alors que 90 % des accidents corporels de la route sont imputables à des erreurs humaines, l'Europe mise sur les nouvelles technologies pour mieux protéger les passagers, les piétons et les cyclistes, et réduire ainsi le nombre de décès et de blessures⁵⁴. Sous l'impulsion de la Commission européenne, « le règlement sur la sécurité générale des véhicules à moteur » va évoluer. Toute une série de nouveaux équipements – déjà commercialisés sur certains véhicules haut de gamme – devrait être rendue obligatoire à partir de 2022, à la suite d'un accord négocié au sein des institutions européennes.

Liste des quinze nouveaux dispositifs qui seront obligatoires en 2022 :

1. Système de détection et d'avertissement en cas de somnolence du conducteur ;
2. Système de détection et d'avertissement en cas de distraction du conducteur ;
3. Système d'adaptation intelligente de la vitesse (limitateur de vitesse, par exemple) ;
4. Caméra de recul ou capteurs de détection de piétons pour les marches-arrières ;
5. Système d'antidémarrage avec éthylomètre ;
6. Signal d'arrêt d'urgence ;
7. Enregistreur de données en cas d'accident (« boîte noire ») ;
8. Assistance au maintien de la trajectoire ;
9. Système avancé de freinage d'urgence ;
10. Ceintures de sécurité améliorées pour la protection des occupants, sur toute la largeur, à l'avant des véhicules ;
11. Protection des occupants en cas de choc latéral ;
12. Agrandissement de la zone d'impact de la tête pour les piétons et les cyclistes ;
13. Système de surveillance de la pression des pneus ;
14. Dispositif de détection des piétons à l'avant et sur le côté des véhicules pour avertir les conducteurs de leur présence ;
15. Vision directe des conducteurs d'autobus et de camions.

⁵⁴ <https://www.businessinsider.fr/les-equipements-obligatoires-de-vos-voitures-vont-changer-voici-les-nouveautes-a-venir/>

La plupart de ses nouveaux dispositifs nécessiteront donc la mise en place de systèmes cyberphysiques dans le secteur automobile.

Un véhicule autonome est un véhicule apte à circuler sur les voies publiques, sans l'intervention d'un conducteur. La notion de voiture autonome s'étend du véhicule totalement autonome au véhicule « semi-autonome » composé de différents systèmes d'aide à la conduite.

Pour qualifier le niveau d'automatisation des véhicules, différentes normes existent. Le classement opéré par la SAE (Société des ingénieurs de l'automobile) aux États-Unis se compose de six niveaux :

Tableau 2 – Classement des niveaux d'autonomisation des véhicules

0	1	2	3	4	5
Aucune automatisation	Assistance à la conduite	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation élevée	Automatisation complète
Conduite entièrement effectuée par le conducteur	Le système de conduite peut envoyer des avertissements et intervenir temporairement (régulateur de vitesse adaptatif...)	Le système de conduite est capable de contrôler complètement le véhicule (volant, accélérateur et frein). Le conducteur est responsable de surveiller la conduite et est prêt à intervenir à tout moment pour reprendre le contrôle si le système ne réagit pas comme prévu.	Le système de conduite est capable de réagir automatiquement aux situations qui exigent une action immédiate, comme le freinage d'urgence. Le conducteur doit cependant être prêt à intervenir rapidement.	Le système de conduite est automatisé. Il est capable d'accomplir les actions nécessaires, même si le conducteur n'est pas disponible pour intervenir immédiatement.	Le système de conduite est totalement automatisé : aucune intervention humaine n'est requise
		Aujourd'hui		2020-2025	2030-2035

Source: SAE (Society of Automotive Engineers)

De nombreuses études estiment que les niveaux 3 et 4 devraient être franchis à horizon de dix ans, mais PSA a annoncé en mars 2019 abandonner les travaux sur les niveaux 4 et 5, les estimant non réalistes à horizon visible, à coût compatible avec l'industrie automobile. Les progrès technologiques en termes de véhicules autonomes peuvent cependant être plus rapides que prévus : le modèle Cruise (sans pédale, ni volant) de General Motors présenté au salon CES en 2018 rentre dans la catégorie 5 ; le véhicule est aujourd'hui testé en milieu urbain à San Francisco.

Depuis le lancement de la Nouvelle France Industrielle, la France s'est dotée d'un programme visant à faciliter le déploiement du véhicule autonome sur le territoire national. Une feuille de route a été produite grâce à ce plan définissant les prochaines étapes à franchir.

Les expérimentations de ces véhicules sont possibles sur routes ouvertes en France depuis mi-2015. Les principaux acteurs français ont déjà commencé à effectuer des tests grandeur nature, toutefois ils restent très discrets sur ce sujet. Ces technologies sont complexes à mettre en place et ne sont pas encore optimisées pour être intégrées aux productions de véhicules en série.

Cependant, il ne fait aucun doute qu'ils le seront dans un avenir prochain. Une étude réalisée en 2017 par le Brookings Institute⁵⁵ a estimé que plus de 80 milliards de dollars avaient déjà été investis dans le véhicule autonome dans le monde. Renault et PSA ont déjà entrepris des expérimentations, et Valeo développe des capteurs et des solutions algorithmiques destinés à pallier ces incidents. Par ailleurs, la présence de deux constructeurs de navettes autonomes en France est un avantage certain pour le développement des technologies du véhicule autonome.

Le développement d'un système complet et opérationnel fondé sur des véhicules autonomes et connectés n'est pas réalisable par un seul acteur. Aucun ne peut maîtriser toutes ses composantes, qu'elles soient scientifiques, technologiques, industrielles ou économiques. La tendance, qui ne fait que s'accroître, est donc aux alliances – voire aux fusions – entre opérateurs, constructeurs et organismes de recherche publics et privés. Pour préparer les futurs services de robot-taxis, les

⁵⁵ Gauging investment in self-driving cars, Octobre 2017

constructeurs automobiles établissent des partenariats avec les opérateurs de transports, tel Renault avec Transdev, ou les constructeurs allemands avec les opérateurs des grandes villes comme Hanovre, Stuttgart et Munich. Par ailleurs, les fabricants de véhicules rachètent à prix d'or des entreprises spécialisées. GM s'est offert Cruise Automation, qui a développé un système de conduite autonome, pour environ un milliard de dollars. Ford va investir la même somme dans la *start-up* Argo-AI (intelligence artificielle et robotique). Quant aux constructeurs allemands Daimler, BMW et Audi, ils ont racheté pour trois milliards de dollars, le fournisseur de cartes géographiques Here.

Dans le cadre de la NFI les acteurs du véhicule autonome ont proposé une feuille de route temporelle en classant les applications du véhicule autonome en fonction de leur arrivée à maturité technologique espérée.⁵⁶ Comme le montrent les figures suivantes, les difficultés rencontrées diffèrent d'un profil de véhicule à l'autre. Cependant, les objectifs de recherche Nouvelle France Industrielle « Véhicule Autonome » sont principalement sur quatre domaines :

- l'intelligence embarquée ;
- la connectivité ;
- la relation de l'humain avec les technologies ;
- la sécurité des systèmes.
- l'Inria⁵⁷, quant à elle, propose les défis technologiques principaux des CPS suivants :
 - les défis en lien avec la navigation autonome ;
 - les défis en lien avec l'intégration et la sûreté de fonctionnement ;
 - les télécommunications et la cybersécurité des véhicules connectés ;
 - le Big data ;
 - la simulation ;
 - la modélisation des grands systèmes : trafic routier et gestion de flottes ;
 - les interfaces Humain-machine.

⁵⁶ Nouvelle France Industrielle «Véhicule Autonome», la Nouvelle France industrielle, PFA Auto
⁵⁷ Inria, livre blanc sur les véhicules autonomes et connectés, 2018

Figure 28 - Maturité technologique dans les véhicules individuels

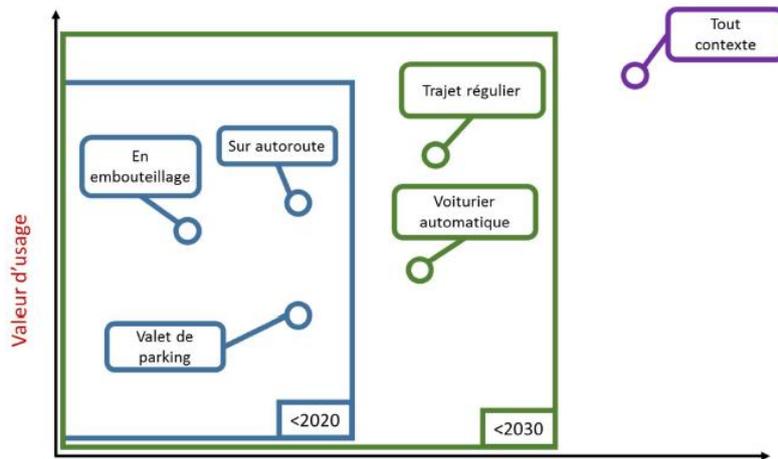


Figure 29 - Maturité technologique dans les véhicules de transport

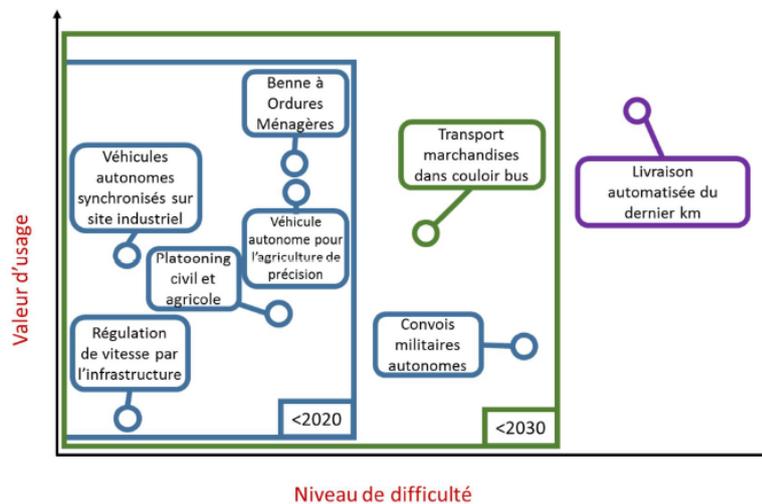
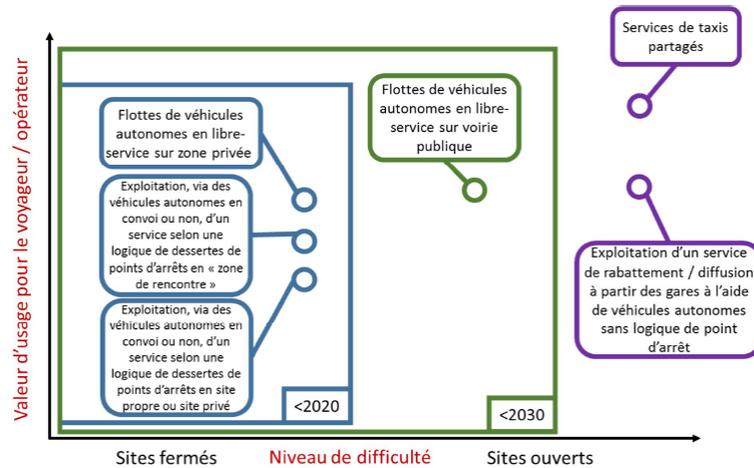


Figure 30 - Maturité technologique pour les véhicules de transport public



Source : Nouvelle France Industrielle « Véhicule Autonome »

Les blocs technologiques prioritaires

La conception et le développement de véhicules autonomes et connectés d'un niveau d'autonomie de plus en plus élevé posent de formidables défis technologiques et scientifiques. Les mathématiques, le génie logiciel, l'intelligence artificielle ainsi que la cybersécurité sont parmi les principaux domaines des sciences du numérique impliqués.

Le tableau donné en annexe regroupe en trois catégories distinctes les différents domaines concernés par le développement du véhicule autonome connecté (VAC) :

- navigation autonome : algorithmes et fonctions nécessaires à la prise de décision et à la navigation, depuis le capteur jusqu'à la locomotion ;
- intégration - systèmes embarqués : aspects liés à l'intégration pratique des logiciels, à la fiabilisation et aux architectures fonctionnelles et matérielles et au temps réel, mais aussi à la connectivité et la cybersécurité ;
- modélisation - intégration large échelle : modélisation du trafic et des interactions VAC - usagères et usagers. Aspects collecte et fouille de données, télé diagnostic, simulation large échelle, offres de mobilité intelligente, etc.

Précision des capteurs et fusion multicapteur

La voiture autonome qualifie un véhicule piloté par une intelligence artificielle, capable de se diriger seul et d'interagir avec son environnement pour adapter sa conduite aux aléas extérieurs afin de se rendre à un lieu donné sans intervention humaine. Les véhicules contiennent en moyenne 70 systèmes embarqués indépendants les uns des autres et dédiés à des fonctions spécifiques. Les CPS favorisent l'interconnexion de ces fonctions.

Les capteurs de détection de l'environnement comme les radars, les capteurs lidars ou les caméras sont des composants clés des véhicules autonomes. Ces capteurs sont actuellement fabriqués à des millions d'exemplaires. Si nous prenons les radars, par exemple, ils sont aujourd'hui majoritairement intégrés dans les voitures haut de gamme. Cependant, ils servent essentiellement à améliorer le confort de conduite et parfois pour prévenir des accidents.

Les capteurs radar automobiles utilisent essentiellement des signaux à ondes entretenues modulés en fréquence (FMCW). La précision du radar dépend de nombreux facteurs, tels que les composants matériels, le traitement logiciel et l'écho du radar lui-même. Pour une cible située à 100 mètres, une erreur de seulement 1 degré sur le capteur radar générera un décalage latéral de 1,75 mètres, amenant le CPS à positionner l'objet sur une file différente et donc à envoyer une donnée erronée pour le système dans son ensemble⁵⁸.

L'ensemble du concept de systèmes de CPS repose sur la fiabilité de ces derniers. La capacité d'un capteur dépend d'une multitude de paramètres qui dépasse la simple qualité des radars utilisés (type de composant, modalité de communication, logiciel... ; mais également situation de montage (radômes) souvent sous-estimé). Les pièces ne remplissent plus uniquement leur fonction initiale, mais doivent également présenter des caractéristiques définies. Leurs propriétés nécessitent par conséquent des méthodes de mesures précises et pratiques.

Tous les capteurs présentent des limitations qui les rendent inutilisables dans certaines conditions : masquages, portée réduite, biais, imprécisions... De plus, la défaillance d'un capteur peut surgir à tout moment. La fusion multicapteur, qui combine des données fournies par les différents capteurs pour obtenir une information globale pertinente, est un moyen de remédier à ce problème. Dans un véhicule autonome et connecté, la fusion multicapteur est en fait une nécessité pour mener à bien les différentes tâches de perception.

De même, la localisation globale du véhicule passe par une fusion des données de GNSS (localisation par satellite), d'INS (navigation inertielle) et d'odométrie (mesure de déplacement des roues).

La fusion de données reste aujourd'hui un grand défi, tant scientifique que technique. De multiples techniques de fusion sont exigées par les applications, mais aussi par les organes d'évaluation des véhicules. Ainsi, au niveau industriel, les exigences d'Euro NCAP (un organisme international

⁵⁸ Les critères de réussite de la conduite autonome, KOPPEL, HEUEL, AHMED, REIL, CEM, Février 2019.

d'évaluation) vont pousser les constructeurs à développer des systèmes de fusion de capteurs afin de qualifier leurs systèmes d'aide à la conduite (ADAS).

Intelligence artificielle dans les véhicules autonomes

Pour comprendre son environnement, le véhicule autonome doit d'abord savoir reconnaître les objets et les obstacles. Quels que soient les objets à détecter (piétonnes et piétons, véhicules, panneaux...), ce sont les techniques d'apprentissage automatique qui donnent actuellement les meilleurs résultats. De nombreuses bases de données pour le *deep learning* existent déjà pour divers types d'objets et notamment les véhicules, les piétonnes et les piétons, les panneaux routiers... Parmi les bases consacrées aux piétonnes et aux piétons, on trouve celle de Daimler (Daimler Pedestrian Detection Benchmark), de Caltech, ou d'Inria.

La planification d'itinéraires est aujourd'hui fondée sur des techniques bien maîtrisées. Mais il est désormais nécessaire de prendre en compte de nouveaux critères d'optimisation comme le modèle du trafic, la consommation de chaque véhicule et le confort des passagers. Concernant la planification des manœuvres, les travaux sur la planification de celles-ci commencent à donner des résultats intéressants même s'ils restent encore limités.

L'IA a prouvé également son efficacité pour la prédiction de tendances et d'évènements. Elle est aujourd'hui utilisée pour la prévision de trafic et devrait se démocratiser pour la maintenance prédictive des équipements et des infrastructures de transport, sujet par exemple étudié par Valeo⁵⁹. Les scénarisations de trafic sont encore au balbutiement. De plus, les méthodes de négociation/décision et les algorithmes de planification pour prévoir une trajectoire sont encore en cours de développement notamment, car ils doivent prendre en compte l'environnement, les contraintes de risque, de consommation, de confort et, mais également les usages locaux comme le Code de la route.

Simulation et modélisation des grands systèmes

Même si nous sommes en capacité de recueillir une multitude de données, il sera difficile de proposer une simulation complète pour une homologation. La simulation d'un véhicule autonome et connecté est un problème particulièrement difficile. En effet, quand bien même chaque sous-système pourrait individuellement être validé par simulation, comment valider la complexité du système intégré, en utilisation réelle sur la route. Il faudrait simuler le fonctionnement de toutes les briques technologiques simultanément, mais aussi la complexité des scènes routières,

Les comportements des autres conducteurs et conductrices et leurs réactions face à des situations prévisibles ou non, tout en prenant en compte le fonctionnement simultané d'un grand nombre de véhicules autonomes. Aujourd'hui, il n'existe aucun simulateur adapté à toutes les fonctionnalités du véhicule autonome et connecté. Le futur simulateur dédié devra donc comporter, entre autres, des modèles de trafic, des modèles comportementaux de conducteurs divers, des modèles cinématiques et dynamiques des véhicules, des modèles des capteurs (incluant les imprécisions et incertitudes de mesure), des modèles d'environnement réalistes avec des scènes urbaines, périurbaines ou autoroutières, des modèles d'environnement météorologiques (pluie, neige, brouillard, ...), et des modèles de communications.

Avec un grand nombre de véhicules connectés qui sillonnent les routes et les rues, la modélisation du trafic va pouvoir s'enrichir des données collectées par les véhicules jouant le rôle de capteurs en mouvement. Plusieurs travaux récents en mathématiques appliquées et en ingénierie des transports étudient l'impact de l'introduction des véhicules autonomes et connectés dans la circulation routière. En effet, une gestion optimale des changements de voie et des intersections pourrait conduire à une meilleure utilisation de l'espace sur les routes et stabiliser le trafic en empêchant l'apparition des vagues « *stop-and-go* », et améliorer ainsi la fluidité du trafic.

Connectivité et sécurité

Les voitures sans chauffeur du futur devront s'appuyer sur de nombreux capteurs et disposer de la capacité de traiter les données transmises par ceux-ci. Aujourd'hui, aucun système existant aujourd'hui, à bord d'un véhicule, ne sait parfaitement gérer les défaillances et les erreurs, L'ajout de

⁵⁹ DGE 2019/02

communications véhiculaires est important pour que les voitures sans chauffeur deviennent une réalité à grande échelle et il est également nécessaire de sécuriser les moyens de télécommunications embarqués afin d'éviter toute intrusion.

Les communications V2V (*vehicle-to-vehicle*) seront utilisées pour partager des données sur l'état de la route et les conditions de circulation, ainsi que des informations permettant d'anticiper les arrêts potentiels et les évolutions de la route. De plus, les véhicules devront pouvoir communiquer avec un certain nombre d'appareils comme les stations de base cellulaires et d'autres CPS comme des lampadaires ou un panneau de signalisation. Ces derniers devront donner des informations sur l'état de la route ou sur l'environnement du véhicule roulant. Ce corps de recherche s'appelle le *Vehicle to Everything (V2X)*. Une première période de test chez PSA a montré le potentiel de la technologie avec deux cas d'utilisation : « *See Through* » entre deux véhicules connectés sur une route et « *Emergency Vehicle Approaching* » visant à informer les conducteurs lorsqu'un véhicule d'urgence est à proximité en temps réel. Le Groupe PSA et Qualcomm Technologies continuent de travailler ensemble pour tester la technologie C-V2X basée sur le spectre 3GPP (5^e génération) du programme de partenariat de troisième génération (5,9 GHz), allouée aux systèmes de transport intelligent (ITS) et aux communications réseau en réseau spectre des opérateurs de télécommunications.

La latence des futures technologies, notamment 5G, sera un facteur déterminant pour transmettre les informations aux véhicules. Les véhicules autonomes sont sans doute l'une des applications les plus attendues que la 5G pourra rendre possible. Un freinage trop lent devant un obstacle en raison d'un temps trop important dans la communication risquerait de blesser, voire d'entraîner la mort des passagers du véhicule. Une fiabilité des communications pour le V2X sera indispensable pour permettre la mise en place de ces véhicules en flotte. Une voiture arrêtée pourra télécharger ou charger des informations sur son emplacement *via* une station de base à proximité. Ce mécanisme permettra aux entreprises de devenir des collecteurs de données. Le traitement se fera probablement hors du véhicule dans la station de base ou dans le *cloud*. Les améliorations technologiques de traitement seront envoyées directement aux infrastructures cellulaires plutôt que dans les véhicules limitant ainsi l'obsolescence d'un véhicule en lui permettant toujours d'obtenir des mises à jour sans devoir être modifié⁶⁰.

La connectivité filaire au sein de l'habitacle devient également de plus en plus complexe et lourde. Pour répondre à cette problématique, une grande quantité de connectivité sans fil sera ajoutée aux véhicules rendant la coexistence de tous ces éléments dans un milieu confiné de plus en plus complexe. Des puces Wifi 6 qualifiées automobile (QCA6696) seront aptes à répondre aux exigences de robustesse et de latence des utilisateurs dans des environnements denses et congestionnés. En complément, des circuits devront être embarqués pour faciliter la coexistence de différentes technologies radio (4G/5G, C-V2X, Wifi 6, Bluetooth 5.1, GNSS) au sein d'une automobile et fusionner des données issues de plusieurs capteurs automobiles (géolocalisation par satellite GNSS, caméra, centrale inertielle, odomètres) pour assurer un positionnement particulièrement fin du véhicule et bâtir des cartographies à partir d'informations de conduite précises à la voie près (moins d'un mètre). Ces éléments génèrent de gros problèmes de sécurité physique et des risques d'hacking piratage qui devront être traités. Les initiatives gouvernementales jouent un rôle important dans la sécurité des véhicules autonomes (par exemple l'US DoT, Automated Vehicles 3.0, qui s'appuie sur une vaste gamme de véhicules automatisés). Les normes sont en cours d'élaboration. Le document SAE J3061 (Guide sur la cybersécurité des systèmes de véhicules physiques et électroniques), publié en 2016, décrit un cadre de processus pouvant être utilisé pour intégrer la cybersécurité dans les systèmes de véhicules. Des alliances sont formées entre les constructeurs et les fournisseurs de véhicules, fournissant des plateformes pour les développements nécessitant une coopération à l'échelle de l'industrie. Parmi les nombreuses communautés, Auto-ISAC est l'une des communautés les plus importantes du monde à se focaliser sur la cybersécurité (partage des informations et création de guides sur les meilleures pratiques) et le C2C-CC (Consortium, Car 2, Car Communication) axé sur le déploiement de systèmes et de services de transport intelligents coopératifs (C-ITS).

Puissance de calcul dans un environnement énergétique contraint

Le véhicule autonome, équipé de multiples capteurs, doit bénéficier de capacités de traitement en temps réel. Aujourd'hui, les rares systèmes déployés à bord de véhicules (par exemple chez *Tesla*) n'intègrent que très peu de composants logiciels, si on les compare à une architecture globale de

⁶⁰ La 5G est arrivée... et arrivée est maintenant? Sarah Yost, Electronique Mag, juillet 2018.

navigation ou de décision. Lorsque des millions de lignes de code seront embarquées, il faudra procéder à l'optimisation des architectures matérielles et logicielles, et sans doute concevoir des architectures matérielles dédiées.

Les microcontrôleurs à multi cœur aideront à aller plus loin dans la conception de voitures. Historiquement, ces microcontrôleurs sont utilisés dans des CPS critiques dans des secteurs comme l'aéronautique et la Défense. Basés sur une architecture *Low Power*, de nouveaux microcontrôleurs seront capables de quadrupler la puissance et doubler l'espace mémoire par rapport à la précédente génération à un seul cœur. Des avantages qui permettront aux constructeurs automobiles d'intégrer des fonctions telles que l'injection directe, la suralimentation et la gestion complète des systèmes de transmission dans un seul composant. Avec soixante à quatre-vingts unités de contrôle (Engine Control Unit – ECU) par véhicule⁶¹, l'architecture informatique des automobiles est devenue trop complexe. Des chiffres qui pourraient être multipliés par trois voire quatre avec la voiture autonome. Les constructeurs envisagent maintenant de consolider les fonctions sur un nombre restreint d'ECU et de simplifier l'architecture réseau avec notamment une migration vers des variantes d'Ethernet. Cette évolution en cours va aussi dans le sens d'une plus grande fiabilité et d'une plus grande sûreté de fonctionnement du simple fait qu'il y a moins de composants électroniques.

Les algorithmes à la base de l'architecture décisionnelle devront quant à eux être validés par des méthodes de preuves formelles du fait d'une nécessité juridique et économique.

Dans le même temps, l'Intelligence Artificielle est intégrée de façon croissante dans les systèmes électroniques. La reconnaissance d'images, et donc d'objets détectés devient possible grâce à la puissance de calcul embarquée dans le véhicule. De nouvelles fonctionnalités apparaissent aussi grâce à la reconnaissance vocale ou à la compréhension du langage naturel et permettent ainsi d'offrir une expérience simple et personnalisée aux utilisateurs de véhicules.

Communication fiable et gestion des données personnelles

Les algorithmes sont à la base de l'architecture décisionnelle. La validation de ces algorithmes, par des méthodes de preuves formelles, sera une nécessité juridique et économique. Dans cette perspective, l'IEEE a décidé d'allouer une bande de fréquence autour de 5.9 GHz dédiée aux applications véhiculaires (IEEE 802.11p). Le défi est donc de concevoir des moyens de communications sans fil fiables dans des scénarii présentant de fortes densités.

Parmi les solutions actuellement étudiées, la technologie VLC (*Visible Light Communication*) assure une communication sans fil en utilisant la lumière visible. Mais pour une utilisation plus générale, il faudra prendre en compte l'hétérogénéité des réseaux de communication.

Au niveau réglementaire, deux questions principales se posent pour la voiture autonome : la protection des données des utilisateurs et la législation concentrant les voitures autonomes pour l'expérimentation et à terme, l'utilisation.

La Cnil a déjà adressé, avec le développement des véhicules connectés, un référentiel sectoriel permettant aux constructeurs de se mettre en conformité avec le règlement européen sur la protection des données⁶². Au niveau des zones d'expérimentation et d'usages futurs, une harmonisation au niveau européen⁶³. L'étude d'Atawao Consulting pour la direction générale des entreprises pointe cependant un manque de cadre et d'environnement d'expérimentation à grande échelle.

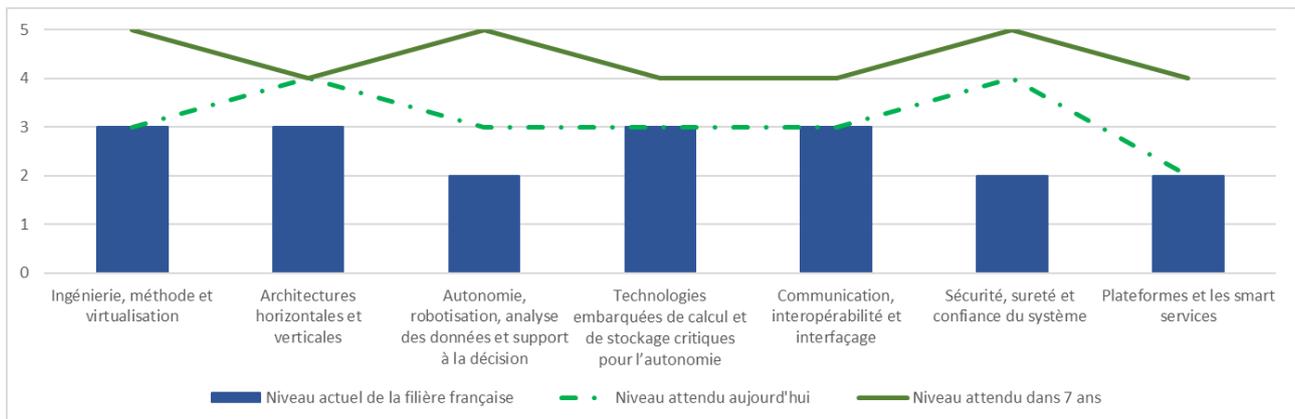
⁶¹ http://www.lembarque.com/des-prototypes-de-voitures-autonomes-embarqueront-des-processeurs-multicoeurs-de-kalray-des-2017-2018_005241

⁶² CNIL, « Véhicules connectés : un pack de conformité pour une utilisation responsable des données », 17 octobre 2017.

⁶³ *Declaration of Amsterdam: Cooperation in the Field of Connected and Automated Driving*, 14-15 avril 2016.

Place des CPS et positionnement de la valeur dans la chaîne

Graphique 6 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'automobile (entretiens Katalyse)



La question des systèmes embarqués dans la filière automobile française n'est pas nouvelle. La capacité à intégrer de nouvelles technologies notamment avec des plateformes technologiques dédiées des ICT pour compléter les compétences de la filière montre l'importance croissante des besoins de solutions techniques.

Cependant, les besoins technologiques vont s'accroître de manière significative dans les prochaines années.

Des premières estimations évoquent un poids des CPS pouvant aller jusqu'à 35 % de la valeur d'une automobile durant nos entretiens. Ceci pousse à un glissement de la valeur ajoutée chez les fournisseurs de rang 2, mais également chez les ESN et chez des nouveaux acteurs gérants des flux d'information notamment les Gafa qui proposent des intégrations de leurs services.

Enfin, on assiste à un déplacement de la valeur apportée par les CPS : le segment des services connectés est le plus important du marché mondial de la mobilité connectée, représentant près de 40 % du marché en 2017. Les deux autres segments, les applications de sécurité et de la conduite autonome, représentaient respectivement 34 et 27 % du marché. Or l'explosion de ces ventes de véhicules connectés et autonomes, et les risques qui en découlent placent la cybersécurité comme un enjeu décisif pour les entreprises du secteur automobile. Plusieurs cas de piratage fortement médiatisés, comme la prise de contrôle à distance d'une Jeep (Fiat Chrysler) par des hackers en 2015, ont déjà secoué l'industrie. En réponse à cet enjeu majeur de sécurité (et d'image pour les constructeurs...), le segment des applications de sécurité constituera la plus grande partie du marché en 2022 : 37 %, devant les applications de conduite autonome (35 %) et le segment des services connectés, relégué en 3^e position avec 28 %⁶⁴.

Structuration spécifique et réponse aux défis

Si les avancées en matière de cybersécurité sont essentielles à la pérennisation du marché, les services représentent quant à eux une nouvelle source de revenus pour l'ensemble des acteurs de l'industrie. Tous les acteurs cherchent à développer des services innovants, qu'ils espèrent monétiser par l'intermédiaire de *business models* plus ou moins novateurs. Des données de maintenance à la gestion de flotte, des habitudes de conduite aux services de covoiturage et autopartage, des services au conducteur jusqu'aux interactions avec l'environnement (parking, commerces...), les possibilités semblent infinies... Espérant capter cette valeur, les deux géants de l'internet, Apple et Google, investissent massivement le monde de l'automobile. Du développement de leur propre système embarqué (Carplay pour Apple et Android Auto pour Google) à la construction de leur véhicule autonome, ils multiplient les investissements et les développements dans des champs d'activité relativement diversifiés. Le marché suscite aussi les convoitises de fabricants de puces comme

⁶⁴ PWC, Véhicules connectés : un marché estimé à près de 156 milliards de dollars dans le monde en 2022, 2017.

Kuantic et Nvidia, d'équipementiers et même d'acteurs des nouvelles technologies comme Samsung⁶⁵.

Face à l'offensive des Gafa et autres nouveaux entrants, les constructeurs et équipementiers automobiles adoptent des stratégies de partenariats ou de prises de participation avec des fournisseurs de technologies, des opérateurs Télécom, des *start-up* ou même des concurrents. Comme en témoigne l'exemple de la PME française Kuantic (CA de 5,6 M€ en 2017, dernière année disponible). En 15 mois à peine, l'entreprise spécialisée dans la télématique a doublé son parc de véhicules connectés, fortement aidé par le déploiement de ses partenariats techniques et commerciaux avec les constructeurs automobiles PSA et Renault. Le chiffre d'affaires du groupe est généré à 90 % par la France. À l'instar du développement de l'activité sur le territoire national, le CA progresse également en Europe (Italie et Espagne, UK et Allemagne, Pologne) et en Amérique Latine, toujours dans le sillage de ses partenaires / donneurs d'ordres clés : des pays où la technologie de Kuantic est intégrée à l'offre B2B de PSA, qui avec son confrère Renault représentent de nouveau environ 90 % des intégrations de boîtiers. En aval, Kuantic a noué des partenariats avec la société lyonnaise Protecfuel (solution connectée de protection de réservoir de carburant) ou encore l'entreprise Continental (quantification de la consommation de carburant entre-deux pleins, détection en temps réel un écoulement rapide du carburant...) pour enrichir son offre de technologies complémentaires.

Ces relations partenariales permettent à chacune des parties prenantes de se focaliser sur son cœur de métier ou sa technologie, permettant d'adresser directement les défis exposés précédemment. C'est donc la carte de la spécialisation qui est jouée, les constructeurs se positionnant comme ensembliers. L'arrivée de nouveaux acteurs sur le marché, plutôt que de faire voler en éclat cette chaîne de valeur partenariale, en a au contraire resserré les liens. Face à l'urgence et la concurrence, certains acteurs ont alors opté pour la croissance externe, en intégrant leur partenaire technologique pour en sécuriser l'activité.

Évolution potentielle du marché à l'horizon 2020-2025

La connexion et la digitalisation des véhicules constituent des leviers de transformation profonds de l'industrie automobile, révélant un potentiel de marché exceptionnel. Avec un taux de croissance annuel de 24,3 %, les ventes de véhicules connectés au niveau mondial devraient passer de 52,5 milliards de dollars à 155,9 milliards de dollars entre 2017 et 2022, soit pratiquement tripler en l'espace de cinq ans⁶⁶. Si la mobilité connectée concerne aujourd'hui encore essentiellement le segment des véhicules haut de gamme ou premium, le marché des véhicules grand public devrait très fortement progresser en l'espace de 5 ans : alors que le segment haut de gamme représentait en 2017 64,6% des ventes de véhicules connectés, soit 33,8 milliards de dollars, la vente de solutions connectées se portera, en 2022, en majorité sur des véhicules grand public (50,1 % soit 78,1 milliards de dollars), démocratisant ainsi leur utilisation.

IDC prévoit que les livraisons mondiales de véhicules connectés comprenant des options de connectivité cellulaire native ou en seconde montent, atteindront 51,1 millions d'unités en 2019, soit une augmentation de 45,4% par rapport à 2018. À l'horizon 2023, IDC s'attend à ce que les livraisons mondiales atteignent 76,3 millions d'unités, soit un taux de croissance annuel moyen de 16,8 % sur cinq ans⁶⁷.

Synthèse

Le secteur automobile est en pleine révolution. Cette nouvelle vague de technologies rebat les cartes pour les années futures pouvant faire vaciller la filière française si celle-ci ne se prépare aux futurs défis technologiques et sociétaux et si elle ne se positionne pas sur des maillons de la chaîne où la valeur se retrouvera. Sans une proposition offensive des constructeurs et des rangs n°1 et 2, il sera difficile à la filière de rivaliser avec les entreprises étrangères.

⁶⁵ Les Echos, Le marché de la voiture connectée, 2017.

⁶⁶ PWC, Véhicules connectés : un marché estimé à près de 156 milliards de dollars dans le monde en 2022, 2017.

⁶⁷ IDC, 76 millions de véhicules connectés d'ici 2023 ?, Mai 2019.

Comme le rappelle l'INRIA⁶⁸, les défis technologiques principaux des CPS sont les suivants :

- les défis en lien avec la navigation autonome ;
- les défis en lien avec l'intégration et la sûreté de fonctionnement ;
- les télécommunications et la cybersécurité des véhicules connectés ;
- le Big data ;
- la simulation ;
- la modélisation des grands systèmes : trafic routier et gestion de flottes ;
- les interfaces Humain-machine.

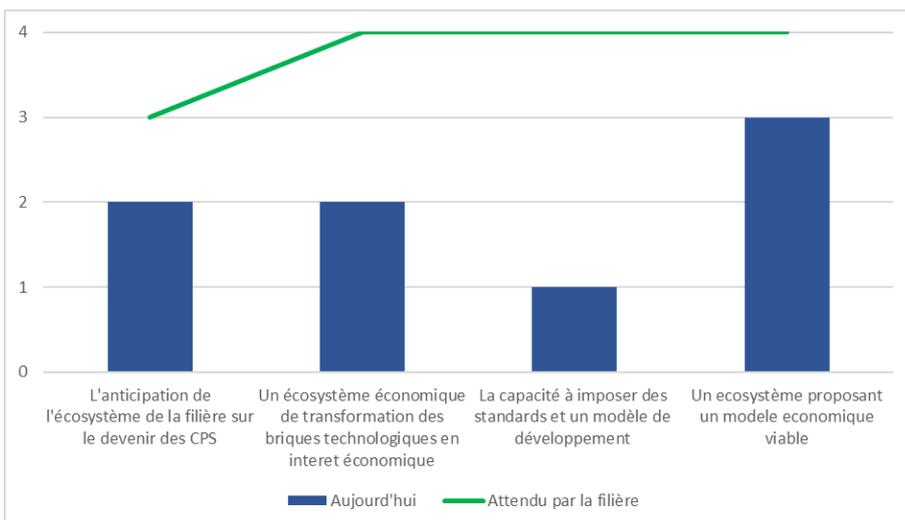
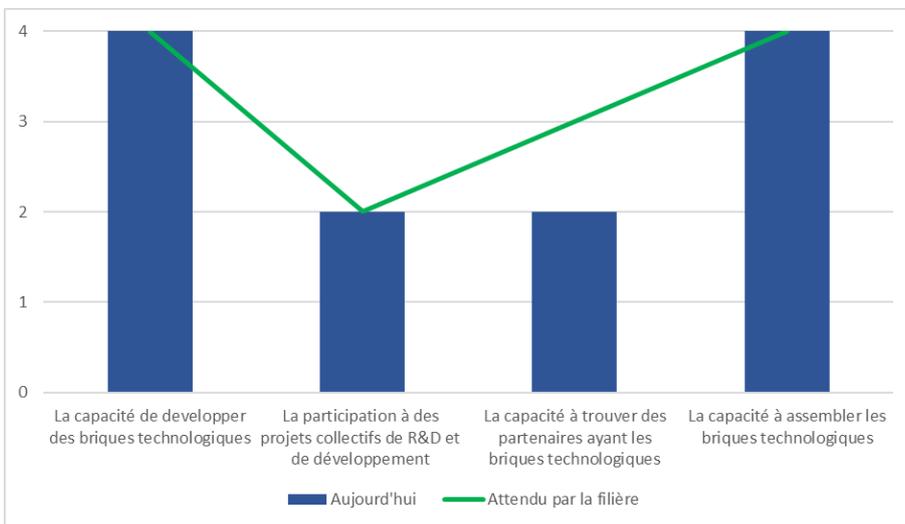
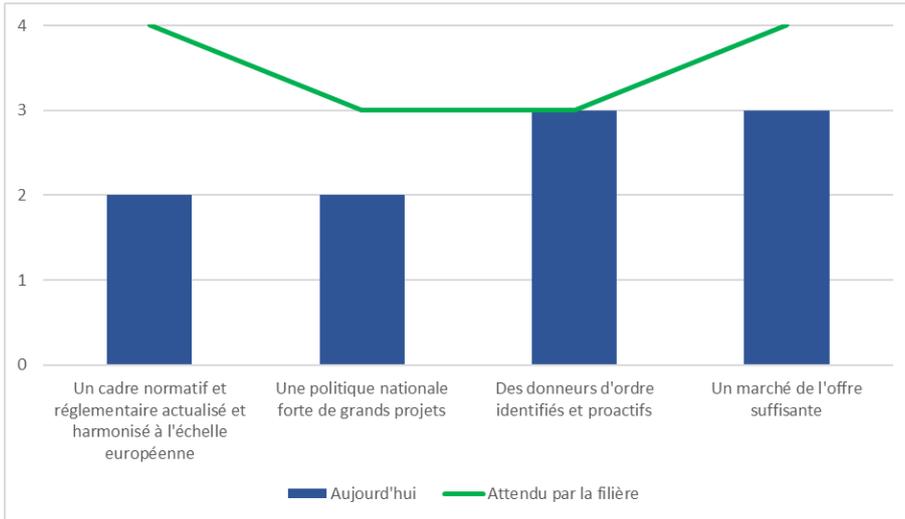
La participation aux cadres normatif et réglementaire apparaît ici comme primordiale pour le développement de la filière française. Aujourd'hui beaucoup d'inconnus sur l'utilisation des technologies bloquent le positionnement de toute la filière. Il est primordial que celle-ci participe notamment aux projets européens d'harmonisation, mais également à définir un cadre pour son développement sur le territoire français.

Constructeurs, équipementiers et entreprises technologiques avancent avec ses propres méthodes et technologies. La difficulté sur ce marché et notamment au niveau de la voiture autonome est le nouveau point de vue à adopter : ce ne sont pas des technologies, mais des fonctionnalités qui doivent être standardisées. Le comportement est le point crucial. Il s'agit principalement de fonctionnalités de sécurité non-concurrentielles comme le freinage d'urgence. Aujourd'hui, le freinage d'urgence fonctionne de manière totalement différente selon les véhicules autonomes. Il n'existe pas de standard sur la manière de détecter puis qualifier le danger, ni de règle disant quelle puissance mettre dans le freinage en fonction de la distance avec l'obstacle. La question de l'homologation est longue et complexe lorsque les CPS sont intégrés dans le réseau automobile. Quand pour les véhicules traditionnels, l'homologation s'attache à des aspects techniques individuels, comme la direction ou le freinage. La voiture autonome nécessite une approche globale : il faut observer l'interaction entre la direction, le freinage, les mécanismes de sécurité dans l'architecture électronique et les communications avec le conducteur. De plus, les normes traditionnelles de sûreté s'assurent que tout est fait pour pallier une défaillance fonctionnelle du véhicule. Cependant pour un véhicule autonome, il faut réfléchir aux cas où la voiture fera une erreur d'interprétation. Ces problématiques font l'objet de discussions à l'organisme de standardisation international ISO, notamment pour les véhicules autonomes commerciaux de niveau 3 conduite autonome, attention du conducteur maintenu sur la route, dont les réflexions doivent aboutir pour 2020. Cependant, les marchés de la Chine et des États-Unis n'ont pas signé la convention de Vienne définissant les grandes règles internationales de l'automobile. Comme dans l'automobile traditionnelle, les constructeurs se préparent donc à devoir suivre plusieurs standards, selon les marchés sur lesquels ils opèrent.

Cependant, la transformation des briques technologiques en intérêt économique et la capacité à imposer des standards de développement devront être les priorités de la feuille de route pour les années futures.

⁶⁸ INRIA, livre blanc sur les véhicules autonomes et connectés, 2018.

Graphique 7 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière automobile



Points clés à retenir de l'analyse des filières :

Sur le sujet de la production intégrant des CPS

L'Europe représente plus du tiers des investissements mondiaux dans l'industrie du futur et les CPS sont une carte à jouer pour le développement de l'industrie française dans la compétition mondiale sur trois domaines :

- processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement et des entrepôts - suivi en temps réel de la demande, du traitement des commandes, du flux de fabrication, des retours, etc. ;
- lignes de production - contrôle en temps réel des performances, de la durabilité, diminution des besoins énergétiques et de la sécurité des produits ;
- maintenance prédictive - la surveillance en temps réel des dispositifs de fabrication industrielle permettant aux entreprises de prévoir à quel moment la maintenance est nécessaire.

Concernant les questions de l'intégration des CPS dans la production, il est bon de constater les points suivants :

- l'intégration des CPS dans l'industrie manufacturière demande à intégrer tous les principes de l'industrie du futur. C'est une réelle chance pour la filière des fabrications de machines, mais également pour la totalité des secteurs de production.
- les systèmes présentent des préoccupations majeures liées à la sécurité, la sûreté et la confidentialité. De plus, il est attendu une plus grande confiance dans les solutions dans le nuage.
- les environnements collaboratifs entre les acteurs et les solutions proposées doivent s'appuyer sur des lieux d'échange et d'interaction (notamment les projets collaboratifs). Il est obligatoire d'impliquer plus largement les PME dans la chaîne de valeur même si cela apparaît comme difficile.
- le développement de cadres communs et de standards permettra une meilleure pénétration des CPS dans des environnements industriels. Il devra exister des normes relatives aux systèmes, plateformes, protocoles, connexions et interfaces. Il est nécessaire de créer un cadre légal qui protégera les entreprises et permettra de promouvoir l'usage des CPS. Aujourd'hui, les démarches de normalisation sont menées par des consortiums industriels où les acteurs les plus avancés font adopter leurs solutions.
- l'innovation et l'entrepreneuriat devront être favorisés dans un domaine relativement conservateur sur les nouveaux modèles économiques.

Les CPS dans le bâtiment

Le segment des CPS dans le BTP est une formidable opportunité pour augmenter les fonctionnalités des bâtiments (sécurité, maintien à domicile des seniors, bien-être). Le déploiement des CPS va amener la modernisation dans de nombreux aspects des bâtiments notamment dans la recherche d'efficacité et de consommation des ressources. La démocratisation de ces CPS va permettre à de nombreux citoyens d'avoir accès à des services qui n'étaient pour l'instant proposés qu'à une minorité de bâtiments.

Cependant, l'intégration des CPS est un véritable challenge : les solutions proposées ne doivent pas seulement proposer de nouvelles technologies et leurs interopérabilités entre elles, mais également développer l'interaction avec des éléments non technologiques. La clé du succès est l'int

De plus, la collaboration des plateformes horizontales et verticales est critique. Les plateformes ouvertes et les standards doivent être adoptés pour permettre le développement des services proposés et la création de nouveaux modèles économiques. Cependant, même s'il existe de nombreux leaders de la construction et de l'lot qui s'intéressent au sujet, il est important de souligner que l'écosystème des CPS spécifiques au domaine est encore fragmenté. Les acteurs traditionnels du BTP s'entourent de *start-up* innovantes (Vesta System, Smart Impulse, Igenko...) pour s'implanter

au plus vite dans ce nouveau marché et de nombreuses *start-up* émergent dans cette filière et doivent s'articuler avec les acteurs déjà en place.

Ce maillage entre les entreprises de solutions et les entreprises du marché ne peut se développer durablement que si le marché continue à se développer et que la volonté politique d'améliorer la qualité de vie et de diminuer l'impact énergétique continue. Une stratégie d'approche globale du *smart building* s'impose, loin des logiques de silos actuelles qui pèsent sur la rentabilité et la performance des projets. Pour ce faire, les acteurs du bâtiment ont su développer sur d'autres sujets une culture de la norme qui peut permettre d'aider les acteurs CPS à développer des innovations dans un champ arrêté et où les inconnues des besoins de la filière sont limitées.

L'intégration des CPS dans la filière de l'automobile :

Le secteur automobile est en pleine révolution. Cette nouvelle vague de technologies rebat les cartes pour les années futures pouvant faire vaciller la filière française si celle-ci ne se prépare aux futurs défis technologiques et sociétaux et à se positionner sur des maillons de la chaîne où la valeur se retrouve. Sans une proposition offensive des constructeurs et des rangs n°1 et 2, il sera difficile à la filière de rivaliser avec les entreprises étrangères.

De nombreuses technologies existent et sont prêtes à être déployées, mais il est nécessaire de créer des cadres légal et sociétal qui peuvent aider à intégrer ses innovations. Aujourd'hui beaucoup d'inconnus sur l'utilisation des technologies bloquent le positionnement de toute la filière. De plus, les exigences non technologiques sont des facteurs clés d'intégration dans les transports intelligents la régulation, les lois devront répondre à de nombreuses questions dans ce domaine en complément des standards technologiques.

La participation des entreprises françaises aux projets européens d'harmonisation mais également à définir un cadre pour son développement sur le territoire français est primordiale. Cependant, seulement quelques entreprises participent du fait d'un coût de présence important (nombreuses réunions, coût de la veille et déplacement d'experts). Beaucoup d'entreprises de la filière française n'ont pas de moyens dédiés pour un lobbying de ce type. Cela fragilise la position de la France sur ces actions de défense des intérêts nationaux et limite les interactions entre les acteurs de la filière.

Cependant, la transformation des briques technologiques (précision des capteurs, intégration de l'IA, briques open sources génériques non efficaces en l'état, sécurisation des données dans le *cloud*, gestion des ressources énergétiques et gestion des données personnelles...) en intérêt économique et la capacité à imposer des standards de développement devront être les priorités de la feuille de route pour les années futures.

INITIATIVES INTERNATIONALES

Le développement des CPS en Allemagne

Les facteurs clés de succès

L'Allemagne est depuis longtemps l'un des principaux innovateurs mondiaux en matière d'industrie manufacturière. Aussi, l'Allemagne est à la pointe de l'Industrie du futur, qu'elle considère basée sur les CPS et comme étant la quatrième révolution industrielle, d'où l'appellation « Industrie du futur ».

La vision de l'industrie du futur a été rendue possible par plusieurs institutions en Allemagne. Parmi ces institutions, nous pouvons compter l'« Industry-Science Research Alliance » (composée de 19 représentants des secteurs scientifiques et industriels, organisés en groupe consultatif, pour former le groupe de travail Industrie du futur). L'institution « Acatech – National Academy of Science and Engineering » (une organisation à but non lucratif qui encourage l'innovation à travers des avancées technologiques. L'institution soutient également les décideurs et la société par le biais d'évaluations et de recommandations). L'institution « German Research Center for Artificial Intelligence – DFKI ». Le réseau d'entreprises « It's Owl » qui regroupe environ 200 entreprises, instituts de recherche et organisations afin de développer des solutions pour la transformation numérique des PME avec un budget de 200 millions d'euros à horizon 2022. Et pour finir, l'institut « Fraunhofer-Gesellschaft » sur lequel nous allons faire un focus.

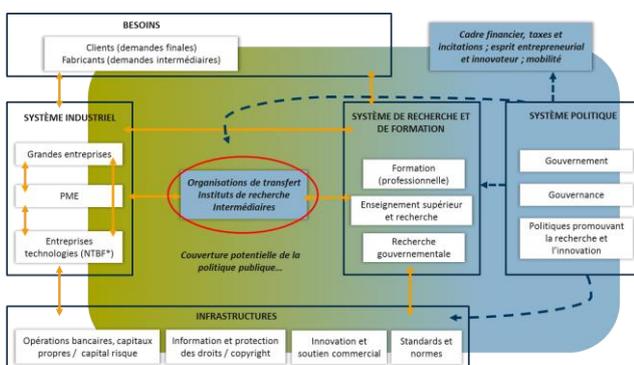
Le Fraunhofer et le transfert technologique

Créé en 1949 l'institut Fraunhofer, spécialisé dans la recherche en sciences appliquées est considéré comme l'un des principaux contributeurs au développement de l'Industrie du futur en Allemagne.

L'institut regroupe 72 instituts de recherche répartis sur 40 sites à travers l'Allemagne. Ces centres ont pour mission la recherche appliquée et pour clients principaux les entreprises d'une région. L'idée est d'appliquer la recherche fondamentale produite par les universités et les autres instituts de recherche à des innovations adaptées au marché. Chaque institut est spécialisé dans un domaine de recherche particulier. Le Fraunhofer emploie au total 26600 personnes, ce qui en fait l'un des principaux organismes de recherche au niveau international.

Sur les 2,6 milliards d'euros de budget au total⁶⁹, le financement de l'institut est assuré au tiers par l'État (le gouvernement fédéral et les Länder possèdent l'organisme) et les deux tiers restants du budget proviennent de contrats de recherches passés avec des industriels. Aussi, le Fraunhofer est tout d'abord un exemple de réussite en ce qui concerne les « partenariats » publics/privés.

Figure 31 – modélisation du système de recherche et d'innovations



Source : Stefan Kuhlmann, Acatech (2015)

⁶⁹ <https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure/facts-and-figures.html>

Ainsi, suivant le modèle (présenté ci-dessus) de la recherche et de l'innovation développé par Stefan Kuhmann (chercheur impliqué au Fraunhofer et spécialisé sur le rapport entre l'innovation technologique et les politiques publiques), nous pouvons constater la place primordiale qu'occupent les instituts de recherche. En effet, les instituts de recherche, en relation avec le système politique (gouvernement, politique de recherche et de promotion de la technologie...), le système de recherches (recherches académiques, recherches gouvernementales...) et le système industriel (grandes entreprises, PME, jeunes entreprises technologiques...) sont au centre du système d'innovation industriel et représente un liant parfait pour les trois systèmes.

De plus, l'institut travaille en étroite collaboration avec et pour les entreprises. Ces entreprises sont majoritairement des PME installées dans le secteur industriel, mais les grandes entreprises, qui possèdent leur propre secteur de R & D font aussi appel aux instituts Fraunhofer. Une entreprise voulant développer une technologie pour ses produits et n'ayant pas les moyens ou les connaissances pour le développer va par exemple faire appel aux instituts Fraunhofer sur un projet concret. Il arrive également qu'un des instituts mette lui-même au point une nouvelle technologie qui pourra ensuite être développée, mais ces cas semblent plus rares. Une liste non-exhaustive des projets menés par le Fraunhofer est disponible dans les rapports annuels publiés par l'institut.

Ainsi, le Fraunhofer, en contact direct avec l'État, les chercheurs et les entreprises, est un parfait catalyseur pour l'innovation dans l'industrie allemande et le transfert de technologie.

Par exemple, l'Allemagne est en pointe sur les voitures autonomes avec des compétences importantes à l'université de Braunschweig, au *Karlsruhe Institute of Technology* ou à l'université de Berlin (AutoNOMOS Labs) ou encore au DFKI (Centre de recherche allemand sur l'intelligence artificielle). Ce pays se distingue surtout par un effort coordonné entre les pouvoirs publics, les industriels et la recherche académique.

L'institut Fraunhofer remplit pleinement ce rôle de liant entre l'État, les chercheurs et les entreprises du fait de son financement tout d'abord. En effet, comme notifié plus haut, l'institut est financé à 1/3 par l'État et à 2/3 par les entreprises industrielles.

Il est à noter que le Fraunhofer possède aussi 8 huit instituts à l'étranger (considérés comme des filiales). Aux États-Unis, en Autriche, en Italie, en Grande-Bretagne, au Portugal, en Suède, en Chili et à Singapour, mais aucun en France.

Le Fraunhofer porte un intérêt tout particulier au CPS et notamment dans les domaines suivants⁷⁰ :

- L'industrie du futur : En effet, en raison de la demande accrue de la production industrielle, le Fraunhofer considère que de plus en plus de CPS seront utilisés dans ce secteur. Cela, dans le but d'optimiser les processus de production internes, mieux gérer et surveiller les machines et les outils, rendre la coopération interentreprises plus simple. Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer seraient l'automatisation en conditions difficiles, le suivi des marchandises dans le processus de production, la maintenance prédictive...
- Les Smart grids : Selon le Fraunhofer, les CPS pourraient permettre un approvisionnement stable en énergie du réseau en créant le meilleur équilibre possible entre l'offre et la demande à travers une gestion complète des informations (données d'alimentation et de consommation enregistrées en continu). Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer seraient le contrôle du réseau de distribution, contrôle de la production et de la consommation, l'enregistrement des valeurs de consommation...
- La mobilité : Selon le Fraunhofer, dans le domaine de la mobilité, le but principal des CPS est de créer des nouvelles possibilités pour éviter les accidents. Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer seraient le contrôle des véhicules dans l'agriculture et dans la construction, la création de systèmes d'assistance à la conduite, la sécurisation du trafic.
- L'e-santé - Selon le Fraunhofer, dans l'E-santé, les CPS pourront contribuer dans le futur à assurer des soins médicaux complets et optimiser les processus dans les cliniques. De plus, les CPS pourraient aider au soutien des personnes âgées afin de prolonger leur indépendance. Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer

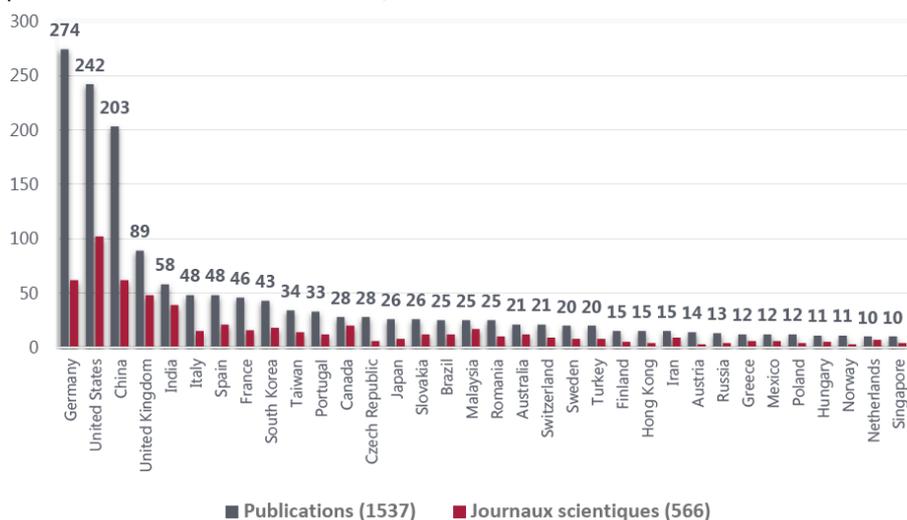
⁷⁰ https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/doc/lv/CPS_NOP_Broschuere.pdf

seraient le suivi et la surveillance des dispositifs médicaux, améliorer les systèmes d'appel d'urgence, l'assistance à la vie autonome.

- **La logistique-** Selon le Fraunhofer, la poursuite constante de la sécurisation des marchandises facilitera le développement des CPS dans la logistique et considère qu'à l'avenir, les chaînes d'approvisionnement deviendront plus transparentes, plus sûres et plus efficaces notamment par l'automatisation des données. Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer seraient la surveillance des conteneurs, le suivi de l'envoi, la surveillance de l'intégrité des chaînes d'approvisionnement.
- **Le sport-** Selon le Fraunhofer, les CPS peuvent fournir des informations innovantes aux athlètes, aux entraîneurs, aux médias et aux spectateurs dans le domaine du fitness et du sport. Les données de formation ou de jeu pertinentes pourraient être automatisées, enregistrées et évaluées spécifiquement. Les applications typiques selon le Fraunhofer et sur lesquels l'institut semble se concentrer seraient l'analyse d'informations en temps réel, l'aide à la prise de décision.

Tous ses efforts ont permis au monde universitaire allemand de se positionner comme leader dans les recherches d'excellence et opérationnelle. Une étude menée par le Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (Cefrio)⁷¹ propose une distribution par pays des publications répertoriées de 2006 à 2015. On note l'importance de l'effort allemand, qui exprime le *leadership* de ce pays pour la thématique de l'Industrie du futur, accompagné par les États-Unis et la Chine.

Répartition des publications entre 2006 et 2015 sur la question de l'Industrie du futur (Total : 1537 publications dans 566 revues)



Source : CEFRIO, 2017

La stratégie gouvernementale

Au départ, l'Industrie 4.0 peut être comprise comme une ambition purement technologique : produire de petites séries à des coûts comparables à ceux de la production de masse en introduisant des systèmes de production cyberphysiques dans l'usine. Dans les faits, il s'agit d'une stratégie de défense du leadership industriel allemand, doublée d'une stratégie de conquête de nouveaux marchés.

L'intérêt de la désintermédiation introduite par l'Industrie 4.0 est d'intervenir dans des interstices de la chaîne de valeur, où sont logées des rentes de situation à faible valeur ajoutée. Elle y substitue des algorithmes qui vont directement mettre en contact une offre et une demande potentielle – *via* l'exploitation des données d'usage.

Les industriels allemands ont craint qu'à l'aune d'autres secteurs (comme l'édition ou l'hôtellerie), les géants de l'internet n'imposent une relation exclusive avec les clients finaux au détriment des

⁷¹ CEFRIO, PME2.0, le passage au numérique.

industriels B2C (*business to customer*) et B2B (*business to business*). Il faut rappeler que la majorité des données produites dans le monde sont dans les entreprises notamment industrielles, mais qu'elles sont peu exploitées. Ce mouvement d'intermédiation est déjà en cours dans le secteur de la maintenance industrielle, où des opérateurs de plateformes numériques cherchent à capter la relation entre les fabricants d'équipements et leurs clients.

Le plan *High Tech Strategy* du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche a été publié en 2006 en tant que stratégie nationale visant à soutenir l'innovation dans divers domaines technologiques. Ses trois objectifs principaux sont les suivants : l'établissement de priorités et la création de marchés de premier plan dans les domaines technologiques importants pour l'Allemagne, la promotion de l'innovation par le développement de liens plus étroits entre les entreprises et la communauté scientifique et pour finir, l'amélioration des conditions d'innovation dans l'industrie.

La stratégie révisée publiée en 2010 est connue sous le nom de *High Tech Strategy 2020*. Il identifie cinq domaines prioritaires (climat et énergie, santé et nutrition, mobilité, sécurité et communication) ainsi que 17 domaines d'innovation pour atteindre les trois objectifs. Celles-ci sont réparties dans les thèmes suivants : Santé et sécurité (technologies médicales, technologies de la sûreté, usines, technologies énergétiques, technologies environnementales) Communication et mobilité (TIC, Technologies automobiles, aéronautiques, spatiales, maritimes, services) et Technologies transversales (Nanotechnologies, Biotechnologies, Technologies des microsystèmes, Technologies optiques, Technologies des matériaux, Technologies de production).⁷²

Afin de réaliser le deuxième objectif du plan qui est de promouvoir un environnement propice à l'innovation en favorisant des liens plus étroits entre les milieux d'affaires et les communautés scientifiques, des concours ont été lancés dans les institutions de l'enseignement supérieur pour favoriser la collaboration entre l'industrie et la science. En outre, il existe divers programmes spéciaux d'aide à l'innovation pour les PME, comme le Central Innovation Program SME et le KMU innovativ (PME innovante).

Le troisième objectif du plan, qui consiste à améliorer les conditions de l'innovation dans l'industrie, est poursuivi à travers un financement accru de l'innovation, des conditions de développement plus favorables pour les *start-up*, une meilleure protection de la propriété intellectuelle et des améliorations dans l'enseignement supérieur.

Bien que les systèmes embarqués et les systèmes cyberphysiques ne fassent pas partie en soit des domaines d'innovation du plan *High Tech Strategy*, ils jouent néanmoins un rôle clé dans les 17 domaines d'innovation identifiés. C'est le cas, par exemple, du programme ICT 2020 – Research for Innovation du ministère de l'Éducation et de la Recherche. Ce programme, axé sur la mise en œuvre de la stratégie de haute technologie dans le domaine de la recherche sur les TIC, vise les objectifs suivants : consolider et développer le leadership de l'Allemagne dans le domaine des TIC, renforcer sa compétitivité dans les domaines de la recherche et de la fabrication et faire de l'Allemagne un lieu de travail plus attractif et faciliter l'accès au savoir-faire technologique des petites et moyennes entreprises.

De plus, un certain nombre d'alliances d'innovation entre représentants de la science et de l'industrie sont forgées à travers ICT 2020, notamment la plateforme logicielle *Embedded Systems 2020*. Il s'agit d'initiatives dites de coopération verticale axées sur les domaines d'application dans les 17 différents domaines afin d'accélérer le rythme de l'innovation technologique. En même temps, des initiatives de coopération horizontale sont également mises en œuvre sous la forme d'alliances technologiques dans le cadre desquelles les scientifiques et l'industrie coopèrent dans la poursuite d'objectifs technologiques.

⁷² *Living in a networked world : integrated research agenda Cyber-Physical Systems* par Acatech (2015) p.203

Conclusion

L'Allemagne, l'un des leaders historiques de l'Industrie du futur en Europe souhaite conserver sa place par la mise en œuvre d'un cadre permettant le transfert technologique le plus efficace possible et d'intégrer ainsi au mieux les innovations scientifiques dans l'économie réelle, notamment pour garder une place qu'elle trouve s'affaiblir sur les processus industriels du fait des possibilités grandissantes de l'intermédiation qui ouvre de nouveaux modèles économiques. L'exemple allemand a l'intérêt de montrer que la transformation numérique ne consiste pas en des opérations d'innovation incrémentale sur l'outil de production, mais bien de l'innovation radicale. C'est la structure du système, à savoir l'architecture de sa chaîne de valeur et son business model qui sont questionnés.

Contrairement à l'Allemagne, la France doit faire face à une industrie affaiblie qui, si elle ne fait rien, sera en véritable danger dans les années futures, Le projet industrie du futur doit donc être plus large que le projet allemand et intégrer les CPS comme carte supplémentaire à la différenciation de notre économie.

Pour entreprendre la quatrième révolution industrielle, les entreprises, qu'elles soient allemandes ou françaises devront, non seulement s'inspirer les unes des autres, mais aussi coopérer. Notamment pour établir des standards de communication communs et pour instaurer un système européen de sécurisation des données. Malgré leurs différences, France et Allemagne ont bien compris leur intérêt à coopérer sur la transformation numérique de l'économie, en particulier à l'échelon européen, en renforçant l'axe franco-allemand. Sur le plan bilatéral, les deux conférences numériques franco-allemandes en 2015 et 2016 ont envoyé des signaux positifs à l'ensemble des partenaires. Il est de l'intérêt de la France de continuer les relations avec l'Allemagne pour porter des préoccupations communes, identifier des complémentarités, et s'inspirer l'une de l'autre par échange de bonnes pratiques.

Parmi les principaux sujets d'intérêt commun, on notera la standardisation et les normes, la capacité à entraîner dans le mouvement le tissu de PMI et ETI (ou le Mittelstand en Allemagne), et l'adaptation des compétences et des formations. La question des PMI et ETI doit trouver des solutions rapidement notamment du fait de la passivité d'un grand nombre d'entre elles dans les deux pays sur le sujet de l'intégration des CPS.

La norme est un outil stratégique habituel de l'industrie allemande. La conception allemande de l'Industrie 4.0, basée sur l'interopérabilité de systèmes ouverts devant communiquer entre eux, explique pourquoi la standardisation revêt dans ce cas un enjeu encore plus stratégique. Celui qui imposera les standards puis la normalisation internationale des communications entre machines dominera le marché. Il y a donc une course aux standards, en particulier vis-à-vis des Américains. C'est dans ce cadre que l'Alliance Industrie du futur a fait le choix d'une stratégie partagée avec l'Allemagne pour aboutir à une architecture de référence commune et peser ainsi plus efficacement dans les instances de standardisation.

Le développement des CPS en Chine

Les facteurs clés de succès

L'investissement public

Le 8 Mai 2015, la Chine propose un plan en trois étapes de 10 ans chacune pour passer d'une économie de rattrapage à une économie de l'innovation. La première étape de ce plan est le plan Made in China 2025 (**MIC 2025**). Plan qui vise à transformer l'économie du pays pour lui permettre une production de haute technologie et surtout de développer ses capacités d'innovation. Les objectifs principaux sont d'avoir une production de meilleure qualité, être dans une logique de développement vert, améliorer les infrastructures et mettre en avant le capital humain pour au final trouver les nouvelles voies de l'industrialisation chinoise.

Le plan MIC 2025 se concentre principalement sur 10 secteurs clés (les nouvelles technologies de l'information, les outils de contrôle numérique, l'aérospatial, les bateaux high-techs, le matériel ferroviaire, l'économie d'énergie, les nouveaux matériaux, les équipements médicaux, les machines agricoles et l'équipement énergétique).⁷³ Le focus est fait sur la qualité, l'investissement est axé sur l'innovation technologique et l'industrie du futur dans des domaines tels que la *machine learning*, où la technologie est difficile à copier. Le but étant de combiner l'internet avec des capteurs sans fil et de la robotique pour améliorer l'efficacité de la production, la qualité et la productivité. En cas de succès, la Chine se repositionnerait de fabricant à bas coût à concurrent direct des nations comme la Corée du Sud, le Japon ou l'Allemagne.

Ainsi, le tableau suivant présente une liste non-exhaustive des différentes sources de financement public qui fournissent des capitaux aux entreprises chinoises de haute technologie pour intensifier l'activité locale, investir dans la haute technologie et acquérir une technologie étrangère par des opérations de fusion-acquisition afin d'atteindre les objectifs du MIC 2025 et des politiques industrielles connexes. Les fonds dédiés représentent plus de 520 milliards de dollars.

Tableau 3 – Sources des financements publics MIC 2025

Source de Financement	Financement total estimé (en milliards de dollars)	Objectif / Champ d'intervention
Special Constructive Fund	270	Financement de projets relatifs au MIC 2025
Shaanxi MIC2025 Fund	117	Apports financiers pour une centaine de projets relatifs au MIC 2025
MIIT et China Development Bank	45	Prêts directs pour supporter les projets majeurs du MIC 2025
Gansu Made in China 2025 Fund	37	Apports financiers pour plus de 600 projets
National Integrated Circuit Fund	31	Financement d'acquisitions dans le secteur des semi-conducteurs
State Development & Investment Corporation Advanced Manufacturing Fund	6	Financement d'opérations liées à l'IA et à la robotique
Anhui Manufacturing Development Fund	4,36	Financement pour le développement industriel d'Anhui

⁷³ *Made in China 2025* par Institute for Security & Development Policy.

Beijing Technology Innovation Fund	3,17	Financement pour la technologie optoélectronique, le <i>Big data</i> , les énergies vertes, l'IA, l'industrie du futur, les technologies de l'information, l'informatique quantique
Advanced Manufacturing Fund	3	Promouvoir la modernisation d'industries anciennes
Emerging Industries Investment Fund	2,28	Prêts pour supporter le développement des produits de l'industrie high-tech
Nanjing Economic and Technological Development Zone	1,3	Financement pour la création d'une base industrielle nationale d'intelligence artificielle
Major Technologie Equipment Insurance Compensation System	Non trouvable	Prêts pour supporter le développement des produits de l'industrie high-tech
Sichuan Made in China 2025 and Innovation-Driven Project Guding Fund	Non trouvable	Financement pour la R&D dans différents secteurs

Source : *Center for International Governance Innovation (CIGI)*⁷⁴

La volonté de réduire la dépendance internationale

La Chine cherche à mettre fin à sa dépendance vis-à-vis de la communauté internationale au niveau technologique et améliorer sa capacité industrielle et sa fabrication intelligente en s'appuyant sur l'innovation et la qualité des produits.

En ce sens, la Chine souhaite développer la notoriété de ses entreprises en mettant l'accent sur la marque.

Réduire le recours aux technologies étrangères implique cependant de créer et de développer des entreprises qui peuvent innover par la recherche et le développement, dominer le marché intérieur et produire des exportations compétitives.

Alors que la Chine cherche à progresser dans la chaîne de création de valeur, elle considère également que le programme MIC 2025 est une occasion parfaite de s'intégrer au secteur manufacturier mondial et coopérer plus efficacement avec les économies industrialisées. Même si les objectifs clés ne sont pas atteints, l'initiative améliorera le potentiel de « Gouvernance économique globale » de la Chine et renforcera ses secteurs économiques.

Pour atteindre les objectifs fixés par le plan MIC 2025, Pékin met en œuvre des modifications réglementaires et introduit des nouvelles normes pour les industries clés tout en établissant une orientation politique pour poursuivre l'innovation et le développement. Ces normes peuvent potentiellement restreindre la concurrence étrangère en Chine et donner accès à la technologie venant de l'étranger, en obligeant les banques à révéler leur code source ou utiliser des adresses IP domestiques pour respecter ces normes « sécurisées et contrôlables » par exemple. La normalisation des pratiques dans des secteurs entiers est une priorité, avec la mise en place de « la stratégie nationale de cybersécurité » et de « la Loi sur la cybersécurité ». Les systèmes de test et de certification doivent être introduits pour élever la qualité des produits afin répondre aux critères internationaux dans toutes les industries clés, des brevets médicaux à la consommation de carburant.

Le gouvernement central, les gouvernements provinciaux et les entités d'État coopèrent pour mettre en œuvre des politiques d'offre visant à permettre aux entreprises de mieux développer leurs

⁷⁴ Made in China 2025 as a Challenge in Global Trade Governance par Centre for International Governance Innovation.

processus de fabrication. Cela comprend la création de 40 centres d'innovation nationaux et de 48 centres d'innovation provinciaux à horizon 2025 pour faciliter les partenariats et les innovations.

Cependant, le levier le plus important est financier pour les initiatives clés. On retrouve notamment un « fonds semi-conducteur » pour Xiaomi dédié à permettre à l'entreprise de développer le premier processeur pour smartphone de la compagnie. Avec sa propre puce, Xiaomi espère réduire sa dépendance à l'égard des fournisseurs de puces comme Qualcomm et MediaTek et se différencier des autres smartphones Android. Le gouvernement chinois a fourni une somme d'argent non divulguée à Xiaomi pour la réalisation de ce projet coûteux. Cet effort était soutenu par un fonds de développement de puces créé par le district de haute technologie de Zhongguancun à Pékin, ainsi que par le ministère de la Technologie du pays et le gouvernement municipal de Pékin. Le développement de la puce Xiaomi a débuté en 2014 sous la direction de Pinecone, une filiale de Xiaomi et l'entreprise a déclaré qu'il avait fallu 28 mois au groupe pour préparer la puce.

Réduire la dépendance aux puces construites en dehors de la Chine est désormais une priorité absolue pour le gouvernement chinois. La Chine est le plus gros acheteur de puces (elle importe environ 200 milliards de dollars de puces par an).⁷⁵ La Chine s'est engagée à investir 100 milliards de dollars pour développer une industrie des puces développée dans le pays.

En plus de fournir aux acteurs nationaux des fonds pour soutenir le processus de développement coûteux des puces, la Chine tente également d'acheter des lecteurs de puces étrangers. Tsinghua Holdings, contrôlée par le gouvernement, a par exemple tenté à plusieurs reprises d'acquérir des fabricants de puces aux États-Unis. Alors que Tsinghua avait fait une offre infructueuse de 23 milliards de dollars sur le fabricant de puces de mémoire Micron Technology en 2015, la société a acquis une participation de 15 % dans le fabricant de disques durs Western Digital pour 3,78 milliards de dollars en 2015 et une participation de 6 % dans le fabricant de puces programmables Lattice Semiconductor pour 41,6 millions de dollars en 2016.

De plus, les banques ont naturellement un traitement préférentiel pour les entreprises chinoises. Les banques d'État donnent des prêts à faible taux d'intérêt, en particulier pour les petites et moyennes entreprises. Divers agences et fonds offrent également des services financiers directs. Par exemple, 3 milliards de dollars sont disponibles à l'Advanced Manufacturing Fund pour la mise à niveau technologique dans des industries clés. Fait important, le financement est lié à l'utilisation de la propriété intellectuelle nationale pour pousser les entreprises à remplacer la propriété intellectuelle étrangère.

Sur le tableau qui suit, il est indiqué les objectifs à atteindre en termes d'indicateurs clés de performances par les entreprises à horizon 2025 et pour atteindre les objectifs du plan MIC 2025.

Tableau 4 – Objectifs d'évolution des indicateurs clés de performance liés à la transformation industrielle

Catégories	KPI liés à la transformation manufacturière	2015	2025
Capacité d'innovation	1. Coût de R&D / recettes / (%)	0,95	1,68
	2. Brevets / milliards de RMB de recettes (#)	0,44	1,10
Qualité et valeur	3. Compétitivité des procédés de fabrication (indice)	83,5	85,5
	4. Augmentation de la valeur ajoutée manufacturière depuis 2015 (%)	-	4
	5. Croissance annuelle moyenne de la productivité du travail (%)	-	6,5
IT et intégration industrielle	6. Pénétration du haut débit (%)	50	82
	7. R&D de conception et pénétration des outils de conception (%)	58	84
	8. Taux de contrôle des procédés clés (%)	33	64
Industrie verte	9. Diminution de l'énergie depuis 2015 / valeur ajoutée industrielle (%)	-	34
	10. Diminution du CO ² depuis 2015 / valeur ajoutée industrielle (%)	-	40

⁷⁵ <https://www.forbes.com/sites/aarontilley/2017/02/28/xiaomi-follows-in-footsteps-of-apple-and-samsung-with-its-own-smartphone-chip/#7813866b40ca>

11. Diminution de l'utilisation de l'eau depuis 2015 / valeur ajoutée industrielle (%)	-	41
12. Taux d'utilisation des déchets solides industriels (%)	65	79

Conclusion

À travers un plan industriel ambitieux, la Chine souhaite moderniser son industrie en passant d'une économie de rattrapage à une économie industrielle innovante. En plus de cette montée en gamme industrielle, la Chine souhaite développer l'IA pour l'appliquer bien sûr à l'industrie, mais aussi à l'e-santé, au maintien de l'ordre public, à la protection de l'environnement et à la défense.

La Chine est l'exemple d'un pays qui avance très vite sur les différents sujets des CPS. C'est le cas pour l'automobile où il existe une volonté affirmée de déboucher à relativement court terme sur des véhicules autonomes en milieu urbain. Les universités chinoises, comme la Shanghai Jiao Tong University (SJTU), la Tongji University (Shanghai), la Tsinghua University ou encore la Jilin University sont des exemples en termes de réactivité notamment.

Les écosystèmes sur les différents domaines sont portés par les grandes entreprises des secteurs respectifs. C'est le cas pour la voiture autonome où Baidu qui joue un rôle moteur : spécialiste d'intelligence artificielle, il collabore avec les constructeurs chinois JAC, BAIC et Chery pour lancer des véhicules semi-autonomes d'ici à 2020, et avec King Long pour un minibus automatisé. Baidu, qui a établi un fonds de 1,3 milliard d'euros consacré à la conduite autonome, gère la plateforme Apollo où il partage ses technologies avec *start-up* et constructeurs.

La notion de « Temps » est particulière en Chine. Les décisions sont rapides, tout comme leur exécution. La société change radicalement et les tendances évoluent à une vitesse vertigineuse. Les entreprises chinoises investissent lourdement et se développent significativement en peu de temps. La plupart des entreprises étrangères planifient et envisagent leur expansion chinoise sur 1-2 ans parce que leur processus d'entreprise prend du temps, cependant celui-ci est en inadéquation avec la rapidité de prise de décision des entreprises soutenues par des programmes de recherche, d'innovation agressifs et d'investissement (C'est le cas de la 5G où la Chine souhaite que les groupes télécoms chinois Huawei et ZTE) propose la 5G sur l'ensemble du territoire).

La Chine est plus ouverte sur les tests grandeur nature que les pays occidentaux. Aux États-Unis, l'accident courant mars 2018 d'un véhicule autonome du géant des VTC Uber qui a tué une piétonne a ravivé la perspective d'un durcissement réglementaire. Quelques jours après, le géant internet chinois Baidu recevait le feu vert de la municipalité de Pékin pour tester une voiture autonome dans la capitale chinoise, à la suite du constructeur local BAIC et de la *start-up* Nio dans d'autres villes. Et à la mi-avril, Pékin établissait une feuille de route nationale pour accélérer l'essor de véhicules intelligents. Avec ses géants technologiques et l'appui des autorités, la Chine a un écosystème meilleur que la Silicon Valley, qui sera plus prudente par crainte des procès. Toyota a d'ailleurs choisi de reprendre ses tests en Chine du fait de ses conditions favorables.

Enfin la Chine développera des standards spécifiques qui aura auront deux effets :

- le premier est la difficulté pour les entreprises notamment françaises à intégrer les futurs marchés des CPS si celles-ci ne sont pas plus présentes dans cette phase de décollage ;
- le second est le risque de se voir imposer des standards si la France et ses partenaires européens ne sont pas plus réactifs pour proposer des solutions réglementaires et de standards.

La France se doit d'avoir donc une réflexion spécifique sur sa relation avec les acteurs chinois notamment au niveau de trois points : la question de l'homologation des solutions technologiques, la place des entreprises sur le marché chinois pour exporter les solutions CPS et la réponse défensive à avoir pour limiter l'impact des solutions chinoises sur le territoire français si les acteurs français sont plus lents à proposer des solutions que leurs homologues chinois.

Le développement des CPS en Corée du Sud

Les facteurs clés de succès

Une industrie fortement robotisée et dominée par de grands conglomérats

La Corée du Sud dispose de plusieurs atouts indéniables en matière d'industrie du futur. Elle bénéficie notamment d'un haut niveau d'éducation et de qualification de sa main-d'œuvre ainsi que de la présence d'une infrastructure numérique importante, deux domaines qui constituent depuis de nombreuses années des priorités pour le gouvernement.

Elle est également d'ores et déjà à la pointe de la robotisation industrielle. En effet, sa densité robotique dépasse de huit fois la moyenne mondiale (631 robots pour 10 000 employés en 2016). Ainsi, d'après l'*International Federation of Robotics*, la Corée du Sud dispose sans conteste de l'industrie la plus robotisée au monde depuis 2010⁷⁶.

Ce taux est le résultat d'installations continues d'un grand nombre de robots, en particulier dans l'industrie électrique/électronique et dans l'industrie automobile. Singapour arrive en deuxième place avec un taux de « seulement » 488 robots pour 10 000 employés en 2016. La France a une densité de robot de 132 unités (se classant 18e dans le monde), ce qui est bien au-dessus de la moyenne mondiale de 74 robots - mais relativement faible par rapport aux autres pays de l'UE. Les membres de l'UE comme la Suède (223 unités), le Danemark (211 unités), l'Italie (185 unités) et l'Espagne (160 unités) sont beaucoup plus automatisés avec des robots industriels dans le secteur manufacturier.

La puissance de l'industrie sud-coréenne se fonde encore en majeure partie sur des industries traditionnelles. Elle s'appuie sur la présence de *chaebols*, les grands conglomérats familiaux qui structurent l'économie du pays, spécialisés dans des domaines tels que l'électronique et les télécommunications (Samsung, LG), l'automobile de milieu de gamme (Hyundai), la chimie (SK Group), la sidérurgie (POSCO) ou encore la construction navale.

L'écosystème industriel coréen apparaît propice pour diffuser des technologies liées à l'usine du futur : 60 % de sa production est de milieu ou de haut de gamme en 2014, chiffre égalé uniquement par l'Allemagne. La croissance soutenue de l'activité industrielle sur les dernières décennies a ainsi largement été tirée par les exportations de produits semi-finis de ces secteurs. Les entreprises chinoises, en fort développement, sont aujourd'hui des clients importants pour les industriels coréens.

Le plan Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy

En 2008, la « Federation of Korean Industries » évaluait à quatre années seulement l'avance de la Corée du Sud sur la Chine. Un tel constat, conjugué à l'entrée en vigueur en juin 2015 d'un premier traité de libre-échange entre les deux pays, a rendu compte de la nécessité pour la Corée du Sud de maintenir la compétitivité de son industrie. Le ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Énergie a ainsi publié en juillet 2014 un rapport dont les recommandations ont conduit à la mise en place de la « Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy ».

Avec la « Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy », la Corée du Sud vise à poursuivre la montée en gamme de l'ensemble son industrie, perçue comme une condition nécessaire pour pérenniser la croissance de ce secteur qui représentait 38,2% du PIB du pays en 2016⁷⁷.

Ce plan a ainsi pour objectif de dynamiser un secteur dont les principales forces demeurent encore centrées sur des activités traditionnelles. Afin de réaliser cette ambition large, le plan cherche principalement à encourager la digitalisation des PMI et ETI, mobilisées autour du concept d'« industrial convergence ». Cette notion de convergence, qui revient de manière récurrente dans les diverses présentations du programme, est explicitée de deux manières. Elle traduit d'une part l'émergence d'un nouveau tissu industriel qui doit mêler production, digitalisation, TIC (Technologies

⁷⁶ La robotisation s'intensifie au niveau mondial - Fédération internationale de robotique (2018).

⁷⁷ https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-pays/asie/coree-sud0/page/economie-et-commerce-15197/?no_cache=1&tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=15206&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D=

de l'Information et de la Communication) afin de proposer des produits à plus fort contenu technologique, mais aussi en associant davantage de services liés. À d'autres occasions, ce terme doit se comprendre comme la fusion de plusieurs technologies digitales (TIC, internet des objets, capteurs, etc.) dans une même entité, qu'il s'agisse d'un produit ou d'une chaîne de production. L'idée est ici d'améliorer l'efficacité de la production et de proposer des produits de meilleure qualité.

Le pilotage du programme a été confié à un « Comité à l'innovation industrielle » public-privé, dont les deux co-présidents étaient le ministre en charge du programme et le président de la CCI de Corée.

De manière plus concrète, le programme se structure autour de trois piliers. La création d'une nouvelle industrie productrice de haute technologie dans des domaines d'avenir jusqu'alors peu développés (véhicules et vêtements intelligents, robots, médecine du futur) est le principal pilier du plan, et dispose d'un budget de 886 millions d'euros. Cet aspect vise à développer l'offre technologique, mais aussi à créer un noyau d'entreprises intelligentes. En effet, pour 2020, le gouvernement ambitionne ainsi de créer 10.000 sites de production automatisés, contre 50 en 2014.

La digitalisation des PMI et ETI est le second volet du plan. Son objectif premier est d'améliorer l'efficacité productive des entreprises : 100 000 petites et moyennes entreprises exportatrices doivent être aidées d'ici 2017.

Le troisième pilier du plan est le soutien au développement d'innovations plus fondamentales, déjà maîtrisées par l'industrie coréenne (logiciels, matériaux, robotique). 775 millions d'euros sont notamment investis dans la recherche publique sur dix technologies, dont la fabrication additive et le *Big data*. Ce volet inclut également la reconversion de complexes industriels obsolètes en centres innovants.

Le développement des semi-conducteurs

Les ordinateurs de bureau, les tablettes, les smartphones sont tributaires de la technologie des semi-conducteurs. Selon le cabinet Gartner, après une forte croissance de 24 % en 2017, le marché des semi-conducteurs dans le monde a dépassé en 2018 les 476 milliards de dollars.⁷⁸

Devant un marché en forte expansion, le ministère des Affaires, du Commerce et de l'Énergie de la Corée du Sud décide de soutenir les entreprises du secteur des semi-conducteurs. Le ministère a ainsi décidé en 2018 d'investir 1,34 milliard de dollars au cours des dix prochaines années pour le développement de la technologie des semi-conducteurs de nouvelle génération afin de soutenir Samsung Electronics et SK Hynix (Samsung Electronics, avec 75,9 milliards de dollars de chiffre d'affaires (+ 26 % par rapport à 2017) est le *leader* mondial du secteur et SK Hynix, troisième au classement mondial a vu son chiffre d'affaires se hisser de 38 % à 36,4 milliards de dollars). Selon le ministère, cet investissement servira probablement à développer de nouveaux matériaux et dispositifs de semi-conducteurs et à faire du pays un centre international de semi-conducteurs.

Ces résultats s'expliquent principalement par une forte politique d'investissement. En effet, selon les chiffres de SEMI (Syndicat mondial des équipementiers des semi-conducteurs), la Corée du Sud a dépensé 17,9 milliards de dollars en 2017, plus du double du chiffre de 2016 (7,7 milliards de dollars).⁷⁹

Le développement des *smart cities* en Corée du sud (focus sur la ville de Songdo)

Songdo (nouveau quartier de la ville d'Incheon) est hyper connecté, ce qui permet de collecter et de traiter énormément d'informations. Tous les bâtiments sont fortement informatisés. Le coût de la création de la ville est estimé à 35 milliards de dollars et le chantier a été mené par un consortium privé (Gale International (fond d'investissement immobilier américain) à 61 %, Posco (groupe coréen, quatrième producteur d'acier dans le monde) à 30 % et Morgan Stanley (banque d'affaires américaine) à 9 %) qui est soutenu par la municipalité d'Incheon.

Toutes les dimensions de la vie semblent être intégrées à Songdo (immobilier, services publics, transports, éducation, santé et gouvernement).

⁷⁸ [https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-semiconducteurs-un-marche-mondial-2018-en-hausse-a-476-md\\$-73910.html](https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-semiconducteurs-un-marche-mondial-2018-en-hausse-a-476-md$-73910.html)

⁷⁹ <https://www.usinenouvelle.com/article/la-coree-du-sud-prend-la-tete-des-investissements-de-production-de-puces-electroniques.N626943>

À Songdo, toute la ville semble imprégnée dans le numérique. En effet, à titre d'exemple, en sortant du parking, la plaque d'immatriculation de la voiture est scannée, et le scanner envoie à la base de gestion l'information qu'une nouvelle voiture se rend sur le réseau routier. Ce système permet d'éviter la formation de bouchon, en informant, en temps réel, les automobilistes du trafic.

De plus, le mobilier urbain, lui aussi connecté, transmet de nombreuses données au système central par exemple densifier ou non, le nombre de bus aux heures de pointe.

La collecte des ordures se fait aussi d'une manière intelligente, il existe des vide-ordures par type de déchets. Les citoyens doivent passer leur carte d'identité devant un capteur, ce qui permet l'ouverture du vide-ordures. Des capteurs supplémentaires déterminent si le citoyen a correctement trié ses déchets et utilisé les bons sacs ; si le sac poubelle est accepté par la machine, il sera ensuite directement aspiré par le système de tubes à haute pression d'un centre de traitement. Ainsi, aucun camion-poubelle n'est nécessaire dans la ville.⁸⁰

Conclusion

La Corée du Sud est souvent présentée comme un modèle de sortie du sous-développement et de réussite économique. Ce pays qui, dans les années 1950, faisait partie des pays plus pauvres du monde a rejoint le club des pays riches. Membre du G20 et de l'OCDE, la Corée du Sud est désormais la onzième puissance économique mondiale. Ce pays a suivi une stratégie d'industrialisation axée sur la promotion des exportations à partir des années 1960. Son industrie est montée progressivement en gamme grâce aux investissements dans la recherche-développement. De nombreux facteurs ont participé au développement économique rapide de la Corée du Sud. On peut mentionner notamment les transferts technologiques, une intervention forte de l'Etat dans le secteur industriel (orientation des investissements, protection des industries naissantes), une main-d'œuvre abondante, bon marché et qualifiée et une monnaie sous-évaluée.

Atout majeur de la stratégie de développement de la Corée du Sud, son internationalisation la rend particulièrement sensible aux évolutions de l'économie mondiale et en particulier à celles de ses partenaires les plus proches : la Chine, les États-Unis et le Japon. Cet environnement a rarement été aussi incertain⁸¹. La montée du protectionnisme américain et des conflits commerciaux, le recentrage de l'économie chinoise et son désengagement du commerce d'assemblage, les difficultés pour les exportations coréennes à pénétrer le marché japonais en l'absence d'un accord de libre-échange entre les deux pays, créent de nombreuses incertitudes pour le futur.

Cependant, la Corée du Sud garde une expertise forte concernant l'industrie du futur. De plus, elle est un des leaders mondiaux sur le secteur des semi-conducteurs, technologie de base dans l'établissement des CPS et est un pionnier dans l'établissement des villes intelligentes à forte intégration des CPS.

En multipliant les investissements et en favorisant la collaboration entre le gouvernement et ses conglomérats, la Corée du Sud propose une vision macro de l'intégration des CPS. Cette expertise permet à la Corée du Sud de mettre sur le marché des produits à très forte valeur ajoutée économique.

L'exemple de l'intégration de l'amont de la filière avec les acteurs électroniques, de la proactivité des conglomérats et d'une politique de forts investissements et d'innovation montre les facteurs clés de réussite dans le développement des CPS sur des sujets comme la *smart city*. Cet exemple montre bien l'importance d'avoir un équilibre entre actions d'état et actions privées.

⁸⁰ <https://blog.soprasteria.com/fr/songdo-smart-cities/>

⁸¹ CEPII. Qu'est devenu le miracle sud-coréen ? Juin 2018.

Le développement des CPS aux États-Unis

Les facteurs clés de succès

La collaboration interagence grâce au programme Networking and Information Technology Research and Development (NITRD)

Le programme NITRD est le principal mécanisme utilisé par le gouvernement fédéral pour coordonner les investissements en R & D dans les technologies de l'information non classifiés. Il comprend en principe 22 agences de financement de la recherche liées :

- au Département du Commerce (National Institute of Standards and Technology (NIST), National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) ;
- au Département de la Défense (Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Air Force, Army, Navy), National Security Agency (NSA), Office of the Secretary of Defense (OSD)) ;
- au Département de l'Énergie (National Nuclear Security Administration (DOE/NNSA), Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response (DOE/CESER), Office of Science, DOE/SC) ;
- au Département de la Santé (Agency for Healthcare Research and Quality (AHRQ), National Institutes of Health (NIH), Office of the National Coordinator for Health Information Technology, ONC) ;
- au Département de la Sécurité Intérieure (Science and Technology Directorate (DHS S&T)) ;
- au Département de la Justice (National Institute of Justice, (NIJ)) ;
- à des agences indépendantes (Environmental Protection Agency (EPA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Archives and Records Administration (NARA), National Reconnaissance Office (NRO), National Science Foundation, NSF), mais collabore également avec plusieurs autres agences.⁸²

Faire collaborer l'ensemble de ces agences demande d'importants efforts de coordination et ces efforts de coordination technique du NITRD sont concentrés dans ses groupes de travail inter-agences (IWG (Interagency Working Groups)), où les représentants des membres et des organismes participants échangent des informations et collaborent sur des plans de recherche.

De telles activités permettent aux agences de coordonner et de concentrer leurs ressources de R & D sur des problèmes communs importants, avec pour objectifs de faire de nouvelles découvertes, de développer de nouvelles solutions technologiques et de les mettre en pratique. Cela permet d'accroître l'efficacité et la productivité globales des investissements en R & D, en exploitant les atouts, en évitant les doublons et en renforçant l'interopérabilité des produits de mise en réseau et informatiques.

La mise en place d'une entreprise scientifique et intellectuelle dynamique dans laquelle des chercheurs de divers organismes, disciplines et secteurs partagent des idées et des résultats, accélère ainsi le rythme de l'innovation. Il existe au total douze groupes de travail sur les sujets suivants⁸³ :

- R & D sur l'intelligence artificielle ;
- Big data ;
- Systèmes Cyberphysiques ;
- Cybersécurité et assurance de l'information ;
- E-Santé ;

⁸² <https://www.nitrd.gov/about/index.aspx#MemberAgencies>

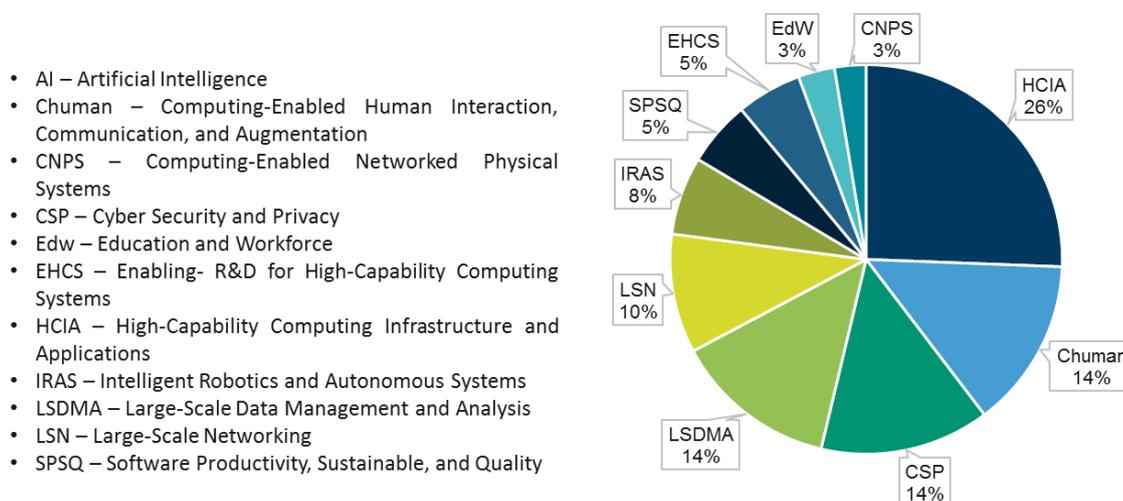
⁸³

https://www.nitrd.gov/about/index.aspx?fbclid=IwAR1m486MrbpwQE4PJP1_AgsRQOToV9h8gOZ_6n5tPuoDsN7bfbfuKS5N28#BudgetReporting

- Logiciels et systèmes à haute confiance ;
- Informatique haut de gamme ;
- Robotique intelligente et systèmes autonomes ;
- Réseau à grande échelle ;
- Confidentialité et propriété des données ;
- Productivité, durabilité et qualité des logiciels ;
- R & D sur le spectre sans fil.

Le budget 2019 du programme NITRD est de 5,28 milliards de dollars (le budget 2010 était de 3,7 milliards de dollars et celui de 2000 de 1,5 milliards de dollars). Le budget est partagé sur onze domaines de recherches (basés sur les 12 groupes de travail) de la manière suivante ⁸⁴ :

Figure 32 – Budget 2019 du programme NITRD (en millions de dollars)



Source: NITRD Supplement to the President's FY2019 Budget

La *National Science Foundation* (NSF) est l'agence recevant la plus grande part du financement, nous allons faire un focus sur les CPS dans cette agence.

La National Science Foundation et les CPS

Un programme de recherche conjoint sur les systèmes cyberphysiques a été lancé par le NSF pour la Direction des Sciences de l'Informatique, de l'Information et de l'Ingénierie (Computer and Information Science and Engineering, CISE) et la Direction de l'Ingénierie (Directorate for Engineering, ENG).

Le programme promeut les recherches sur les trois thèmes suivants :

- sur les principes de base ;
- sur les méthodes et les outils, et sur les composants ;
- et les systèmes et les supports d'exécution.

Au cours de l'exercice 2019, la NSF a collaboré étroitement avec de nombreux organismes du gouvernement fédéral, américain, notamment avec la Direction de la Science et de la Technologie du Département américain de la Sécurité intérieure (*U.S. Department of Homeland Security, DHS*),

⁸⁴

https://www.nitrd.gov/about/index.aspx?fbclid=IwAR1m486MrbpwQE4PJP1_AgsRQOToV9h8gOZ_6n5tPuoDsN7bfbfuKS5N28#BudgetReporting

l'Administration fédérale des autoroutes (*Federal Highway Administration, FHWA*) du Département des transports des États-Unis (*Department of Transportation (DOT)*); plusieurs instituts et centres des Instituts nationaux de la santé (*National Institutes of Health, NIH*), notamment l'Institut national d'imagerie et de bio-ingénierie biomédicales (*National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, NIBIB*), l'Institut national du cancer (*National Cancer Institute, NCI*); et l'Institut national de l'alimentation et de l'agriculture du Département de l'agriculture des États-Unis (*U.S. Department of Agriculture National Institute of Food and Agriculture, USDA NIFA*). En outre, le NSF travaille en étroite collaboration avec la Fondation allemande de Recherche (*DFG*) pour soutenir des projets de recherche communs aux États-Unis et en Allemagne concernant les CPS.

Le programme finance trois types de projets⁸⁵ :

- **les petits projets** : pouvant solliciter un budget total atteignant 500 000 dollars pour une période allant jusqu'à trois ans. Principalement les idées nouvelles et innovantes émergentes qui pourraient avoir un impact important sur le domaine des CPS ;
- **les projets de taille moyenne** : pouvant solliciter un budget total allant de 500 001 dollars et 1 200 000 dollars pour une période allant jusqu'à trois ans. Concerne principalement les projets multidisciplinaires ayant des objectifs clairs ;
- **les projets frontières** : qui doivent traiter des problèmes critiques clairement identifiés et liés aux CPS, qui ne peuvent être résolus par un ensemble de projets plus petits. En outre, les projets frontières doivent également chercher à repousser les limites du CPS au-delà des systèmes et des capacités actuels. Des fonds peuvent être demandés pour un montant total allant de 1 200 001 de dollars à 7 000 000 de dollars sur une période de 4 à 5 ans. Cependant, la fenêtre de soumission des projets frontières est différente de celle des petits et moyens projets.

Il est important de notifier l'évolution quasi exponentielle du budget de financement accordé aux différents types de projets. En effet, en 2015, les subventions étaient les suivantes⁸⁶ :

- jusqu'à 200 000 dollars par an sur trois ans pour de petits projets ;
- jusqu'à 500 000 dollars par an sur trois ans pour des projets de taille moyenne ;
- jusqu'à un million de dollars par an sur cinq ans pour les grands projets.
-

Ainsi, 119 projets liés aux CPS ont été subventionnés par le CISE et l'ENG en 2018 avec une moyenne de 300 000 dollars par subvention accordée pour un total de 70 000 000 de dollars, dont un maximum à 4 868 334 de dollars sur trois ans pour un projet sur l'organisation virtuelle. Il est à noter aussi que plus de 16 projets ont reçu un financement égal ou supérieur à 1 000 000 de dollars en 2018, dont des projets sur l'organisation virtuelle, l'analyse de la pollution auditive en milieu urbain, un logiciel de contrôle pour les systèmes de l'industrie intelligente, les méthodes dynamiques de contrôle de la circulation pouvant impacter la qualité de vie dans les *Smart cities* et plusieurs projets concernant les véhicules autonomes sur lesquels nous allons faire un focus.⁸⁷

Les relations entre les États et les constructeurs automobiles

Le Département des transports américain a publié en février 2019 un nouveau document centralisant les volontés politiques et stratégiques des États-Unis pour le futur de la mobilité et plus particulièrement les véhicules autonomes. Cette politique est basée sur six principes :⁸⁸

- **la priorisation de la sécurité** (améliorer la sécurité des automobilistes, des piétons, des cyclistes et des motocyclistes par l'automatisation, mais aussi prendre des précautions contre les risques potentiels liés à l'automatisation) ;
- **rester technologiquement neutre** (le Département adoptera des politiques souples et technologiquement neutres pour favoriser la concurrence et l'innovation. Cette approche permettra au public, et non au gouvernement fédéral, de choisir le mode de mobilité le plus efficient) ;

⁸⁵ https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286&org=CISE&from=home

⁸⁶ Living in a networked world : integrated research agenda Cyber-Physical Systems par Acatech (2015) p.210

⁸⁷ https://www.nsf.gov/awards/award_visualization.jsp?org=CISE&pims_id=503286&ProgEleCode=7918#

⁸⁸ Automated Vehicles 3.0 : Preparing For the Future of Transportation par U.S. Department of Transportation (2019)

- **moderniser la réglementation** (le Département américain a prévu de moderniser ou éliminer les réglementations obsolètes et semble vouloir appuyer l'élaboration de programmes de normes et approches techniques fondées sur le consensus, flexibles et adaptables dans le temps) ;
- **encourager un environnement réglementaire et opérationnel cohérent** (volonté d'établir un consensus entre les agences de transport locales et régionales et les acteurs de l'industrie sur les aspects techniques, normatives et politiques visant à soutenir l'intégration des véhicules automatisés dans l'ensemble du système de transport américain en ayant plus de cohérence entre les États américains) ;
- **Préparer l'automatisation de la mobilité** (le Département d'État prévoit de fournir des conseils, des best practices, des programmes pilotes et d'autres assistances pour aider ses partenaires à planifier les investissements nécessaires pour un avenir automatisé dynamique et flexible) ;
- **protéger les libertés des citoyens** (volonté de laisser le choix aux américains entre un véhicule manuel et un véhicule autonome).

Ainsi, nous pouvons noter qu'une place importante est donnée à la réglementation dans la préparation du futur de la mobilité par le Département de Transports américain.

La réglementation de la mobilité autonome

Du fait de la multiplicité des États américains et de leur assez large indépendance au niveau légal et réglementaire, l'un des points importants pour le développement des véhicules autonomes est la réglementation au niveau fédéral. Aussi, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, agence fédérale américaine chargée de la sécurité routière et dépendant du Département des Transport des États-Unis) a examiné les projets de législation des États américains afin d'en identifier les composantes communes et mettre en évidence les éléments concernant les véhicules autonomes que les États devraient envisager d'inclure dans la législation à travers la publication de best practices.⁸⁹ La NHTSA recommande les mesures suivantes :

- **fournir un environnement « technologiquement neutre »** afin de ne pas imposer des « charges inutiles » à la concurrence et à l'innovation en limitant les tests ou le déploiement des VA (ne pas prendre en compte l'ancienneté du constructeur par exemple) ;
- **fournir des méthodes de reporting et de communication pour les officiels de la sécurité publique** (les États devraient prendre des mesures pour surveiller le fonctionnement sûr des véhicules adoptant des systèmes de conduites automatisés *via* des mécanismes de reporting et de communication afin que les différentes entités puissent se coordonner avec les agences de sécurité publique. Les États devraient développer des procédures pour que les différentes entités puissent signaler les accidents et autres incidents routiers impliquant des véhicules avec systèmes de conduites automatisés aux forces de l'ordre et aux premiers intervenants) ;
- **réviser les lois et règlements de la circulation** susceptibles de faire barrage au fonctionnement des VA (certains États exigent par exemple qu'un humain ait une main sur le volant à tout moment (une loi qui constitue un obstacle au développement des VA de niveaux 3 à 5) ;
- **adopter la terminologie définie par des normes techniques volontaires** afin d'éviter les complications liées à l'utilisation d'une terminologie différente ;
- évaluer l'état de préparation des routes pour accueillir des VA.

⁸⁹ Automated Driving Systems 2.0 : A Vision for Safety : par NHTSA (2017) p.21.

Conclusion

Ainsi, les États-Unis, pays pionnier dans le développement des CPS conserve son avance dans le domaine à travers une politique d'investissement public très forte basée sur la collaboration de plusieurs agences de recherches pour travailler sur des sujets transversaux en évitant les doublons et en visant l'efficacité économique.

Les véhicules autonomes, domaine à forte efficacité économique en ce qui concerne les CPS, impliquent un sujet important qu'est la réglementation étant donné la situation politique des États-Unis. Ce sujet est traité par une implication forte du Département des Transports des États-Unis qui propose des éléments de réglementations aux différents États sans jamais les rendre obligatoires. De plus, les États sont relativement proactifs pour permettre des tests sur les différents sujets. Dans la seule Californie, un des États américains les plus avancés sur la question, 27 entreprises ont déposé une demande d'autorisation pour tester leurs véhicules sur les routes de l'État.

Il faut ajouter que les programmes américains s'appuient également sur des dynamiques complémentaires :

- les grands constructeurs et les équipementiers traditionnels sont encore bien présents, mais ils sont rejoints et déjà bousculés par de nouveaux acteurs comme Tesla. Mais ce sont aussi les grands groupes du numérique, comme Google, Apple et Microsoft, qui deviennent les premiers partenaires des industriels de l'automobile, et très bientôt leurs principaux rivaux ;
- les grands fournisseurs de puces et de processeurs de la filière électronique américaine comme Intel qui investissent massivement dans des *start-up* travaillant sur des fonctions et des composants spécifiques notamment à la voiture autonome (cartographie, caméras intelligentes, capteurs lidar ou en intelligence artificielle). C'est dans ce sens que Intel a racheté Mobileye, spécialiste des caméras intelligentes pour 14,7 milliards de dollars ;
- aux États-Unis, de grandes universités comme le MIT, Berkeley, Carnegie- Mellon University, ou Stanford, ont créé des équipes importantes qui collaborent avec les industriels, et dont les résultats ont alimenté les véhicules de démonstration réalisés par exemple par Google ou Uber ;
- des consortia pour le développement de réglementation. Parmi ces consortia américains, un certain nombre ne sont pas spécifiques à l'industrie, et mettent plutôt en avant les standards génériques des technologies de l'information. On peut citer pour l'industrie du futur l'Industrial internet Consortium qui fournit des orientations pour le développement de systèmes, de solutions et d'architectures applicatives. Ce modèle s'applique au secteur de la Production, et aussi à l'Énergie, la Santé, *Smart cities* et Transport (Architecture IIRA).

Dans ce contexte, la France doit proposer avec ses partenaires des réponses mêlant actions des acteurs privés notamment du numérique (notamment au niveau de l'IA, de la gestion des données et de la sécurisation), politiques massives de recherche appliquée et cadres pour des expérimentations grandeur nature avec comme objectifs principaux :

- la garantie de l'interopérabilité des systèmes à travers les infrastructures coopératives, les normes, les standards et les réseaux de maintenance adéquats ;
- le développement de certification et d'homologation ;
- l'atteinte d'un niveau de maturité technologique répondant aux exigences de sûreté et de sécurité ;
- l'offre de nouveaux services utilisant les données ;
- la viabilité économique ;
- et un cadre légal et réglementaire défini au plan national et faisant écho au plan international.

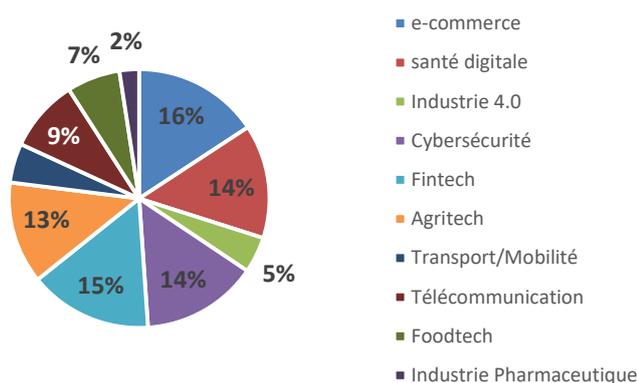
Le développement des CPS en Israël

Les facteurs clés de succès

La richesse de l'écosystème des start-ups

Ces dernières années, Israël est souvent étiqueté du terme de "start-up Nation" après le succès de start-up israéliennes qui se sont positionnées sur de nombreux marchés, notamment la communication, les véhicules autonomes, l'internet, les systèmes médicaux, l'agriculture, la biotechnologie et la sécurité. Mais ce nom vient principalement du fait qu'Israël compte le plus grand nombre de start-up par habitant au monde, soit environ 1 start-up pour 1 400 personnes. À titre de comparaison, la France compte 0.112 start-up pour 1400 personnes, l'Allemagne en compte 0.056 pour 1400 personnes et le Royaume-Uni 0.221. Start-up Nation Central (organisation à but non lucratif œuvrant pour le développement de l'innovation israélienne) liste sur sa plateforme Start-up Nation Finder, 6 236 start-ups en Israël en 2019. De même, Start-up Nation Central estime qu'environ 1 400 start-ups s'établissent en Israël chaque année avec cependant 800 start-up qui disparaissent en même temps (donnant tout de même un delta de 600 start-up supplémentaires par an).

Figure 33 - Répartition des start-up israéliennes par secteur en 2017



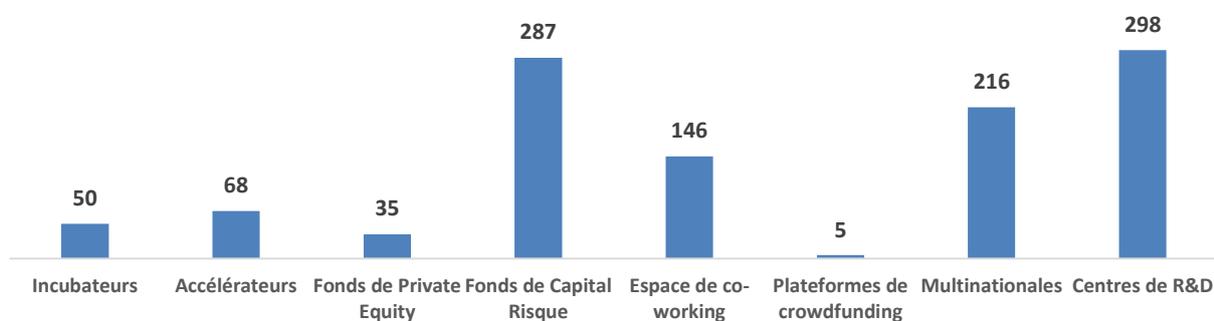
Source : Keyrus, L'écosystème start-up en Israël Bilan 2017

Ainsi, à travers ce graphique, nous pouvons remarquer que les start-ups israéliennes sont globalement réparties de manière équitable entre les secteurs. En effet, le premier secteur représente seulement 16% des start-up. Certains secteurs sont cependant prédominants, notamment le e-commerce, la santé digitale, la cybersécurité, la fintech et l'agritech (qui représentent au total 72% de l'écosystème des start-up). Tous ces secteurs intègrent des CPS (certains plus que d'autres). Les secteurs intégrant massivement des CPS comme la santé digitale, l'industrie du futur, l'agritech, le transport et mobilité et la foodtech concentrent quant à eux 58% de l'écosystème des start-ups. Celles-ci se concentrent plutôt sur les services et les plateformes en lien avec les CPS. De plus, ces start-up excellent dans le développement de solution de sécurité et cybersécurité.

En 2017, il y a eu 620 levées de fonds pour ces start-ups, pour un montant total de 5,24 milliards de dollars (ce qui représente une hausse de 9% par rapport à 2016). Il est important de noter que ces fonds proviennent dans leur très grande majorité de l'étranger étant donné que seulement 15,5% (814 millions de dollars) proviennent de fonds israéliens. Cependant il faut notifier que les investissements provenant de fonds israéliens ont augmenté de 25% entre 2016 et 2017. Les secteurs principalement concernés par ces levées de fonds étaient la cybersécurité, les véhicules autonomes et l'intelligence artificielle.

En Israël, deux villes concentrent principalement ces *start-ups*. Tout d'abord, Tel Aviv, qui est considérée comme la capitale de la « *Start-up Nation* » (et est parfois surnommée « *Start-up City* ») et Jérusalem. Chacune de ces villes développe ses propres spécialités. Tel Aviv possède en effet ses propres spécificités sectorielles avec la cybersécurité (814 millions de dollars de fonds levés en 2017), l'automobile (de nombreux constructeurs comme Daimler, Porsche ou Renault ont lancé des centres de R & D à Tel Aviv à la recherche d'alliances avec des *start-up* locales tournées vers l'automatisation, la mobilité intelligente et l'évitement des collisions. Le but d'Israël n'étant pas de fabriquer des voitures, mais de construire leur cerveau. L'un des cas les plus connus est d'ailleurs le rachat de Waze (application de navigation) par Google pour 1,3 milliard de dollars) et l'Adtech avec des plateformes de marketing telles que Taboola et Outbrain. Jérusalem est quant à elle en effet plutôt tournée vers le secteur de la santé (150 *start-ups*) et de l'intelligence artificielle (20 % du capital risque est dédié aux *start-up* de l'intelligence artificielle) avec le développement lors de ces dernières années d'une expertise spécifique dans la vision par ordinateur et le traitement des images. Par ailleurs, Mobileye (société développant des systèmes anticollisions et d'assistance à la conduite de véhicules), rachetée 15,3 milliards de dollars par Intel en 2017 a été créée à Jérusalem.⁹⁰

Figure 34 – Écosystème des *start-ups* en Israël en 2016



Source : Keyrus, L' écosystème start-up en Israël Bilan 2017

La richesse de l'écosystème lié aux *start-ups* est certainement le facteur clé de succès de la « *Start-up Nation* ». En effet, le nombre important de structures telles que des incubateurs ou des accélérateurs, de fonds d'investissement, d'espaces de co-working, de multinationales et de centres de R & D crée un écosystème favorable au développement de *start-up* technologiques. Cet écosystème vient se coupler au capital humain très élevé d'Israël (c'est le quatrième pays en ce qui concerne le personnel de recherche et le premier pays au monde en ce qui concerne le nombre de doctorats par habitant).

Tout cet écosystème est mis en relation par des organismes qui facilitent les échanges entre entrepreneurs, chercheurs, investisseurs et gouvernements. Un exemple concret et fondamental en Israël est *Start-up Nation Central* qui se présente comme une organisation à but non lucratif mettant en relation des dirigeants d'entreprises, de gouvernements, et d'ONG du monde entier avec l'innovation israélienne. Cette mise en relation se fait à travers l'outil *Start-up Nation Finder* qui permet de filtrer les *start-ups* israéliennes par secteur (industrie du futur, transport intelligent, cybersécurité...), étape de financement, stade de produit, business model... L'outil liste plus de 6 000 *start-ups*, mais aussi des fonds d'investissement (450 au total, avec les contacts potentiels), des accélérateurs (plus de 200), des multinationales (plus de 350) et les inventions récentes (plus de 1 400). Le but étant *in-fine* de connecter les innovateurs israéliens avec les investisseurs nationaux et internationaux.

⁹⁰ *Global Start-up Ecosystem Report 2018* par Startup Genome

L'attrait des géants de la technologie

En 2016, Israël accueillait le centre de R & D de près de 300 multinationales. Entre 2007 et 2016, cela représente en moyenne, vingt nouveaux centres de Recherche et Développement par an.⁹¹

L'établissement d'un centre ou son expansion prend généralement place après l'achat par une multinationale d'une entreprise israélienne. Au fil du temps, les compagnies multinationales ont fait l'acquisition de plus de 100 entreprises israéliennes. Certaines entreprises (Intel, Microsoft, Broadcom, Cisco, IBM et EMC) ont même fait l'acquisition de plus d'une dizaine d'entreprises israéliennes.

Le gouvernement israélien œuvre pour augmenter l'ouverture et le développement de centres de R & D en Israël. En adaptant la taxation des entreprises de haute technologie à l'environnement international (l'impôt sur les sociétés des entreprises de haute technologie a été réduit de 25 % à 6-12 % et cette réduction a été accompagnée d'autres avantages sur l'impôt sur les dividendes et sur les plus-values). De plus, le *Foreign Investment and Industrial Cooperation Authority* (autorité sous l'égide du ministère de l'Économie et de l'Industrie qui gère des accords de coopération industrielle avec plus de 200 sociétés leaders mondiaux dans des domaines tels que la défense, l'aviation, l'énergie, l'électronique, les véhicules...) agit également dans le but d'attirer des investissements de compagnies multinationales spécialisées dans l'industrie de pointe.

Zoom sur le cas Microsoft : Microsoft a été l'une des premières multinationales à s'installer en Israël. Son centre de recherche et développement à Herzliya ouvert au début des années 90, était le premier du genre en dehors des États-Unis. Il emploie environ 1 000 ingénieurs et scientifiques spécialisés dans la sécurité, l'intelligence artificielle et l'amélioration des interfaces. La compagnie a depuis lancé le programme Microsoft *Start-up Growth Partners* pour accompagner les jeunes entreprises avec un programme d'accélérateur de 4 mois, avec une équipe d'aide au développement à partir de la phase d'accélération et un fonds d'investissement qui suit la *start-up*. De plus, la société acquiert également régulièrement des entreprises en démarrage et entre 2012 et 2017, l'accélérateur de Microsoft en Israël a soutenu 95 projets, dont 82 % ont reçu un financement.⁹²

L'accompagnement de l'État israélien

L'État israélien souhaite accompagner et faciliter le développement des *start-up* technologiques par de nombreuses voies.

La première étant des mesures tournées vers les multinationales afin de les inciter à ouvrir des centres de R & D en Israël comme évoqué plus haut.

Ensuite, en Israël, les programmes de financement nationaux sont soutenus par l'autorité israélienne de l'innovation (Israel Innovation Authority) qui est responsable de la politique d'innovation du pays. C'est une entité publique et impartiale agissant pour le bénéfice de l'innovation israélienne et de l'économie israélienne de manière générale. En 2016 par exemple, l'autorité a délivré des subventions pour 1 115 projets de 650 entreprises différentes (avec une moyenne de 400 000 dollars par subvention).

Un aspect de la haute technologie israélienne est la forte présence de l'armée et de ses unités d'élite. Certaines unités de renseignement (unité 8200 ou 81) forment des experts en technologie, en informatique, des hackers... C'est par exemple en faisant leur service militaire que les trois cofondateurs d'IntSights ont acquis l'expertise en cybersécurité nécessaire au lancement de leur produit. Ainsi, plus de 1 000 *start-up* ont été montées par des alumni de l'unité 8200 (Waze, Check Point, Mirabillis...).⁹³

Les partenariats internationaux

L'autorité israélienne de l'Innovation collabore avec des autorités similaires dans quatre pays à travers des fonds binationaux dédiés au financement conjoint de projets de R & D entre les entreprises israéliennes et les entreprises du pays allié. Il existe donc quatre fonds binationaux, le

⁹¹ *Innovation In Israel 2017* par Israel Innovation Authority.

⁹² <https://technologist.eu/six-lessons-from-the-start-up-nation/>

⁹³ <https://www.maddydness.com/2018/02/06/maddyworld-innovation-quel-secret-israel/>

CIIRDF (entre Israël et le Canada), le SIIRD (entre Israël et Singapour), le KORIL (entre Israël et la Corée du Sud) et le BIRD (entre Israël et les États-Unis).⁹⁴

Le partenariat avec les États-Unis est particulièrement développé. En effet, créée en 1977, la fondation BIRD finance à hauteur de 50 % des coûts de développement d'un projet de R & D industriel présenté conjointement par une entreprise américaine et une entreprise israélienne (jusqu'à 1 million de dollars de subvention possible par projet). Depuis sa création, la fondation BIRD a approuvé plus de 950 projets (environ 20 par an et 24 en 2018) et les ventes cumulées des produits développés dans le cadre de projets BIRD ont dépassé les 10 milliards de dollars).

Conclusion

La « Silicon Valley » israélienne, qui représente près de 10 % du PIB du pays et la moitié de ses exportations, est le deuxième écosystème d'innovation dans le monde derrière sa jumelle californienne⁹⁵. Il faut savoir que le développement de technologie est avant tout tourné vers les besoins de l'armée israélienne, qui fait office de catalyseur d'innovation. En mettant de côté les crédits alloués à Tsahal, l'armée nationale, plus de 4,5% du PIB est consacré aux dépenses en R & D. L'Innovation Authority, sous la tutelle du Premier ministre, nourrit l'écosystème par un système de financement incitatif. Dans le même temps, le système israélien pousse ses jeunes pousses au développement à l'international pour pallier à la taille du marché.

Ainsi, Israël est un pays qui a su se spécialiser dans la création de jeunes entreprises innovantes en créant un écosystème favorable à leur développement rapide, à travers un fort capital humain, l'incitation des géants de la technologie à investir dans la recherche en Israël, des programmes gouvernementaux facilitants la croissance de ces entreprises et des collaborations internationales. De ce fait, Israël se positionne comme un leader potentiel lors des prochaines années sur des secteurs intégrant fortement les CPS (industrie du futur, Agritech, Mobilité...).

La France doit prendre exemple sur l'intervention publique massive dès les phases d'amorçage en s'appuyant nécessairement sur BpiFrance. Des instruments publics efficaces pour faire germer des *start-ups* sont primordiaux pour le développement des CPS.

⁹⁴ *Endless Possibilities to Promote Innovation* par Israel Innovation Authority.

⁹⁵ <https://bfmbusiness.bfmtv.com/france/la-start-up-nation-israel-un-modele-a-suivre-pour-la-france-1679156.html>

Synthèse des initiatives internationales

Pays	Secteurs importants dans les CPS	Les points clés
	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie du futur • Smart Grids • Mobilité • E-santé • Logistique • Sport 	<ul style="list-style-type: none"> • Une stratégie gouvernementale pour intégrer la question de l'intermédiation et diminuer le risque de l'intégration de nouvelles entreprises qui s'accaparaient la valeur de la chaîne de valeur • Des programmes pour changer en profondeur les paradigmes existants des entreprises • Le transfert de technologie important et facilitant la recherche chez les PME • Un fort investissement dans les organisations et les actions de standardisation sectorielles • Un enjeu fort d'intégrer dans la démarche d'intégration des CPS les PMI et ETI aujourd'hui plutôt passives
	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles industries • Machine learning • Semi-conducteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Une politique offensive pour le développement des marchés applicatifs • Des standards et homologations des CPS qui seront propres au marché chinois et qui pourraient être imposés par la suite au reste des marchés • L'investissement des entreprises et des structures publiques conséquentes et une forte réactivité • Peu de crainte de procès sur des erreurs possibles des CPS complexes permettant une rapidité de mise en œuvre de tests à grande échelle • Le choix de technologies clés sur lesquelles devenir incontournables • Des grandes entreprises « moteurs » dans le développement de solutions (notamment gestion des données et IA) en lien avec des universités de qualité
	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie du futur et robotisation • Semi-conducteurs • Smart city 	<ul style="list-style-type: none"> • La présence de grands conglomérats et de la filière électronique poussant au choix d'innovation • L'avance technologique « historique » sur les semi-conducteurs et les smart-cities • Des programmes spécifiques de recherche très souvent opérationnels dont le but ultime est d'exporter les solutions technologiques vers d'autres pays
	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilité • Industrie du futur • Agriculture • Santé • Armement 	<ul style="list-style-type: none"> • La collaboration interagence pour la recherche • L'investissement public important et tourné vers l'économie • De grands groupes numériques devenant des partenaires privilégiés des industriels de l'automobile • Une politique d'achat de <i>start-up</i> sur des composants et des briques technologiques des

		<p>CPS de la part des filières électronique et numérique</p> <ul style="list-style-type: none"> • La forte relation entre les États et les constructeurs automobiles pour développer des lieux d'expérimentation • Une richesse des grandes universités avec des équipes dédiées aux industriels • Des consortia pour le développement de réglementation
	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie du futur • Mobilité • E-Santé • Sécurité • Agritech 	<ul style="list-style-type: none"> • La qualité de la recherche sur des sujets de pointe pour avant tout défendre la position d'Israël dans la région • L'écosystème des <i>start-up</i> riches et hétérogènes • Un écosystème puissant de financement autour de la sécurité et de la défense • Les partenariats internationaux pour trouver des débouchés aux innovations créées par les jeunes pousses.

RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES

Rappels des enjeux

La mission a permis de mesurer les enjeux à moyen terme pour la filière CPS.

Des enjeux technologiques pour continuer à être dans la course :

Pour répondre aux **nouvelles exigences et capacités des systèmes cyberphysiques**, la France doit se doter d'une nouvelle réponse en adéquation avec une large variété de technologies. Ce n'est donc plus une simple somme de briques génériques, mais une vision systémique de l'utilisation de technologies qu'il faut avoir. Il en découle sept enjeux technologiques principaux pour répondre aux différentes strates que comporte un environnement de CPS :

- les technologies de conception et de modélisation ;
- les architectures horizontales et verticales ;
- les technologies d'autonomie, de robotisation, d'analyse des données et de support à la décision ;
- les technologies embarquées de calcul et de stockage critiques pour l'autonomie ;
- les technologies de communication, d'interopérabilité et d'interfaçage (notamment IHM) ;
- les technologies de sécurité, de sûreté et de confiance du système ;
- les plateformes et les smart services.

La complexité relevée des technologies est d'autant plus grande que la plupart d'entre elles sont déjà largement déployées.

La filière française **est très riche en laboratoires sur la plupart des sujets**. Elle se distingue en proposant une large gamme d'actions de recherche. Cependant, le cloisonnement est à remarquer et les relations entre laboratoires restent discrètes. La participation à des projets européens reste rare, voire anecdotique dans la plupart de cas. Et la recherche de compétences complémentaires n'est pas dans la logique des laboratoires.

Le **transfert de technologie entre laboratoires et monde économique** est, quant à lui, encore peu mené. Même si un effort a été fait pour se rapprocher des questions économiques, les laboratoires sont encore faibles sur ce domaine. Le manque de doctorants et de capacité de suivi de la recherche est un exemple parmi d'autres. Les structures d'accompagnement pour le transfert de technologies sont encore pour la plupart démunies face à la question complexe des CPS.

Enfin l'écosystème français se développe avec de fortes spécificités technologiques. Son ouverture aux autres acteurs européens restant très faible, il ne retire pas de la valeur de partenariats potentiels. La participation à des projets européens et à des coopérations entre entreprises montre bien le pas qu'il reste à faire sur ce sujet. Seuls les leaders technologiques et marchés participent à certains projets européens. Cette présence faible ne permettra d'appuyer des normes et standards et de proposer une place française à la hauteur des efforts de l'écosystème.

Des enjeux économiques différents selon les marchés cibles :

Les trois filières étudiées Industrie, bâtiment et automobile relèvent des différences notables dues à la complexité des attentes des clients, de la maturité de l'écosystème et des attentes des pouvoirs publics.

L'Europe représente plus du **tiers des investissements mondiaux dans l'industrie du futur** et les CPS sont une carte à jouer pour le développement de l'industrie française dans la compétition mondiale. La pénurie de spécialistes qualifiés⁹⁶ et de solutions pertinentes crée des **opportunités supplémentaires** pour les acteurs des CPS et les intégrateurs de solutions, notamment sur trois domaines :

⁹⁶ <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>

- processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement et des entrepôts - suivi en temps réel de la demande, du traitement des commandes, du flux de fabrication, des retours, etc. ;
- lignes de production - contrôle en temps réel des performances, de la durabilité, diminution des besoins énergétiques et de la sécurité des produits ;
- maintenance prédictive – la surveillance en temps réel des dispositifs de fabrication industrielle permettant aux entreprises de prévoir à quel moment la maintenance est nécessaire.

Cependant, le peu de cadres de normalisation, la faible participation à des projets collaboratifs de R & D, la taille de l'écosystème de solutions technologiques, mais également la pénétration des CPS dans les industries traditionnelles sont de réelles problématiques pour le développement durable des CPS sur ce sujet en France

Pour le bâtiment, le segment des CPS est une formidable opportunité pour augmenter **les fonctionnalités des bâtiments** (sécurité, maintien à domicile des seniors, bien-être), mais également en permettant une meilleure optimisation des consommations et une meilleure gestion du mix énergétique. L'intérêt pour les producteurs d'électricité et pour les fournisseurs de services est, en particuliers, de pouvoir réduire les pics de consommation en répartissant de manière plus optimale dans le temps les consommations.

Cependant la filière française ne peut se développer durablement que si le marché continue à se développer et que la **volonté politique** d'améliorer la qualité de vie et de diminuer l'impact énergétique continue. De plus, l'écosystème majoritairement fait de *start-up* et PME doit encore se structurer à l'instar des innovations apportées par Intent Technologies proposant une plateforme numérique permettant de connecter les bâtiments de ses clients. Cet écosystème doit être soutenu par des **programmes d'accélération, des structures d'incubation et de développement** en lien avec les leaders du bâtiment. Enfin, la filière a besoin d'un cadre compétitif plus affirmé. Une stratégie d'approche globale du *smart building* s'impose, **loin des logiques de silos actuelles** qui pèsent sur la rentabilité et la performance des projets.

Enfin le secteur automobile est en **pleine révolution**. Cette nouvelle vague de technologies rebat les cartes pour les années futures pouvant faire vaciller la filière française si celle-ci ne se prépare aux futurs défis et à prendre le pouvoir sur des maillons de la chaîne où la valeur se retrouvera.

La **participation aux cadres normatif et réglementaire** apparaît ici comme primordiale pour le développement de la filière française. Aujourd'hui beaucoup **d'inconnus sur l'utilisation des technologies** bloquent le positionnement de toute la filière. Il est primordial que celle-ci participe aux projets européens d'harmonisation, mais également définisse un cadre pour son développement sur le territoire français. Cependant, la transformation des briques technologiques (précision des capteurs, intégration de l'IA, briques génériques non efficaces en l'état, sécurisation des données dans le *cloud*, gestion des ressources énergétiques et gestion des données personnelles...) en intérêt économique et la capacité à imposer des standards de développement devront être les priorités de la feuille de route pour les années futures.

Des enjeux de musculation de la filière par un appui des agences et de l'État

Le parangonnage sur les pays Allemagne, Chine, Corée du Sud, États-Unis et Israël a permis de souligner des facteurs de réussite à mettre en avant pour le développement des CPS :

- Un choix clair de technologies clés sur lesquelles devenir incontournables, complété par des partenariats pour compenser les faiblesses ;
- Un investissement pour le développement de technologies et de standards (parfois propres au pays) / des consortia pour le développement de réglementations ;
- Le décloisonnement des structures de recherche et le développement du transfert de technologie entre la recherche et les PME ;
- La possibilité d'expérimenter les solutions « grandeur nature » et d'imposer des partenariats et des technologies du pays ;
- Un plan massif d'investissement permettant de proposer les infrastructures adéquates ;

Des programmes pour changer en profondeur les paradigmes existants des entreprises utilisatrices en réponse à l'enjeu fort d'intégrer les PMI et ETI dans la démarche d'intégration des CPS.

Des enjeux métiers :

Enfin le rapport de l'OPIIEC a déjà souligné des besoins en compétences et en métiers. Cette étude n'a pas approfondi ce sujet, mais la thématique reste d'actualité notamment avec la **pénurie de compétences à recruter** et des mutations à prévoir des savoir-faire dans les années futures.

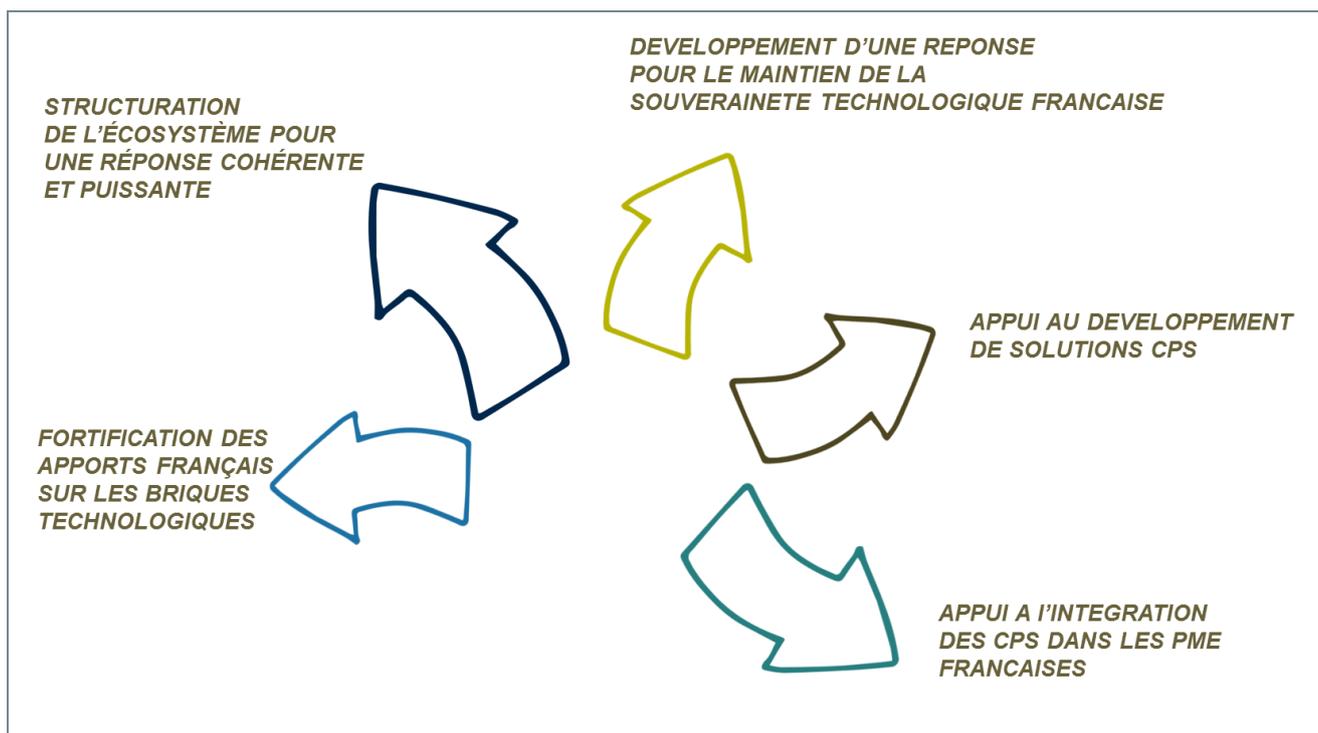
Descriptif des recommandations

Le diagnostic de la situation actuelle met en avant cinq types de freins limitant le développement des CPS et le rayonnement des entreprises françaises sur ce sujet :

- déficit sur certaines briques technologiques ;
- faiblesse de l'écosystème sur certains marchés clés ;
- peu de réponses construites apportées par les entreprises françaises aux problématiques des CPS ;
- méconnaissance de solutions CPS et faiblesse des PME sur la question des CPS ;
- peu de stratégie collective.

Les cinq préconisations qui suivent visent à lever les freins. Elles sont formulées à l'attention des acteurs du Copil, mais également des entreprises des secteurs concernés. Elles s'appuient sur une série de fiches action décrivant pour chaque préconisation les sous actions à mettre en place.

Figure 35 – cinq axes prioritaires de développement pour les écosystèmes des CPS



Pour répondre à ces cinq enjeux prioritaires, onze actions ont été proposées par Katalyse.

Cinq ont été retenus lors de la réunion de présentation de recommandations auprès d'entreprises et de laboratoires :

- action 1 : appuyer un lieu de convergence des forces vives de la filière et des écosystèmes ;
- action 2 : soutenir les travaux de labellisation et standardisation ;
- action 3 : proposer et appuyer des appels à projets innovants sur les CPS ;
- action 4 : favoriser les outils et briques fournis par l'écosystème ;
- action 5 : sensibiliser et accompagner les PME pour l'intégration des CPS.

Tableau 5 – Répartition des actions par enjeu prioritaire

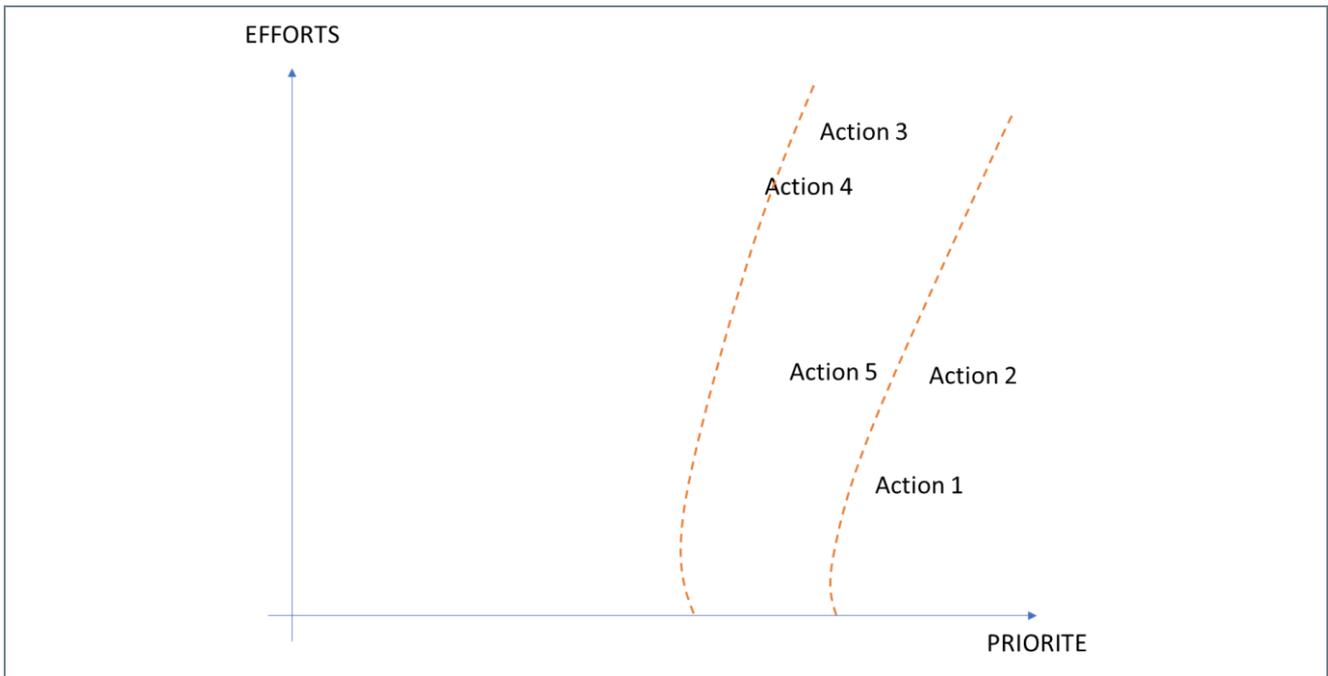
	Fortification des apports français sur les briques technologiques	Structuration de l'écosystème pour une réponse cohérente et puissante	Développement d'une réponse pour le maintien de la souveraineté technologique française	Appui au développement de solutions CPS	Appui à l'intégration des CPS dans les PME françaises
Action 1 : appuyer un lieu de convergence des forces vives de la filière et des écosystèmes		x	x	x	x
Action 2 : soutenir les travaux de labellisation et standardisation			x	x	
Action 3 : proposer et appuyer des appels à projets innovants sur les CPS	x			x	
Action 4 : favoriser les outils et briques fournis par l'écosystème	x			x	
Action 5 : sensibiliser et accompagner les PME pour l'intégration des CPS		x		x	x

[Note : l'action 2 doit pouvoir également avoir un impact sur l'Appui à l'intégration des CPS dans les PME françaises, sous réserve qu'elles puissent a minima être informées du contexte normatif et des standards]

Deux groupes d'action ressortent dans la mise en place des actions :

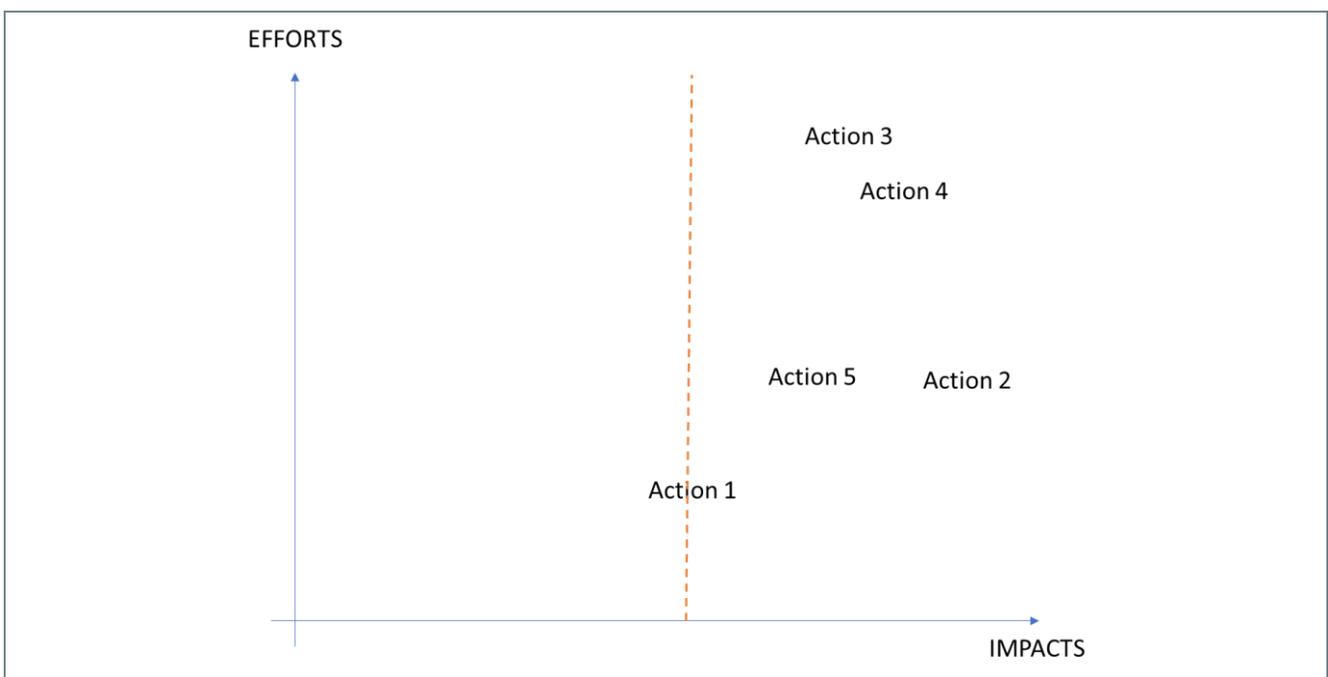
- des actions de structuration (efforts moyens ou faibles et priorité forte)
 - Action 1 : appuyer un lieu de convergence des forces vives de la filière et des écosystèmes
 - Action 2 : soutenir les travaux de labellisation et standardisation

Figure 36 - Hiérarchisation des actions selon les axes priorité et efforts (financement et moyen humain)



- des actions de musculation (efforts moyens et forts et impacts forts)
 - Action 3 : proposer et appuyer des appels à projets innovants sur les CPS
 - Action 4 : favoriser les outils et briques fournis par l'écosystème
 - Action 5 : sensibiliser et accompagner les PME pour l'intégration des CPS

Figure 37 - Hiérarchisation des actions selon les axes impacts et efforts (financement et moyen humain)



ANNEXES

Exemple des CPS dans le secteur de la santé

Description du secteur

Les CPS sont présents dans de nombreux domaines applicatifs hautement stratégiques pour nos économies. Les enjeux de la « smart city », de la « smart mobility », de la « smart production », ou encore de la « smart health », sont au cœur des préoccupations actuelles.

Le secteur de la santé est en train de devenir l'un des marchés d'avenir le plus prometteur, poussé par la recherche du bien-être, le développement de l'accès aux soins de santé et surtout la convergence de disciplines scientifiques. Les sciences médicales, pharmaceutiques et biotechnologiques travaillent conjointement pour fournir des solutions médicales et paramédicales toujours plus innovantes, et répondant aux besoins des populations.

En 2025, la population mondiale augmentera de 6 milliards d'individus à 8 milliards environ⁹⁷. De même, le vieillissement de la population entraîne de nouvelles problématiques. Le nombre de personnes âgées de 60 ans et plus dans le monde passera de 740 millions de personnes aujourd'hui à 2 milliards en 2050. Cela engendrera une augmentation des maladies chroniques et donc une hausse des demandes de soins. Les soins cliniques diminueront en faveur des soins ambulatoires ; les questions de dépendance et d'autonomie des personnes âgées seront alors centrales.

Le secteur médical connaît aujourd'hui un double enjeu : réduire les dépenses de santé grâce aux nouvelles technologies et augmenter la qualité des diagnostics grâce aux nouvelles techniques d'imagerie et d'analyse médicale. Le marché français de l'e-santé était estimé entre 2,2 et 3 milliards d'euros en 2016. On considère que le chiffre d'affaires mondial du secteur de la Silver Économie doublera, passant de 6 milliards d'euros en 2010 à 11 milliards d'euros en 2020⁹⁸.

Aussi, le secteur de la santé se transforme pour répondre à ces nouveaux enjeux. Les produits et services basés sur la technologie numérique deviennent donc centraux dans ce secteur.

Place des CPS dans ce secteur

Les systèmes cyberphysiques sont au cœur du développement de ce nouveau modèle de santé qui cherche à résoudre les défis liés à l'augmentation et au vieillissement de la population, ainsi qu'au coût croissant des systèmes de santé.

L'essor de l'internet des objets, le déploiement du *Big data* dans l'analyse des données médicales ainsi que l'automatisation de certaines tâches à faible valeur ajoutée permettent d'ores et déjà de rendre ce secteur « intelligent » et « communicant ».

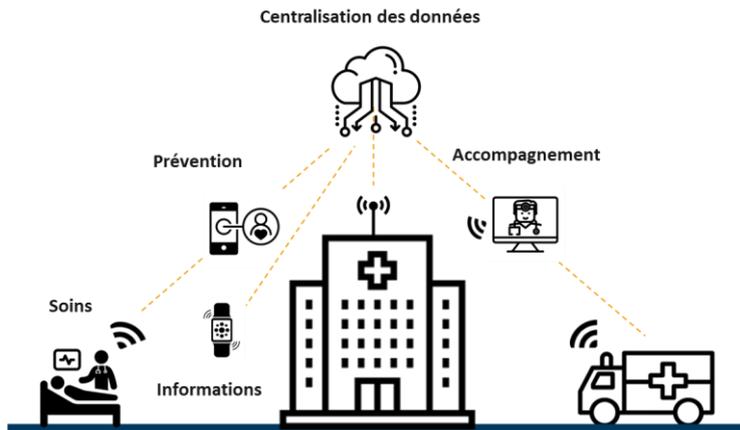
De nombreuses innovations dans l'imagerie médicale ont été permises grâce à l'essor de l'IA. Le CHU de Dijon, par exemple, a récemment adopté la technologie développée par Canon Medical Systems. Cette dernière permet d'améliorer la reconstruction tomographique des scanners et donc de réaliser des diagnostics plus rapidement. L'objectif de cette innovation est d'apprendre au scanner à distinguer le vrai signal des perturbations exogènes, telles que le bruit. Pour ce faire, un réseau de neurones a été entraîné sur de grandes quantités d'images de haute qualité, obtenues par un algorithme. Le réseau est donc capable d'améliorer la qualité des images reconstruites à partir des données captées par le scanner.

Ces nouvelles technologies participent également à diminuer le coût des soins de santé. Selon le rapport Road2CPS, les outils digitaux devraient diminuer les coûts des soins médicaux de 10% en Europe. Le déploiement des CPS à grande échelle pourrait alors contribuer à atteindre cet objectif.

⁹⁷ Road2CPS

⁹⁸ ARTEMIS

Figure 6 – Modélisation de la santé connectée



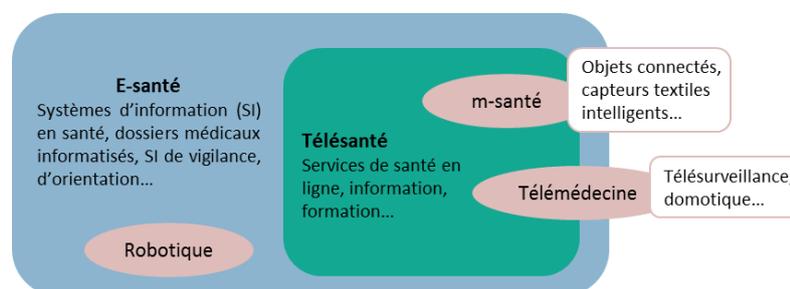
Source : modélisation de Katalyse

La santé numérique, ou e-santé, fait référence à « l'application des technologies de l'information et de la communication (TIC) à l'ensemble des activités en rapport avec la santé⁹⁹ ». D'une manière générale, l'e-santé englobe les innovations d'usages des technologies de l'information et de la communication à l'ensemble des activités en rapport avec la santé. Elle contribue à améliorer le système de santé en optimisant le parcours de soins. Le soin n'est plus central puisque le nouveau parcours de soins, permis par les nouvelles technologies, intègre désormais la prévention, l'accompagnement et l'information. Ainsi, l'e-santé participe à assurer une continuité dans la prise en charge. Les frontières entre la prévention, le soin, l'accompagnement et l'information s'amenuisent en faveur d'un accompagnement plus personnalisé et spécifique aux besoins de chaque patient.

Aussi les nouvelles technologies influencent le système de santé actuel. Les progrès récents dans les objets connectés, dans la robotique, dans les capteurs biologiques et dans l'imagerie médicale, entre autres, ont permis de développer la e-santé et la m-santé. Ces nouvelles technologies élargissent l'offre de soins en s'affranchissant des barrières matérielles et en modifiant les relations entre professionnels de santé et patients.

La figure ci-dessous illustre la vision schématique de l'e-santé et l'interconnexion de ces nouvelles activités et nouveaux services.

Figure 7 – Le champ d'action de la e-santé



Source : Conseil de l'Ordre des Médecins (2015)

La télésanté comprend l'utilisation des outils de production, de transmission, de gestion et de partage d'informations numérisées au bénéfice de pratiques médicales et médico-sociales¹⁰⁰. De nombreux outils connectés sont développés dans le but de parfaire la transmission des informations.

⁹⁹ Définition retenue par la Commission européenne

¹⁰⁰ Définition du Rapport Lasbordes 2010

C'est le cas de la société Mauna Kea Technologie, par exemple qui a mis au point un outil de biopsie optique qui aide les chirurgiens dans leur prise de décision lorsqu'ils sont en train d'opérer. La fibre optique présente dans l'outil montre des images de l'intérieur du corps humain, permettant aux chirurgiens de visualiser précisément la localisation des cellules cancéreuses à soigner.

Quant à la télémédecine, elle définit cinq champs de compétences: la téléconsultation, la téléexpertise, la télésurveillance médicale et la téléassistance médicale. Elle facilite l'accès aux soins en offrant aux patients la possibilité de s'affranchir de contraintes logistiques pour consulter des spécialistes. C'est le cas de la télésurveillance médicale qui permet à un professionnel de santé d'interpréter à distance les données nécessaires au suivi médical d'un patient et, le cas échéant, de prendre des décisions relatives à la prise en charge de ce patient. L'enregistrement et la transmission des données peuvent être automatisés ou réalisés par le patient lui-même ou par un professionnel de santé¹⁰¹.

Les systèmes cyberphysiques présents dans les applications et les dispositifs médicaux améliorent ainsi la précision des diagnostics et de simplifier le suivi des patients et des traitements délivrés. Ils permettent aux utilisateurs de gérer leur santé de manière plus directe et personnalisée.

Enjeux spécifiques des CPS

Si les nouvelles technologies vont jouer un rôle indéniable dans l'essor de la médecine prédictive, le partage des données, la coordination des différents acteurs et la création de synergies entre *start-up*, grands groupes, laboratoires, hôpitaux et professionnels de santé sont tout aussi importants.

Toutefois, le développement des technologies numériques dans le secteur de la santé renforce les exigences de sécurité. Il s'agit de pouvoir garantir l'efficacité de ces outils et l'intégrité des données sensibles qu'ils contiennent. La sécurité des données médicales présente un enjeu de taille, tant d'un point de vue technique qu'en termes d'acceptation par les utilisateurs. Les usages des CPS dans le domaine de la santé ne pourront s'ancrer durablement dans les pratiques sans un environnement de confiance.

En effet, une méfiance persiste, car ces objets connectés soulèvent des questions face à l'ouverture des données de santé en raison de leur caractère sensible. De nombreuses informations transitent *via* ces outils (habitudes alimentaires, rythmes du sommeil, tension, poids...), parfois même sans que les utilisateurs en soient conscients. Les risques de dérives sont réels, pas uniquement pour des raisons de piratage informatique, mais aussi pour des questions de discrimination. Cet environnement ouvert suppose donc que les utilisateurs, patients et professionnels de santé, soient guidés dans leurs choix de solutions et puissent vérifier quelles garanties de qualité et de fiabilité entourent les applications et les objets connectés. Ainsi, pour que ces nouveaux outils innovants soient véritablement acceptés, la formation des soignés et des soignants est nécessaire. Cette approche pédagogique est essentielle pour que l'e-santé se répande à grande échelle.

Les systèmes de santé et les réglementations hétérogènes en Europe constituent également un obstacle au déploiement et à l'acceptation de ces nouvelles technologies. Le développement d'architectures informatiques perfectionne la chaîne de valeur des opérateurs en facilitant l'analyse, l'échange des informations et l'interopérabilité des systèmes. L'Open Innovation est donc centrale dans le développement de ces technologies. Afin d'encourager la collaboration entre fournisseurs privés et publics, à différentes échelles, ces questions réglementaires doivent être traitées, car il semblerait que de nombreux facteurs extrinsèques aux nouvelles technologies peuvent impacter le déploiement des CPS dans le domaine de la santé.

L'avènement de l'intelligence artificielle, l'évolution collaborative de la pratique médicale, ainsi que l'entrée de nouveaux acteurs dans la chaîne de valeur, telles que les *start-up*, concourt à l'émergence de nouveaux usages. Le secteur de la santé semble évoluer vers une santé personnalisée, prédictive, préventive et participative, dans laquelle les hommes et les technologies seront liés.

¹⁰¹ Définition du Code de la santé publique

Méthode de calcul du nombre d'emplois dans la filière CPS

Pour calculer le poids des emplois autour des CPS en France, nous avons choisi la méthode suivante :

Tout d'abord, nous utilisons Production par branche à prix courants (en milliards d'euros) proposé par l'Insee. L'analyse de la production repose sur un découpage de l'économie par regroupement de tous les producteurs exerçant des activités de même nature. La nomenclature d'activité sur laquelle repose le découpage de l'économie est la Nomenclature d'Activités française - révision 2 (NAF rév.2).

Le fichier de départ utilise la nomenclature A38. Il a été choisi les activités suivantes :

- activités informatiques et services d'information ;
- activités juridiques, comptables, de gestion, d'architecture, d'ingénierie, de contrôle et d'analyses techniques ;
- autres industries manufacturières ; réparation et installation de machines et d'équipements ;
- fabrication d'équipements électriques ;
- fabrication de machines et équipements n.CA. ;
- fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques ;
- métallurgie et fabrication de produits métalliques, hors machines et équipements ;
- recherche-développement scientifique ;
- fabrication de matériels de transport.

Pour chacune des activités, une part en pourcentage de la fabrication a été attribuée aux CPS à partir des entretiens et de la littérature.

Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques	45,0%
Fabrication d'équipements électriques	20,0%
Fabrication de machines et équipements n.CA.	15,0%
Fabrication de matériels de transport	15,0%
Autres industries manufacturières ; réparation et installation de machines et d'équipements	13,0%
Activités informatiques et services d'information	12,0%
Activités juridiques, comptables, de gestion, d'architecture, d'ingénierie, de contrôle et d'analyses techniques	7,0%
Recherche-développement scientifique	1,0%
Métallurgie et fabrication de produits métalliques, hors machines et équipements	0,2%

Puis une base complémentaire propriétaire de Katalyse a permis de convertir la production des CPS de milliards d'euros en emplois en utilisant la production moyenne des emplois de l'activité.

Katalyse estime aujourd'hui que plus de 580 000 emplois sont sur des sujets traitants des CPS dont 110 000 en lien avec l'électronique et le secteur électrique.

Sur un périmètre proche de celui de l'OPIIEC, le Taux de croissance annuel Moyen (TCAM) serait de plus de 5,2 par an contre 3,3 estimé à l'époque par l'OPIIEC.

Les actions recommandées pour une filière des CPS forte et rayonnante :

ACTION 1 : APPUYER UN LIEU DE CONVERGENCE DES FORCES VIVES DE LA FILIÈRE ET DES ÉCOSYSTÈMES	
AXE PRIORITAIRE	NIVEAU DE PRIORITÉ
STRUCTURATION DE L'ÉCOSYSTÈME POUR UNE RÉPONSE COHÉRENTE ET PUISSANTE	MOYEN
ENJEUX	
<p>Embedded France est l'association des représentants Français des logiciels et systèmes embarqués. Association loi de 1901, son objectif est de développer l'emploi dans la filière française des systèmes et logiciels embarqués et de contribuer à la compétitivité de ce secteur. Cependant, ses ressources et son périmètre d'action actuel ne lui permettront pas de porter les actions sur un domaine aussi vaste que les CPS.</p> <p>En dehors des pionniers des CPS qui savent trouver les bons partenaires (entreprises et laboratoires), les acteurs, dont les PME, ont des difficultés pour s'intégrer dans cette filière. Sans une structuration de la filière, les actions continueront à être menées en silo. Les benchmarks des pays ont démontré l'importance d'un collectif de travail pour réussir à imposer sa filière sur l'échiquier mondial.</p> <p>Les CSF apparaissent comme les pierres angulaires de toutes les démarches de développement des filières dans les années futures. Il est donc essentiel de positionner Embedded France comme voix des acteurs des CPS notamment auprès du CSF de l'Industrie Electronique. Embedded France peut s'appuyer sur les outils phares permettant d'appréhender les six leviers d'action du CSF « Industrie Électronique », validés par le Conseil national de l'industrie (CNI) et formalisés dans le contrat stratégique de filière : l'innovation, l'industrie électronique du futur, la diffusion de l'électronique, les compétences et emplois, l'international et l'intelligence artificielle.</p> <p>Du fait du périmètre technologique large des CPS, il est important de structurer les démarches en lien avec les actions menées sur l'industrie du futur et l'intelligence artificielle. De ce fait, un rapprochement doit être mené sur les actions portées par les entités Hub France IA, l'Alliance Industrie du Futur et Embedded France.</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> • Entreprises (PME ET DO) • Fédérations • Laboratoires publics • Centres de recherche privés • Start-ups 	<ul style="list-style-type: none"> • Fin 2020 pour le nouveau périmètre et sa gouvernance • Marketplace: début 2021
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Créer une réelle communauté autour de l'intérêt pour les CPS, accessible aussi bien aux pionniers qu'aux entreprises en cours de consolidation, aux prestataires, aux acteurs de la recherche et de la formation • Favoriser la visibilité d'un écosystème et la dynamique des échanges • Devenir la voix des acteurs des CPS auprès des différents CSF et proposer des actions et leurs modalités dans le cadre de ces CSF • Développer les relations avec l'Alliance Industrie du Futur, Hub France IA et d'autres groupements (ex celui de la FIEEC sur la liaison avec le bâtiment ou encore ceux du SYNTEC Ingénierie, SYNTEC numérique et de la fédération du bâtiment ou encore la <i>Smart building Alliance</i>) • Décloisonner les « silos » sectoriels 	

- Permettre aux entreprises impactées de trouver des ressources sur les sujets qui les animent
- Permettre aux prestataires et fournisseurs de solutions de se rendre visibles auprès des donneurs d'ordres

CONTENU

Le lieu totem, sur le modèle de CPS4EU, facilite les échanges, crée le sentiment d'appartenance et pose le cadre d'échanges transversaux aux organisations de branches ou de filières (syndicats, pôles et clusters, etc.). Le lieu peut alors s'articuler avec l'ensemble des acteurs et des métiers pour ne pas réinventer des actions et ressources, mais au contraire mutualiser les initiatives tout en les décloisonnant.

Il doit être le lieu d'initiatives et de discussion. Il met en place des ressources d'animation de la communauté des CPS en France et facilite les coopérations ; développe des actions de sensibilisation, de réflexion prospective ; et des services de formation. Il continue à proposer un programme de conférences mobilisant l'écosystème des CPS national et européen.

Une des fonctions essentielles du lieu totem, au regard de ses objectifs, sera de contribuer à irriguer l'ensemble des secteurs touchés pour atténuer les disparités.

Embedded France apparaît comme la structure idéale à faire évoluer dans ce sens. Cependant, une révision des objectifs est à prévoir et des modalités de fonctionnement. Notamment de la structuration d'Embedded France qui ne s'appuie que sur l'expertise externe et peu sur des ressources internalisées. Cette structuration augmente considérablement le risque dans l'animation de la filière.

D'autres actions autour de la veille et de normalisation/homologation devront être portées comme le montre les benchmarks précédents.

La place d'Embedded France dans l'écosystème lui confère une oreille attentive dans le CSF « Industrie Electronique ». Il est primordial de continuer à développer cette relation dans le CSF notamment en offrant un appui à la réflexion, en soulignant la diversité des membres et en proposant des actions à mener.

CONTRIBUTEURS

- Embedded France
- CAP'TRONIC
- DGE
- Pôles de compétitivité
- Alliance Industrie du Futur
- Hub France IA
- Fédérations professionnelles
- Entreprises

FINANCEMENT

- La question de l'appel à cotisations est soulevée. Les entreprises sont déjà fortement sollicitées et l'introduction de cotisations est susceptible de freiner l'adhésion, notamment de PME.
- Fonctionnement : besoin d'un ETP pour l'animation de la filière au minimum
- Augmentation des fonds : objectif 100k€ par an pour des actions à mener

ACTION 2 : SOUTENIR LES TRAVAUX DE LABELLISATION ET STANDARDISATION	
AXES PRIORITAIRES	NIVEAU DE PRIORITÉ
DÉVELOPPEMENT D'UNE RÉPONSE POUR LE MAINTIEN DE LA SOUVERAINETÉ TECHNOLOGIQUE FRANÇAISE	ELEVE
ENJEUX	
<p>Les benchmarks notamment ceux de l'Allemagne et des États-Unis ont montré l'importance d'actions au profit de la standardisation et de l'homologation de solutions. Dans le même temps, il a été constaté un positionnement faible des acteurs français dans les lieux de réflexion et de décision. Une petite partie des entreprises participe à ces réflexions, celles-ci étant dispendieuses (expertises, déplacements, travaux...). Beaucoup d'entreprises ont renoncé à intégrer ces groupes de travail. Cependant, des groupes de travail comme ceux de l'Alliance de l'Industrie du Futur par exemple participent à ces échanges et mettent en avant des solutions technologiques en adéquation avec les futures attentes. Un retard sur des critères permettant l'industrialisation de solutions limite le rayonnement de la filière française à travers le monde.</p> <p>La labellisation et la standardisation sont des solutions évoquées pour stabiliser l'innovation et le développement de la filière sur les marchés, mais il existe également d'autres manières de pousser au développement des CPS. C'est le cas du bâtiment où la norme Réglementation Thermique 2020 prône l'utilisation intelligente de l'énergie, poussant ainsi les nouveaux systèmes des <i>smart building</i> ou encore des cadres de référence comme le propose la <i>Smart building Alliance</i> pour les bâtiments du tertiaire (CAP R2S).</p> <p>Rappelons également que les acteurs américains et chinois développent rapidement de nouvelles règles pour leurs propres marchés et sur lesquelles il faudra être vigilant dans les années futures (Les constructeurs allemands ont en effet tous accepté d'utiliser des fournisseurs de cartes et de données chinoises durant leur test de voitures autonomes sur le territoire chinois, au détriment de leur propre système international¹⁰²).</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> • Entreprises utilisatrices • Donneurs d'ordre • Start-ups • Législateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • 2021
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Répondre aux exigences de régulation, de responsabilité et de confiance • Proposer une réponse propice aux entreprises françaises • Déterminer le niveau attendu des CPS • Créer des cadres de référence • Porter la vision des entreprises françaises dans les instances internationales • Développer une veille active pour les marchés américains et chinois • Préparer les lieux d'expérimentation de pratique 	
CONTENU	
<p>Il a été décidé que la participation que l'action 2 portait sur la labellisation et la standardisation. Les questions de normalisation étant trop dispendieuses. Les acteurs notamment Embedded France n'avaient pas les capacités financières pour accompagner ce type de démarche.</p>	

¹⁰² <https://www.lesechos.fr/tech-medias/intelligence-artificielle/voiture-autonome-les-constructeurs-allemands-se-testent-discretement-en-chine-140067>

Les actions sont multiples et peuvent dépendre notamment des ressources envisagées :

- proposition d'une échelle de maturité des CPS (comme celle existant sur la voiture autonome) et développer une grille de test permettant de proposer par la suite une labellisation des produits CPS ;
- création de cadres de référence pour compléter ceux existant dans le bâtiment ;
- préparation et participation à des réunions ciblées sur des sujets de standardisation en complément de ceux portés par les autres groupes de travail français ;
- création d'une veille commune des avancées des réflexions pour interpréter les évolutions en cours ;
- proposition au CSF d'une commission sur la maîtrise et la sécurisation des données.

Les sujets appuyés par Embedded France pourront être débattus avec les différents groupes de travail internes (notamment le GT2) à l'association pour prioriser les sujets à suivre.

CONTRIBUTEURS	FINANCEMENT
<ul style="list-style-type: none">• Embedded France• Laboratoires publics et centres de recherche privés• Donneurs d'ordre• SYNTEC Numérique• Constructeurs automobiles• Fédération du bâtiment	<ul style="list-style-type: none">• En lien avec l'action 1• 40/50 k€ par an et par action à mener

ACTION 3 : PROPOSER ET APPUYER DES APPELS À PROJETS INNOVANTS SUR LES CPS	
AXE PRIORITAIRE	NIVEAU DE PRIORITÉ
FORTIFICATION DES APPORTS FRANÇAIS SUR LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES	ÉLEVÉ
ENJEUX	
<p>La filière a été soutenue sur les questions de la recherche pour les systèmes embarqués ces dernières années et de nombreux projets ont été portés (BPI, IRT, BGLE, FUI, RAPID, Horizon 2020...). Cependant, les briques technologiques se complexifient et doivent être de plus en plus combinées. De plus, le diagnostic a souligné une recherche de qualité, mais en silo. Il faut ajouter que les futurs projets vont devoir s'appuyer sur des recherches différentes de celles habituellement utilisées (santé, ergonomie, IA, matériaux...). En dehors des donneurs d'ordre, l'écosystème composé de <i>start-up</i>, TPE et PME a une dynamique relativement discrète. La méconnaissance des acteurs et des spécificités des acteurs ne permet pas :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ de faire connaître les savoir-faire développés ; ○ de proposer des offres complexes ; ○ d'imposer des solutions techniques dans les secteurs applicatifs. <p>La capacité d'innovation de l'économie française est un déterminant majeur de son potentiel de croissance et de création d'emploi. Face aux programmes d'investissements massifs en R & D des autres grands pays. C'est dans ce sens que le Conseil de l'innovation vise à bousculer les idées et faire émerger les initiatives et les structures qui constitueront la clé de voûte de l'innovation de demain, dans une perspective à la fois nationale et européenne. En assumant une prise de risque élevée ayant pour corollaire une acceptation de l'échec, il fixe les priorités stratégiques en termes de politiques d'innovation. Embedded France peut alors proposer des actions auprès des grands défis soutenus par le Conseil d'Innovation, notamment : Comment automatiser la cybersécurité pour rendre nos systèmes durablement résilients aux cyber-attaques ? Puisque ce grand défi débouchera sur des solutions novatrices au profit des entreprises et des particuliers pour : évaluer la vulnérabilité des systèmes embarqués ; détecter des anomalies dans des flux réseaux et anticiper les attaques ; corriger automatiquement les failles logicielles, qui sont utilisées par les pirates comme « chevaux de Troie » et mettre en place de nouvelles stratégies d'immunisation des réseaux informatiques. Cet exemple montre bien la future finesse des relations d'Embedded France avec les écosystèmes de la recherche et de l'innovation en France en proposant non pas un positionnement passif mais proactif sur des sujets du futur où les CPS se positionnent.</p> <p>CPS4EU, est un grand projet proposant d'aborder les problèmes techniques et organisationnels de manière intégrée. Par conséquent, CPS4EU favorise un haut niveau de partage, dans le cadre du programme Ecsel pour permettre à l'industrie européenne de diriger des marchés stratégiques basés sur les technologies CPS. L'objectif ultime de CPS4EU est de renforcer la chaîne de valeur CPS en créant des PME européennes de classe mondiale et en fournissant des technologies CPS qui à leur tour soutiendront le leadership des grands groupes européens dans les secteurs économiques clés et, de cette manière, stimuleront des produits innovants pour soutenir la numérisation massive.</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> • Conseil d'innovation et autres structures portant le devenir de l'innovation en France • Laboratoires publics • Centres de recherche privés • Entreprises 	<ul style="list-style-type: none"> • 2020 ; 2022 ; 2024
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Proposer des appels à projets sur des thématiques particulières auprès des acteurs financeurs 	

- Pousser aux travaux de recherche mutualisés entre plusieurs laboratoires et notamment en intégrant une logique multidisciplinaire
- Tester plusieurs solutions technologiques en condition semi-réelle ou en condition réelle
- Inciter les travaux collaboratifs entre laboratoires et entreprises (notamment les PME)

CONTENU

CPS4EU est un grand projet incontournable dans la réussite des évolutions des CPS. Ce grand projet doit être appuyé pour développer quatre technologies habilitantes clés (informatique, connectivité, détection, systèmes coopératifs), intégrer des modules CPS grâce à des architectures et des outils de conception pré-intégrés et enfin instancier des architectures dans des cas d'utilisation dédiés à partir d'applications stratégiques: automobile, réseau intelligent et automatisation industrielle.

Les appels à projets doivent éviter le saupoudrage des financements en ciblant des sujets précis. Ceux-ci pourraient faire débat dans le lieu de l'action 1. Les participants aux travaux ont donné certains thèmes : le véhicule semi-autonome sous certaines conditions d'utilisation, la gestion de flotte de véhicules autonomes taxis, la sécurisation des données dans les bâtiments ou la relation entre les infrastructures du bâtiment et le *cloud*, la meilleure utilisation des données dans la maintenance industrielle, la simulation d'un système complet... mais il faudra probablement être bien plus précis dans les propositions aux financeurs.

Ces projets doivent pousser au décloisonnement des travaux par des réponses communes, mais également être multidisciplinaires (ex. : communication et interfaçage avec laboratoires santé et data)

Ces projets mettront en avant les difficultés soulignées durant l'état des lieux de ce document : *Edge computing*, frugalité énergétique, sécurisation automatisée des systèmes, sûreté des systèmes complexes, human in the loop, conception et design des CPS (notamment sur les technologies non matures ou encore la co-ingénierie des CPS.

Les grands défis sont des exemples sur lesquels la filière doit s'appuyer en étant force de proposition sur des programmes d'innovation à développer.

Enfin, organiser des challenges ouverts et des bourses aux technologies peut permettre de répondre à des besoins des entreprises et de la société, en complément des actions de fond de montage de projets collaboratifs, de laboratoires communs et de structures agiles d'échange et de transfert pour soutenir la rencontre entre recherche et entreprise. Les appels à projets incluront un volet sur la communication, condition importante pour l'appropriation et le transfert des systèmes des CPS. Ces challenges peuvent facilement avoir une portée internationale (exemple du challenge de la Darpa pour des CPS utilisables à distance et tester dans des tunnels¹⁰³) s'ils sont correctement organisés et pertinents en termes d'application. Ils permettront, non seulement le benchmark des solutions, mais aussi d'assurer la visibilité et le rayonnement de la France.

CONTRIBUTEURS

- Embedded France
- CSF
- Pôles de compétitivité
- Caisse des Dépôts

FINANCEMENT

- Besoin estimé de l'aide publique : 50 millions d'euros sur 3 ans

¹⁰³ <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7477>

ACTION 4 : FAVORISER L'ÉMERGENCE DES OUTILS ET BRIQUES FOURNIS PAR L'ÉCOSYSTÈME	
AXE PRIORITAIRE	NIVEAU DE PRIORITÉ
FORTIFICATION DES APPORTS FRANÇAIS SUR LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES	ÉLEVÉ
ENJEUX	
<p>De nombreuses briques ne sont pas adaptées aux CPS. Souvent développés pour d'autres utilisations, elles ne sont ni efficace et ni efficiente sur les problématiques de l'automobile, du bâtiment ou de l'industrie; filières qui ont été étudiées précédemment dans le document. Aujourd'hui, le développement de briques, d'outils et d'algorithmes n'est pas la priorité des acteurs de la filière qui portent le marché. C'est l'intégration qui prime plutôt que le développement, or la spécificité des secteurs applicatifs et les besoins particuliers vont pousser les acteurs à travailler sur ce sujet. Il serait alors regrettable de multiplier les projets sans mutualiser les résultats. Ces briques sur étagère permettront aussi de positionner la filière dans l'échiquier mondial. Les initiatives existantes, même les plus reconnues, ont du mal à obtenir des financements dans le cadre des AAP.</p> <p>Pour la voiture autonome, qui se trouve être le sujet le plus avancé, une quantité colossale de codes et, par exemple, de données en open source notamment en IA sponsorisés par les grands groupes (Udacity, Google, OpenAI) est disponible. Il s'agirait également d'y participer en accompagnant les initiatives des constructeurs français pour les positionner au mieux sur le secteur. En effet, le soutien du secteur nécessite un co-investissement public-privé conséquent sur ce domaine en prenant en compte également les autres technologies des CPS.</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> • Laboratoires • Centre de recherches • Entreprises 	<ul style="list-style-type: none"> • 2020 - 2025
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Proposer des systèmes de simulation de l'intégralité d'un CPS ou d'un système de CPS • Développer des outils, algorithmes et briques spécifiques au CPS • Favoriser leur dissémination en finançant des évènements de formation 	
CONTENU	
<p>Des outils de conception, de virtualisation et notamment de test dans des environnements ouverts et complexes doivent continuer à être développés. Des alliances industrielles doivent proposer une offre technologique et un modèle économique qui permet la diffusion de l'utilisation des modèles dans le monde des systémiers et les intégrateurs de systèmes. Les travaux menés par les groupes de travail d'Embedded France doivent continuer dans ce sens.</p> <p>Il faut également proposer des briques intégrables aux structures électroniques et des algorithmes spécifiques pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • faciliter l'interfaçage, • améliorer l'interopérabilité, • sécuriser des données entre les différentes couches et infrastructures, • rendre sur les systèmes temps réel et communicants, • améliorer les phases de test, • diminuer les besoins énergétiques, • gérer les données pour la création de nouveaux services. <p>Ces travaux doivent être faits en lien avec la filière électronique, les ESN et les ICT pour faciliter l'intégration.</p>	

CONTRIBUTEURS	CONTRIBUTEURS
<ul style="list-style-type: none"> • Laboratoires publics • CSF « Industrie Electronique » • Centres de recherche privés • Entreprises • Filière électronique et syndicats représentants 	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratoires publics • CSF « Industrie Electronique » • Centres de recherche privés • Entreprises • Filière électronique et syndicats représentants

ACTION 5 : SENSIBILISER ET ACCOMPAGNER LES PME POUR L'INTÉGRATION DES CPS	
AXE PRIORITAIRE	NIVEAU DE PRIORITÉ
APPUI A L'INTÉGRATION DES CPS DANS LES PME FRANÇAISE	MOYEN
ENJEUX	
<p>Dans la majorité des entreprises, les cadres et dirigeants des entreprises ne sont que peu sensibilisés aux nouvelles approches rendues possibles par les CPS en particulier, ou plus généralement par la numérisation des produits et des fonctions de l'entreprise. Le retour sur investissement est donc difficile à anticiper.</p> <p>Le premier besoin pour inciter les entreprises à innover est donc de leur faire connaître les bénéfices possibles de la technologie et des outils qui l'utilisent, basés sur des informations issues du terrain.</p> <p>L'enjeu est de s'appuyer sur un réseau d'acteurs dont CAP'TRONIC permettant de diffuser la connaissance sur les CPS au sein de différents écosystèmes, et de travailler sur le développement d'actions régulières et continues pour maximiser leurs impacts.</p> <p>Les entreprises, qui ne sont pas les premières adoptantes de technologies, ne viendront pas d'elles-mêmes se confronter à la question des CPS sans une démarche proactive du réseau des accompagnateurs. Par ailleurs, l'accompagnement des entreprises au sein d'un réseau d'accompagnateurs nécessite de partager un cadre de référence, de coordonner et documenter l'action. L'enjeu est de permettre une efficacité de l'action la plus forte possible.</p> <p>Les entreprises sont très peu au fait du potentiel de compétitivité supplémentaire permis par les CPS notamment dans l'industrie du futur, la gestion des flottes et les bâtiments. Compte tenu des impacts attendus sur la compétitivité des entreprises en fonction de leur timing de prise en compte de ces avancées, il est essentiel qu'elles y soient sensibilisées, puis accompagnées pour les aider à définir, à lancer et à réussir leurs premiers projets.</p> <p>Seul l'apport de conseil expert permet d'aller plus loin dans la définition des sujets d'intérêt, du potentiel retour sur investissement et du mode opératoire du projet.</p> <p>L'état des lieux a montré un retard d'intégration des technologies CPS dans les trois marchés applicatifs notamment dans le bâtiment et l'industrie. Dans ces deux marchés, les TPE et PME n'ont que peu de soutien d'une grappe ou d'un donneur d'ordre pour réussir leur transformation.</p> <p>Cette action pourra s'articuler avec l'offre de prêts « Industrie du futur », proposée par Bpifrance, qui vise à soutenir le financement des investissements innovants destinés à l'appareil productif. Ces prêts sont sans garantie, et peuvent être bonifiés pour les PME et les ETI dont le remboursement s'opère avec un différé de deux ans. Deux enveloppes ont été mobilisées soit 1,2 Md€ en 2015 et 1 Md€ en 2016.</p> <p>En 2017, BPI France a apporté, au global, 430 M€ de soutien aux entreprises dont 47 % pour les entreprises du secteur numérique soit environ 200 M€. L'électronique a représenté 41 M€.</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> • Start-ups • PME innovantes • PME 	<ul style="list-style-type: none"> • 2021
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Promouvoir les usages pertinents des CPS en s'appuyant sur les expertises existantes et les projets déjà engagés dans les entreprises (numérisation des produits et des fonctions de l'entreprise). • Sensibiliser les entreprises françaises en s'appuyant sur les cas d'usage identifiées parallèlement dans des entreprises similaires (en taille & marchés visés) et les accompagner dans l'identification des voies d'innovation les plus pertinentes et profitables, pour les conduire à lancer un premier projet. 	

- Faciliter la mise en relation avec les « sachants » les plus pertinents par rapport aux voies d'innovation identifiées en favorisant les partenariats
- Proposer la réalisation des premiers tests et essais : pour démontrer les apports des CPS et engager l'appropriation des CPS par les équipes des ETI/PME ;
- Accompagner la mise en œuvre des projets d'intégration des technologies CPS : soutien à la modernisation des ETI/PME ;
- Favoriser l'expérimentation et la diffusion des retours d'expériences divers ;
- Diversifier les réponses technologiques de la filière française ;
- Soutenir le passage de cap des entreprises et pépites souhaitant s'inscrire dans une stratégie de mutation en aidant leurs projets d'investissement sur des CPS ;
- Accompagner des projets de développement technologique particulièrement innovants autour de la maîtrise de la chaîne numérique et les changements organisationnels liés ;
- Favoriser des projets de développement (véhicules semi-autonomes, *smart building* ou de création de sites industriels liés à des enjeux forts de modernisation) en appréhendant les projets dans leur globalité.

CONTENU

L'action porte en premier lieu sur l'identification et la formalisation de retours d'expériences sur projets exemplaires de déploiement de solutions basées sur les CPS comme une vitrine. Elle repose donc sur la volonté des entreprises pionnières de partager leur expérience avec leurs pairs, du même secteur d'activité ou d'autres secteurs, et de valoriser ainsi indirectement leurs démarches et leurs savoir-faire. La valeur de démonstration et de sensibilisation de ces retours d'expérience repose sur :

Une information complète, du point de vue des entreprises :

- motivation à déployer les CPS (critères de décision) ;
- étapes du projet de l'idée à la réalisation ;
- prérequis pour le projet (ex : disponibilité de données structurées sur les process cibles, ressources internes indispensables, etc.) ;
- contexte normatif, réglementaire et standards
- difficultés rencontrées et solutions ;
- partenaires mobilisés ;
- nature des développements réalisés ;
- retours sur investissement (quantitatif idéalement) ...

Elle doit s'appuyer sur un cadre méthodologique capitalisant les retours d'expérience et permettant d'optimiser l'intervention des intervenants nécessaire à l'accompagnement des entreprises (depuis les phases de sensibilisation, d'identification des projets les plus prometteurs, d'expérimentation puis de mise en œuvre et d'industrialisation).

CAP'TRONIC apparait comme l'acteur incontournable pour la réussite de l'intégration des CPS du fait de sa couverture nationale, de sa neutralité par rapport à l'offre et de sa capacité à sensibiliser et à accompagner les PME en lien avec les acteurs locaux. Le but des actions d'accompagnement est de soutenir les PME et les ETI dans leurs projets de modernisation, en particulier sur les aspects suivants : les fonctions et la valeur attendues ; les solutions d'intégration des technologies retenues ; le plan d'affaires et le plan de financement, y compris les éventuelles possibilités de recours à des dispositifs incitatifs et la conduite du changement sur les plans RH, formation, organisation et techniques.

L'incitation financière est le vecteur le plus efficace pour favoriser les expérimentations et l'intégration. Les acteurs ayant une marge de manœuvre sur cette dimension sont peu nombreux.

Les projets financés pourront porter sur des développements techniques comme sur des expérimentations de déploiement sur des marchés applicatifs

La finalité étant aussi le retour d'expérience notamment sur les briques sur étagère, il est important d'assortir ces financements de conditions pour les attributaires en termes d'obligation d'information :

- résultats de l'expérimentation ;
- évaluation de retour sur investissements ;
- points durs et facteurs clés de succès ;

Etc.

CONTRIBUTEURS	FINANCEMENT
<ul style="list-style-type: none">• CAP'TRONIC• Embedded France• Donneurs d'ordre• PME spécialisées	<ul style="list-style-type: none">• Financement des accompagnements à sanctuariser

ACTION 6 : AMÉLIORER L'ACCOMPAGNEMENT DES PME ET LA DESTINATION DES FONDS EXISTANTS POUR L'INTÉGRATION DES CPS	
AXE PRIORITAIRE	NIVEAU DE PRIORITÉ
APPUI A L'INTÉGRATION DES CPS DANS LES PME FRANÇAISE	MOYEN
ENJEUX	
<p>Les entreprises, qui ne sont pas les premières adoptantes de technologies, ne viendront pas d'elles-mêmes se confronter à la question des CPS sans une démarche proactive du réseau des accompagnateurs. Par ailleurs, l'accompagnement des entreprises au sein d'un réseau d'accompagnateurs nécessite de partager un cadre de référence, de coordonner et documenter l'action. L'enjeu est de permettre une efficacité de l'action la plus forte possible.</p> <p>Les entreprises sont très peu au fait du potentiel de compétitivité supplémentaire permis par les CPS notamment dans l'industrie du futur, la gestion des flottes et les bâtiments. Compte tenu des impacts attendus sur la compétitivité des entreprises en fonction de leur timing de prise en compte de ces avancées, il est essentiel qu'elles y soient sensibilisées.</p> <p>Seul l'apport de conseil expert permet d'aller plus loin dans la définition des sujets d'intérêt, du potentiel retour sur investissement et du mode opératoire du projet.</p> <p>L'état des lieux a montré un retard d'intégration des technologies CPS dans les trois marchés applicatifs notamment dans le bâtiment et l'industrie. Dans ces deux marchés, les TPE et PME n'ont que peu de soutien d'une grappe ou d'un donneur d'ordre pour réussir sa transformation.</p> <p>Une offre de prêts « Industrie du futur », proposée par Bpifrance, vise à soutenir le financement des investissements innovants destinés à l'appareil productif. Ces prêts sont sans garantie, et peuvent être bonifiés pour les PME et les ETI dont le remboursement s'opère avec un différé de deux ans. Deux enveloppes ont été mobilisées soit 1,2 Md€ en 2015 et 1 Md€ en 2016.</p> <p>En 2017, BPI France a apporté, au global, 430 M€ de soutien aux entreprises dont 47 % pour les entreprises du secteur numérique soit environ 200 M€. L'électronique a représenté 41 M€.</p>	
CIBLES	ÉCHÉANCE DE MISE EN ŒUVRE
<ul style="list-style-type: none"> Start-ups PME innovantes 	<ul style="list-style-type: none"> 2020-2025
OBJECTIFS	
<ul style="list-style-type: none"> Sensibiliser les dirigeants d'entreprises et les responsables métiers aux apports possibles des CPS ; Accompagner les entreprises avec un diagnostic approfondi aboutissant à un plan d'action pour la mise en œuvre d'un projet ; Proposer la réalisation de tests et d'essais : appropriation de CPS par les équipes des ETI/PME ; Accompagner les projets d'intégration de technologies CPS : soutien à la modernisation des ETI/PME ; Favoriser l'expérimentation et la diffusion des retours d'expériences divers ; Diversifier les réponses technologiques de la filière française ; Soutenir le passage de cap des entreprises et pépites souhaitant s'inscrire dans la stratégie Industrie du Futur en aidant leurs projets d'investissement sur des CPS ; Accompagner des projets de développement technologique particulièrement innovants autour de la maîtrise de la chaîne numérique et les changements organisationnels liés ; Favoriser des projets de développement (véhicules semi-autonomes, <i>smart building</i> ou de création de sites industriels liés à des enjeux forts de modernisation) en appréhendant un projet dans sa globalité. 	

CONTENU

Pour faciliter le déploiement dans les PME et ETI des technologies et méthodes de l'industrie du futur, une montée en gamme paraît nécessaire dans trois domaines : les *process*, les produits et le management. Il est donc important que les actions menées par les accompagnateurs ne se limitent pas à un seul de ces domaines.

Un dispositif de soutien à la transformation des PME devrait ainsi inscrire son action en cohérence avec les travaux conduits par l'AIF et le CNI, en liaison avec le réseau French Fab et avec les territoires d'industries.

Les tests et essais ont pour but d'explorer plus avant, en incluant les équipes au-delà du dirigeant, les conditions de déploiement d'une nouvelle technologie ou méthode dans l'entreprise et d'apprécier ainsi sa faisabilité.

Le but des actions d'accompagnement des plateformes est de soutenir la PME ou ETI dans son projet de modernisation, en particulier sur les aspects suivants : les solutions d'intégration des technologies retenues ; le plan d'affaires et le plan de financement, y compris les éventuelles possibilités de recours à des dispositifs incitatifs et la conduite du changement sur les plans RH, formation, organisation et techniques.

La sensibilisation des entreprises passe par ailleurs par l'ensemble des activités habituelles de réseau :

- petits déjeuners génériques ou sectoriels organisés par les acteurs du réseau ;
- rencontres par les chargés de mission de BPIFrance dans une démarche proactive ;
- interventions des ambassadeurs lors de conférences thématiques et d'évènements des pôles et clusters.

L'incitation financière est le vecteur le plus efficace pour favoriser les expérimentations et l'intégration. Les acteurs ayant une marge de manœuvre sur cette dimension sont peu nombreux.

Les projets financés pourront porter sur des développements techniques comme sur des expérimentations de déploiement sur des marchés applicatifs

La finalité étant aussi le retour d'expérience notamment sur les briques sur étagère, il est important d'assortir ces financements de conditions pour les attributaires en termes d'obligation d'information :

- résultats de l'expérimentation ;
- évaluation de retour sur investissements;
- points durs et facteurs clés de succès ;
- etc.

Ce financement peut (doit) inclure une incitation à travailler avec le monde académique pour favoriser la montée en puissance de la relation recherche-entreprises.

Les projets d'investissement doivent justifier d'un caractère innovant en termes de process de production ou d'utilisation des CPS. À ce titre, l'évolution technologique réalisée par l'entreprise devra systématiquement être appréciée au regard de sa taille et de sa situation de départ.

Les projets en phase de pré-industrialisation ne pourront pas être éligibles, car pouvant prétendre à des dispositifs autres, notamment des challenges

CONTRIBUTEURS	FINANCEMENT
<ul style="list-style-type: none"> • BPIFrance • Caisse des Dépôts • Embedded France • Donneurs d'ordre • PME spécialisées 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 M€

SIGLES

CPS : cyber-physical systems (ou systèmes cyberphysiques en français)

IA : intelligence artificielle

IIC : Industrial internet Consortium

IIRA : Industrial Internet Reference Architecture

IoT : Internet of Things

KET : technologies clés génériques

MIC 2025 : Made in China 2025

NSF : National Science Foundation

SE : système embarqué

TIC : technologies de l'information et de la communication

VM : machines virtuelles

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Index des tableaux

Tableau 1 – intégration des briques technologiques de 2010 dans les thématiques plus larges choisies en 2019	19
Tableau 2 – Classement des niveaux d'autonomisation des véhicules.....	82
Tableau 3 – Sources des financements publics MIC 2025	100
Tableau 4 – Objectifs d'évolution des indicateurs clés de performance liés à la transformation industrielle..	102
Tableau 5 – répartition des actions par enjeu prioritaire.....	121

Index des graphiques

Graphique 1 – Analyse des forces de la filière française (note de 1 à 4 : 1 faible – 4 fort) Erreur ! Signet non défini.	
Graphique 2 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'industrie(<i>Entretiens Katalyse</i>)	65
Graphique 3 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière industrielle	67
Graphique 4 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels du BTP (<i>entretiens Katalyse</i>)	74
Graphique 5 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière Bâtiment	79
Graphique 6 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'automobile (<i>entretiens Katalyse</i>)	89
Graphique 7 – Critères de développement des CPS pour et dans la filière automobile	92

Index des figures

Figure 1 – Synopsis de la mission	11
Figure 2 - Champs d'action d'un CPS	13
Figure 3 – Les CPS dans l'environnement urbain	14
Figure 4 – Interopérabilité des systèmes	15
Figure 5 – Interactions entre monde cyber et monde physique	17
Figure 9 – Modélisation d'une architecture verticale et horizontale	26
Figure 10 – Évolution de la complexité des architectures	27
Figure 13 – Panel des technologies sans fil	34
Figure 12 – Communication ad-hoc	35
Figure 14 – Chaîne de valeur des CPS	42
Figure 15 – Typologie d'acteurs de l'écosystème des CPS	43
Figure 16 – Part du coût des Systèmes Embarqués / CPS dans le coût du chaînon de l'OEM et de l'Équipementier selon les secteurs de l'industrie	49
Figure 17 – Parts de marché des grandes entreprises ESN en France en 2017	50
Figure 18 – Les 4 profils d'ESN (Top 25 des ESN selon leur CA réalisé en France en 2017)	52
Figure 19 – Principaux secteurs clients des ESN en France	53
Figure 20 – Priorités de développement des nouvelles technologies au sein des ESN	53
Figure 21 - Les 4 profils d'ICT (Top 25 des ICT selon leur CA réalisé en France en 2017)	55
Figure 22 – Principaux secteurs clients des ICT en France	56
Figure 23 – Priorités de développement des nouvelles technologies au sein des ICT	56
Figure 24 – Estimation en milliards d'euros du poids de la production des CPS dans les branches productives en 2018	57
Figure 25 – Estimation des effectifs des CPS en 2018	58
Figure 24 – Révolutions industrielles successives	59
Figure 25 – Écosystème de la transformation 4.0	62
Figure 26 - Les transformations industrielles, histoire d'une désynchronisation de la chaîne de sous-traitance	63
Figure 27 – <i>Smart building</i>	71
Figure 28 - Maturité technologique dans les véhicules individuels	84

Figure 29 - Maturité technologique dans les véhicules de transport	84
Figure 30 - Maturité technologique pour les véhicules de transport public	84
Figure 31 – modélisation du système de recherche et d’innovations	95
Figure 32 – Budget 2019 du programme NITRD (en millions de dollars)	108
Figure 33 – Répartition des <i>start-up</i> israéliennes par secteur en 2017	112
Figure 34 – Écosystème des <i>start-up</i> en Israël en 2016	113
Figure 35 – 5 axes prioritaires de développement pour les écosystèmes des CPS	120
Figure 36 – Hiérarchisation des actions selon les axes priorité et efforts (financement et moyen humain)	122
Figure 37 – Hiérarchisation des actions selon les axes impacts et efforts (financement et moyen humain)	122
Figure 6 – Modélisation de la santé connectée	124
Figure 7 – Le champ d’action de la e-santé	124

Crédits photographiques de la couverture (de gauche à droite) : © metamorworks – Gettyimages ;
© B4LLS – Gettyimages ; © Mars Yu – Gettyimages ;

CARTOGRAPHIE DES SYSTÈMES CYBERPHYSIQUES

La transformation numérique de la société repose en grande partie sur des systèmes électroniques de nouvelle génération, dotés de capacités de communication, de calcul en local, et d'autonomie (intelligence artificielle), qui sont capables d'interagir en temps réel aussi bien avec les utilisateurs que l'environnement qui les entoure grâce à des capteurs et à des interfaces avancés ; on les appelle des systèmes cyberphysiques (*cyber-physical systems*, CPS). Leur développement constitue un enjeu de premier plan pour l'avenir de nombreuses filières françaises, dans les domaines du véhicule autonome, de la ville intelligente, des réseaux électriques intelligents, ou encore dans l'usine du futur.

La maîtrise des CPS, qui est une condition nécessaire à la compétitivité de ces filières, implique d'importants défis à relever. En effet, l'intégration d'un grand nombre de briques technologiques logicielles et matérielles de dernière génération dans un même système électronique, surtout lorsqu'il est embarqué dans un véhicule, induit des complexités nouvelles dans la conception de son architecture afin d'obéir à un impératif toujours plus exigeant de cyber-sécurité, de sûreté de fonctionnement, de capacité de réaction en temps réel, et d'interopérabilité avec des infrastructure de télécommunication ou avec d'autres CPS.

Cette étude, réalisée par le cabinet Katalyse, a été commandée par la DGE et l'association Embedded France. Elle présente un panorama détaillé des technologies et de l'écosystème français des CPS. Elle met en lumière les stratégies de développement mises en place par cinq pays leaders – l'Allemagne, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis et Israël – et propose des actions qui pourraient être engagées par des acteurs tant publics que privés afin de soutenir le développement économique de la filière des CPS en France.