



MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE
DES FINANCES
ET DE LA RELANCE

Liberté
Égalité
Fraternité

LES **DOSSIERS**
DE LA DGE

Études Économiques

SYNTHÈSE CARTOGRAPHIE DES SYSTÈMES CYBERPHYSIQUES

Réalisation de l'étude :

Cabinet de conseil Katalyse - Lyon

Directeur de la publication :

Thomas Courbe

Date de parution : septembre 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.

SYNTHÈSE

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
INTRODUCTION	5
LES PRINCIPAUX ENJEUX TECHNOLOGIQUES DES CPS ET LES DÉFIS POUR LA FILIÈRE FRANÇAISE	7
Sept principaux enjeux technologiques pour répondre aux nouvelles exigences et capacités des CPS	7
La filière française et ses défis	7
UNE TECHNOLOGIE CLÉ POUR LES MARCHÉS APPLICATIFS	9
Applications dans l'industrie	9
Applications dans le bâtiment	9
Applications dans l'automobile	10
Points clés à retenir de l'analyse des filières	11
LES INITIATIVES INTERNATIONALES	12
En Allemagne : une stratégie gouvernementale forte	12
En Chine : une volonté de réduire la dépendance internationale	13
En Corée du Sud : une collaboration entre acteurs privés et publics	13
Aux États-Unis : une politique d'investissements publics forte	14
En Israël : la richesse d'un écosystème	15
Points clés à retenir des initiatives internationales	15
RECOMMANDATIONS	16

INTRODUCTION

La **transformation digitale** actuelle bouleverse la façon dont nous concevons l'utilisation des nouvelles technologies. En tant que particulier, nous vivons cette transformation au travers de technologies concrètes et de plus ancrées dans nos vies, telles que l'IoT. Dans la sphère économique également, les secteurs industriels sont en train de s'engager dans de grands chantiers techniques et technologiques de transformation. De plus en plus d'appareils et d'équipements innovants intègrent des technologies leur permettant **d'interagir avec leur environnement et d'échanger des informations, avec une autonomie grandissante**. 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) ».

Figure 1 – Champs d'analyse d'un CPS

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 cyberphysiques¹ sont définis comme des **systèmes coopérants et réactifs**, car continuellement soumis aux contraintes imposées par leur **environnement physique et virtuel**. Ils sont d'une certaine manière l'évolution des systèmes embarqués puisqu'ils intègrent une partie physique, un système d'information, mais également une partie cyber.

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 :

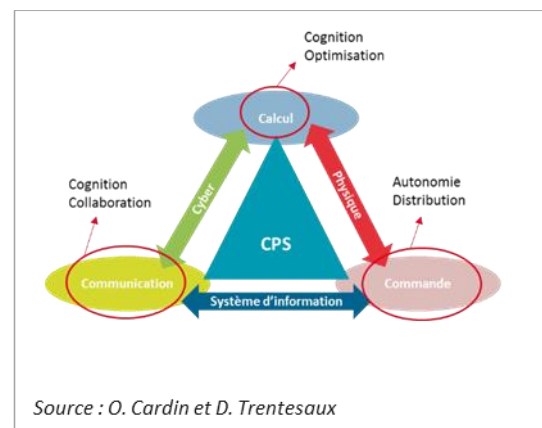
« Les CPS sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacités de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles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

L'évolution des systèmes embarqués vers les CPS oblige donc à repenser **l'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.**

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. Elle vise à alimenter une politique publique promouvant le développement de la filière des CPS en France.

C'est pourquoi, le rapport - dont cette synthèse est issue - s'est attaché à d'établir une cartographie détaillée et actualisée des technologies et des acteurs des CPS au niveau mondial, ainsi que des relations d'interdépendance qui existent entre eux. Il 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.

De plus, il développe le positionnement des CPS dans trois marchés applicatifs retenus à titre d'illustration, le secteur de la smart production, le secteur du smart building et le secteur de



¹ Acatech, Cyber-Physical Systems : Driving force for innovation in mobility, health, energy and production (December 2011).

l'automobile. De même, il propose une analyse comparative entre la France et quelques pays *leaders* sur les CPS : l'Allemagne, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis et Israël.

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.

LES PRINCIPAUX ENJEUX TECHNOLOGIQUES DES CPS ET LES DÉFIS POUR LA FILIÈRE FRANÇAISE

Sept principaux enjeux technologiques pour répondre aux nouvelles exigences et capacités des CPS

Comme le démontre leur définition, les CPS sont des systèmes complexes, couvrant un très large panel d'applications et de fonctionnalités.

Bien qu'une liste exhaustive soit difficile à établir ici, les CPS se caractérisent par des capacités spécifiques :

- ils peuvent s'apparenter à des systèmes embarqués liés à un **environnement physique en temps réel** par des capteurs et des actionneurs ;
- ils peuvent aboutir à la création de **systèmes de systèmes**, par la mise en réseau de systèmes embarqués grâce notamment à des architectures spécifiques ;
- ils présentent des capacités d'autonomie et d'adaptabilité du système poussées ;
- ils se comportent comme des systèmes coopératifs avec une **distribution des tâches et des contrôles** ;
- ils induisent, *in fine*, une coopération plus fine **entre l'humain et la machine**.

Pour ce faire, les CPS s'appuient sur les toutes dernières technologies. 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.

Pour chacun de ses enjeux, il est décrit dans le rapport :

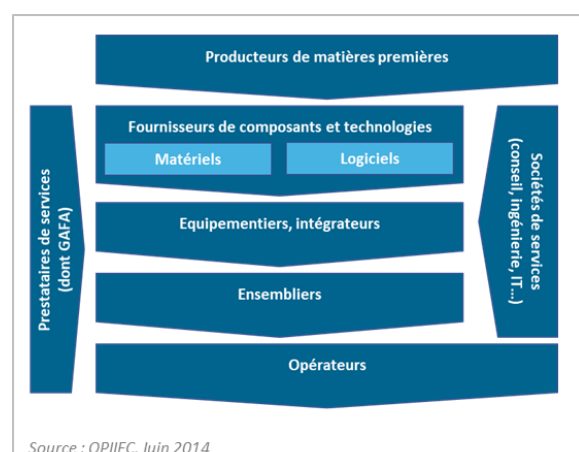
- une définition succincte de l'enjeu pour délimiter la complexité du problème ;
- les points critiques où les acteurs de la recherche et de l'innovation cherchent des solutions technologiques ;
- un état des lieux du positionnement de la filière française.

La filière française et ses défis

Figure 2 - Typologie d'acteurs de l'écosystème 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.

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 pas la somme des valeurs de ses briques, mais bien la valeur issue de leurs synergies.

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-contre.

Figure 3 - Estimation des effectifs des CPS en 2018

En 2014, l'OPIIEC avait estimé selon un périmètre plus restreint le poids de la filière système embarqué à **387 500 emplois**.

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.

Selon les estimations de Katalyse, plus de 42 % des emplois sont internalisés sur les métiers en lien avec le développement des CPS.

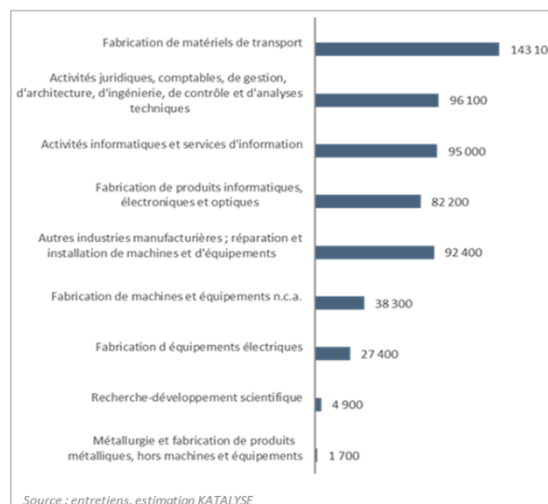
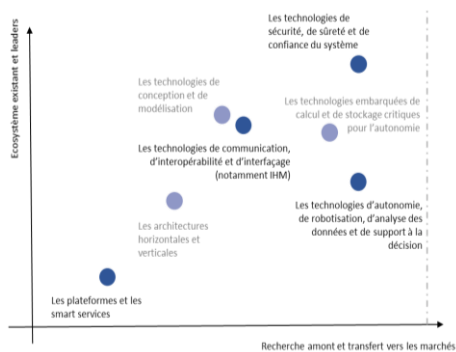


Figure 4 – Positionnement de la filière française



La filière CPS française est, comme l'illustre le graphique ci-contre, composée filières technologiques dont l'écosystème et la maturité de développement varient, induisant des écarts non négligeables.

Pour mettre en valeur ces différences, l'analyse a été effectuée en pondérant le point de la filière selon quatre critères :

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

Si la filière française montre des atouts indéniables, elle fait également face à des défis majeurs pour les prochaines années.

Il a été ainsi déterminé les enjeux technologiques clés et les défis pour la filière française, permettant de faire croître et prospérer l'ensemble de la filière CPS. Si 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** et la participation à des projets européens pourrait être systématisée. Le transfert de technologie entre laboratoires et monde économique est, quant à lui, encore insuffisant, même si un effort a été fait pour se rapprocher des questions économiques. Du fait de la faible maturité et de la haute complexité que représentent les CPS, les structures d'accompagnement pour le transfert de technologies sont encore pour la plupart démunies face à la question complexe des CPS.

Enfin, concernant les entreprises et acteurs économiques phares de chaque technologie, il a été mis en lumière que 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.

UNE TECHNOLOGIE CLÉ POUR LES MARCHÉS APPLICATIFS

Applications dans l'industrie

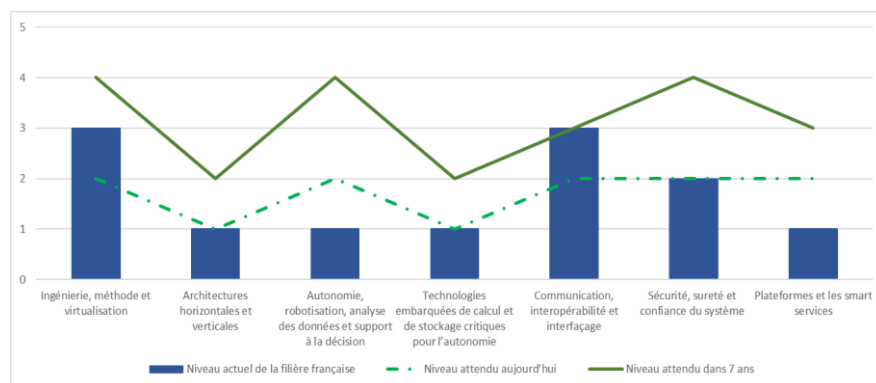
L'évolution globale de la société crée de **nouveaux défis pour le secteur industriel**, aussi bien en matière d'équipements que de méthodes de gestion et de production. Le concept de « *smart factory* » ou « industrie du futur » correspond à cette nouvelle façon d'imaginer les moyens de production. **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.

La France a entrepris deux plans successifs, intitulés « Nouvelle France Industrielle », 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.

La filière française 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 toutefois s'accroître drastiquement obligeant l'écosystème à proposer et acquérir de nouvelles solutions.

Figure 5 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'industrie (Entretiens Katalyse)



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 :

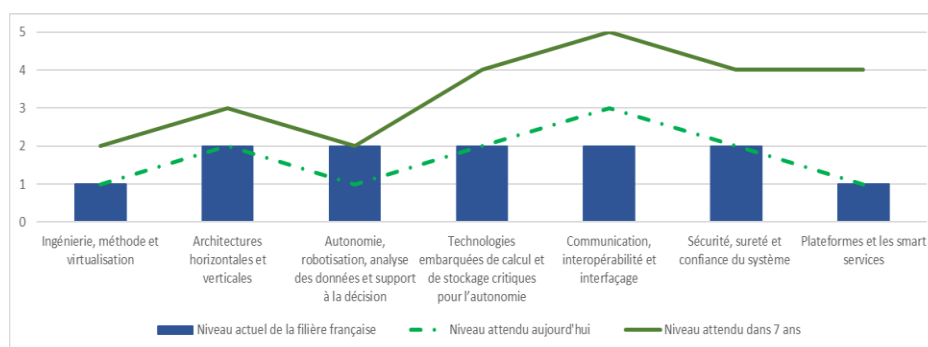
- processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement et des entrepôts, suivi en temps réel de la demande, du traitement des commandes, du flux de fabrication, des retours, etc. ;
- lignes de production, contrôle en temps réel des performances, de la durabilité, diminution des besoins énergétiques 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.

Applications 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), mais également en permettant une meilleure prise en compte des mix énergétiques et des utilisations des besoins énergétiques.

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. Toutefois, les acteurs traditionnels du BTP ont besoin de s'entourer de start-up innovantes (Vesta System, Smart Impulse, Igenko...) pour s'implanter au plus vite dans ce nouveau marché.

Figure 6 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels du BTP (*entretiens Katalyse*)



Aussi, l'intégration des CPS demeure un véritable challenge : les solutions ne doivent pas seulement proposer de nouvelles technologies et leurs interopérabilités entre elles, mais également développer l'interaction avec des éléments non technologiques.

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.

Applications dans l'automobile

Les transports et la mobilité sont au cœur de notre économie. Le secteur des transports emploie en Europe environ dix 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.

Comme le rappelle l'Inria² (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), les défis technologiques principaux des CPS dans ce secteur sont les suivants :

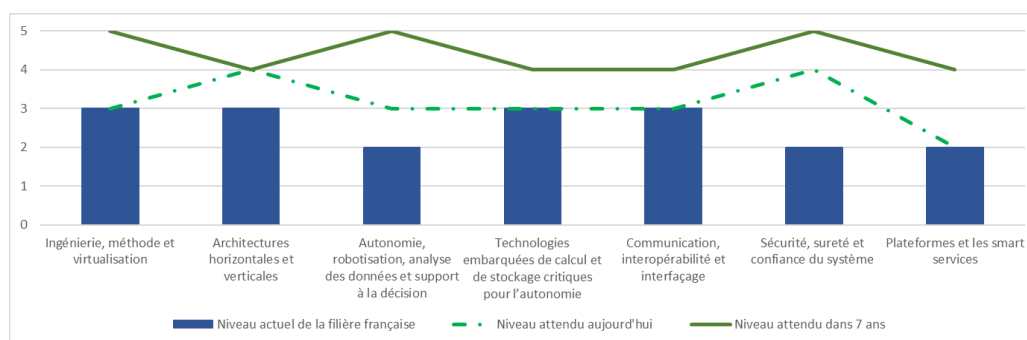
- les défis en lien avec la navigation autonome ;
- les défis en lien avec l'intégration et la sûreté de fonctionnement ;
- les télécommunications et la cybersécurité des véhicules connectés ;
- le *Big Data* ;
- la simulation ;
- la modélisation des grands systèmes : trafic routier et gestion de flottes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

2 Inria, livre blanc sur les véhicules autonomes et connectés, 2018

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, comme l'illustre le graphique suivant, les besoins technologiques vont s'accroître de manière significative dans les prochaines années :

Figure 7 – Adéquation de la filière française avec les attendus potentiels de l'automobile (entretiens Katalyse)



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.

La participation aux cadres normatif et réglementaire apparaît ici comme primordiale pour le développement de la filière française. 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.

Points clés à retenir de l'analyse des filières

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.

Douze paramètres influencent l'intégration des CPS dans les trois marchés applicatifs analysés :

1. un cadre normatif et réglementaire actualisé ;
2. une politique nationale forte de grands projets ;
3. des donneurs d'ordre identifiés et proactifs ;
4. un marché de l'offre suffisante ;
5. la capacité de développer des briques technologiques ;
6. la participation à des projets de R & D et de développement ;
7. la capacité à trouver des partenaires ayant des briques technologiques ;
8. la capacité à assembler les briques technologiques ;
9. l'anticipation de l'écosystème de la filière ;
10. la transformation des briques technologiques en intérêt économique ;
11. la capacité à imposer des standards et un modèle de développement ;
12. un écosystème proposant un modèle économique viable.



LES INITIATIVES INTERNATIONALES

Quel est, à ce jour, la place de la France dans l'écosystème mondial de la filière des CPS ? Quelles sont les technologies, les acteurs ou les maillons qui portent la filière française ? C'est aussi au regard du développement des autres pays, à l'échelle internationale, que peuvent se mesurer non seulement les atouts, mais également les leviers de progressions de la filière Française. Dans ce but, le rapport évoque le positionnement spécifique et les particularités de cinq pays, analysés à titre de comparaison.

En Allemagne : une stratégie gouvernementale forte

L'Allemagne est depuis longtemps l'un des principaux innovateurs mondiaux en matière d'industrie manufacturière. Elle est à la pointe de l'Industrie du futur, qu'elle considère fondée sur les CPS. Sa vision de l'industrie du futur a été rendue possible par les liens étroits qu'entretiennent le système politique, le système de recherches et le système industriel.

L'Industrie 4.0 pouvant être comprise comme une ambition purement technologique relève d'une stratégie de défense du *leadership* industriel allemand, doublée d'une stratégie de conquête de nouveaux marchés.

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. Cette stratégie, révisée en 2010 sous le nom de *High Tech Strategy 2020*, identifie 5 domaines prioritaires ainsi que 17 domaines d'innovation répartis dans trois grands thèmes suivants : Santé et sécurité, Communication et Mobilité ainsi que Technologies transversales.³

En tant que l'un des *leaders* historiques de l'Industrie du futur en Europe, l'Allemagne souhaite conserver sa place par la mise en œuvre d'un cadre permettant le transfert technologique le plus efficace possible et d'intégrer au mieux les innovations scientifiques dans l'économie réelle. Son plan d'action résulte :

- d'une stratégie gouvernementale forte ;
- de programmes visant à changer en profondeur les paradigmes existants des entreprises ;
- d'un transfert de technologie important et facilitant la recherche chez les PME ;
- d'un fort investissement dans les organisations et les actions de standardisation sectorielles ;
- d'un enjeu fort d'intégrer dans la démarche d'intégration des CPS les PMI et ETI aujourd'hui plutôt passives.

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 d'innovation radicale. C'est la structure du système, à savoir l'architecture de sa chaîne de valeur et son business model qui sont questionnés.

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.

³ *Living in a networked world: integrated research agenda Cyber-Physical Systems* par Acatech (2015) p.203

En Chine : une volonté de réduire la dépendance internationale

À travers un plan industriel ambitieux, dont la première étape est le plan *Made in China* (MIC 2025), la Chine souhaite moderniser son industrie en passant d'une économie de rattrapage à une économie industrielle innovante. Elle 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 de ses produits.

Pour se faire, elle alloue des fonds 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. À titre d'exemple, les fonds dédiés à ce plan de financement représentent plus de 520 milliards de dollars.

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.

Son ambition d'émancipation résulte notamment :

- d'une politique offensive pour le développement des marchés applicatifs ;
- d'une définition de standards et d'homologations des CPS propres au marché chinois et qui, à termes, pourraient être imposés au reste des marchés ;
- d'investissements conséquents de la part des entreprises et des structures publiques ;
- d'une rapidité de mise en œuvre de tests à grande échelle ;
- du choix de technologies clés sur lesquelles devenir incontournables ;
- de grandes entreprises « moteurs » dans le développement de solutions (notamment gestion des données et IA) en lien avec des universités de qualité.

La France se doit donc d'avoir 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.

En Corée du Sud : une collaboration entre acteurs privés et publics

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 les 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. Nous pouvons mentionner notamment les transferts technologiques, une intervention forte de l'État 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.

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 conglomerats familiaux qui structurent l'économie du pays. Le pays a également développé une forte expertise sur les sujets de l'industrie du futur. Elle est notamment à la pointe de la robotisation industrielle. Sa densité robotique dépasse par exemple de huit fois la moyenne mondiale (631 robots pour 10 000 employés en 2016). L'écosystème industriel coréen apparaît propice pour diffuser ces technologies.

De même, la Corée du Sud est l'un des *leaders* mondiaux du secteur des semi-conducteurs, technologie de base dans l'établissement des CPS. Devant un marché en forte expansion, le ministère des Affaires, du Commerce et de l'Énergie de la Corée du Sud a décidé en 2018 de soutenir les entreprises du secteur des semi-conducteurs en investissant 1,34 milliard de dollars au cours des dix prochaines années pour le développement de la technologie des semi-conducteurs de nouvelle génération. Enfin, elle 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 lui permet de mettre sur le marché des produits à très forte valeur ajoutée économique. Ces atouts reposent sur :

- 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.

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.

Aux États-Unis : une politique d'investissements publics forte

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

Le programme NITRD (*Networking and Information Technology Research and Development*) est le principal mécanisme utilisé par le gouvernement fédéral pour coordonner les investissements en R & D dans les technologies de l'information non classifiés. Le budget 2019 du programme NITRD est de 5,28 milliards de dollars, contre 3,7 milliards de dollars en 2010 par exemple.

Les programmes américains s'appuient sur des dynamiques complémentaires :

- les grands constructeurs et les équipementiers traditionnels sont encore bien présents, bien que rejoints et bousculés par de nouveaux acteurs (Tesla) ou encore 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-ups travaillant sur des fonctions et des composants spécifiques notamment à la voiture autonome.
- de grandes universités comme le MIT, Berkeley, Carnegie- Mellon University, ou Stanford, qui ont créé des collaborations avec les industriels, et dont les résultats ont alimenté les véhicules de démonstration.
- des *consortia* pour le développement de réglementation, sur le sujet des véhicules autonomes notamment.

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.

En Israël : la richesse d'un écosystème

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 californienne⁴. 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.

Le gouvernement israélien œuvre également pour augmenter l'ouverture et le développement de centres de R & D dans le pays. 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.⁵

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 BPI France. Des instruments publics efficaces pour faire germer des *start-ups* sont primordiaux pour le développement des CPS.

Points clés à retenir des initiatives internationales

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 : six points clés ont émergé comme étant les principaux leviers de développement et de succès des filières CPS étrangères analysées. Ce sont :

1. le choix assumé de technologies clés sur lesquelles devenir incontournables et des partenariats pour compléter les faiblesses ;
2. un investissement pour le développement de technologies et de standards (parfois propres) / des consortia pour le développement de réglementations ;
3. le décroisement des structures de recherche et le développement du transfert de technologie entre la recherche et les PME ;
4. la possibilité d'expérimenter les solutions « grandeur nature », et d'imposer les partenariats et les technologies du pays ;
5. un plan massif d'investissements permettant de proposer les infrastructures adéquates ;
6. des programmes pour changer en profondeur les paradigmes existants des entreprises utilisatrices, associé à un enjeu fort d'intégration des PMI et ETI dans la démarche de déploiement des CPS.

⁴ <https://bfmbusiness.bfmtv.com/france/la-start-up-nation-israel-un-modele-a-suivre-pour-la-france-1679156.html>

⁵ *Innovation In Israel 2017* par Israel Innovation Authority

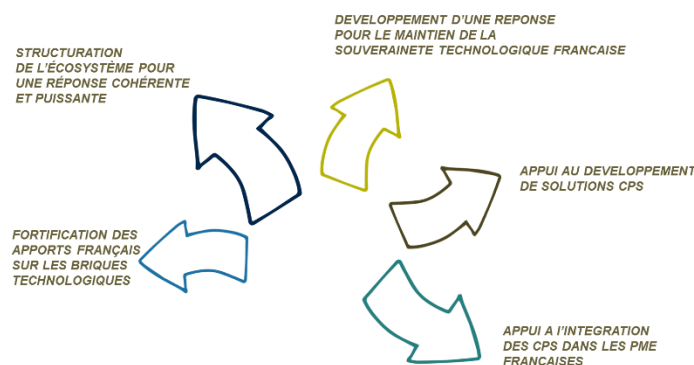
RECOMMANDATIONS

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 8 - 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.

Figure 9 - 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

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
- 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

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.