

**Soutenir la recherche collaborative
et le développement industriel des
systèmes cyberphysiques**

**Extrait du rapport remis à M. Bruno Le Maire, Ministre
de l'Économie et des Finances**



Groupe de travail CPS, Novembre 2017

Participants à la rédaction du document :

Industriels :

EDF : Stéphane Tanguy

Safran : Christian Picollet, Philippe Dejean, François Neumann

Thales : Laila Gide, Philippe Bonnot, Claude Bouscarle

Valeo : Jean-Luc Di Paola-Galloni, Jean-Baptiste Burtscher

Associations :

Embedded France : Cedric Demeure

JESSICA France / CAP'TRONIC : Jean Philippe Malicet

Académiques :

CEA : Jean-Frédéric Clerc, Marc Durantou, Ahmed Jerraya

Inria : Didier Rémy, Bertrand Braunschweig

Les auteurs remercient Messieurs Masafumi Tanaka et Fabrice Perrot de la DGE pour leur aide constante.

Table des matières

Synthèse.....	3
Introduction	5
Première partie : Les CPS, une technologie clef des systèmes numériques : définition et impacts industriels	6
Deuxième partie : Impact de l'accompagnement des industriels nationaux dans les CPS	7
Troisième partie : Proposition d'un dispositif complet visant à mettre les technologies du CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française	9
Conclusion.....	10

Synthèse

Les secteurs industriels du transport terrestre, de l'aéronautique et du spatial, de l'énergie ainsi que d'autres secteurs de l'économie nationale se sont récemment engagés dans de grands chantiers techniques et industriels. On peut citer les véhicules autonomes dans le domaine automobile, les avions connectés dans le domaine de l'aéronautique, la modernisation du transport ferroviaire et les « réseaux électriques intelligents » ou « *smart grids* », qui sont nécessaires pour une évolution du « mix énergétique » vers les énergies renouvelables en complément du nucléaire.

L'engagement des industriels dans ces grands chantiers s'est fait de façon simultanée, bien que ces secteurs soient très différents. Ce n'est pas un hasard. Tous ces chantiers ont un enjeu commun : la maîtrise de systèmes d'un type nouveau, appelés systèmes cyberphysiques (ou *Cyber Physical Systems*, CPS, aux Etats-Unis), le terme cyber faisant référence à leur puissance numérique, et le terme physique à leur emprise sur le monde réel. Ces systèmes se caractérisent en effet par la capture d'un énorme flux de données (« *big data* »), l'intelligence répartie de bout en bout du système, et des niveaux de connectivité interne et externe jamais atteints ; de plus, ils ont une emprise directe, en temps réel, sur le monde physique et sur les humains.

Avec l'avènement des CPS, des pans entiers de l'industrie nationale jouent leur survie, car les CPS transforment les produits, les services et même la chaîne de la valeur. Plus précisément, la maîtrise industrielle de **l'architecture numérique des CPS** à court terme constitue un enjeu majeur de compétitivité pour notamment les industries du transport terrestre, de l'aéronautique et de la défense, ainsi que de l'usine du futur, et à plus long terme, pour les industriels de la santé.

Les industriels français ont de forts atouts pour maîtriser les nouvelles architectures numériques des CPS. Les industriels intégrateurs et les grands équipementiers sont particulièrement compétitifs sur leurs marchés respectifs grâce à leur bonne maîtrise des technologies numériques, qui ont bénéficié du soutien de programmes nationaux judicieux notamment dans la filière de l'embarqué (systèmes embarqués, systèmes informatiques, systèmes de contrôle commande traditionnels). Par ailleurs, la filière des composants micro et nanoélectroniques, fortement soutenue en France depuis de longues années, est capable de mettre sur le marché une nouvelle génération de puces de calcul, d'imageurs, et de capteurs de haute performance et de faible consommation. Enfin, la nouvelle stratégie nationale sur l'intelligence artificielle accélère également l'émergence des CPS.

Le tissu industriel français a néanmoins une marche importante à franchir pour parvenir à une maîtrise industrielle globale des CPS. Les connaissances numériques actuelles, la mise à disposition des meilleurs composants matériels microélectroniques ou des meilleurs algorithmes d'apprentissage profond pour l'intelligence artificielle, sont certes indispensables, mais ne suffisent pas pour **la maîtrise des architectures numériques des CPS** par les industriels. Les CPS présentent en effet des verrous scientifiques et technologiques propres qui nécessitent une action de recherche et de développement spécifique d'ampleur. Pour lever ces verrous, il serait nécessaire que plus de dix mille ingénieurs et chercheurs se consacrent à cette tâche pendant les six années à venir. Le saut technologique est identique pour tous les pays du monde, mais les industriels français partent avec un handicap : la France a tardé à mettre en place un programme spécifique national sur le sujet contrairement à des pays comme les Etats-Unis, l'Allemagne, l'Autriche, la Suède, et même le Japon et la Chine qui ont engagé un tel programme en 2014. Dans ce contexte, il est nécessaire de lancer rapidement une initiative nationale, visant à la mutualisation et à la diffusion des technologies génériques aux CPS, permettant à l'ensemble de l'écosystème français, aussi bien les grandes entreprises que les PME et les entreprises sous-traitantes, de rattraper ce retard.

Ce rapport propose donc la mise en place d'un dispositif national mettant les architectures numériques des CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française. Le dispositif proposé repose sur deux actions :

1. Une feuille de route comprenant un volet technologique permettant le développement de briques et d'outils génériques, et un volet recherche en amont sur les verrous spécifiques aux CPS (à hauteur de 1000 hommes par an);
2. Un programme d'accompagnement pour faciliter la diffusion et l'accès aux technologies des CPS pour l'ensemble des entreprises. Une attention particulière sera apportée aux PME, aux start-ups et aux nouveaux entrants des secteurs aujourd'hui éloignés de ces technologies.

L'initiative, d'une durée de six années permettrait de combler le handicap de départ en deux ans et, sur la période totale, de tenir trois objectifs:

- **Objectif 1** : maîtrise (industriels intégrateurs et équipementiers) de **l'architecture numérique des principales classes de CPS** (véhicules autonomes, avions connectés, nouveaux systèmes ferroviaires, « *smart grid* » nucléaire/renouvelable) autour d'une chaîne d'outils génériques de conception et de validation CPS intégrant des briques technologiques d'intelligence artificielle.
- **Objectif 2** : disponibilité de sous-systèmes cyberphysiques génériques qui sont compétitifs au niveau mondial, développés en France, réalisables à partir de composants physiques conçus en France, comme les processeurs génériques de calcul, les sous-systèmes génériques de connectivité multimodale, les sous-systèmes génériques d'interfaces adaptatives et coopératives.
- **Objectif 3** : constitution d'un écosystème globalement compétitif sur toute la chaîne de la valeur par l'accompagnement de plus de 1000 PME vers les CPS.

Introduction

La transformation numérique de nos sociétés a été rendue possible par les avancées de la microélectronique (faible encombrement, bas coût, efficacité énergétique). Les progrès du logiciel ont permis d'embarquer plus de fonctionnalités dans les systèmes électroniques capables désormais d'offrir de multiples modes de connectivité. Les nouvelles technologies de l'intelligence artificielle permettent d'interagir avec le monde physique de manière plus autonome.

Ces évolutions changent le jeu des systèmes embarqués. Jusqu'à présent, ceux-ci avaient été développés pour fonctionner de manière indépendante. Une fois connectés et dotés d'intelligence embarquée, les nouveaux systèmes interagissent étroitement avec le monde physique et avec une autonomie renforcée (perception et décision). Ce **nouveau concept d'intelligence embarquée connectée** est appelé ici **système cyberphysique (CPS en anglais pour *cyberphysical systems*)**.

Les CPS vont bouleverser des secteurs importants de l'économie française. Leurs capacités fonctionnelles les destinent à remplacer des produits existants et à ouvrir de nouveaux marchés. Leur réalisation nécessite la maîtrise de la complexité croissante de nouvelles technologies clefs (outils, briques génériques, plateforme d'intégration). Cette maîtrise doit être assurée et partagée par tous les acteurs et par toute la chaîne de la valeur (composants, sous-systèmes, produits et équipements) et toute la chaîne d'approvisionnement (grands groupes, PME et startups).

L'industrie française doit renforcer sa compétitivité tant dans les secteurs où elle occupe aujourd'hui des positions dominantes que sur les nouveaux marchés. La structuration de l'industrie française dans les CPS se fera en synergie avec les initiatives nationales stratégiques comme celles relatives à la nanoélectronique et à l'intelligence artificielle.

Dans ce contexte, un groupe de travail a été mis en place et a abouti à la rédaction de ce rapport organisé en trois grandes parties :

- La première partie donne la définition des CPS et présente des exemples de leur impact sur différents secteurs industriels (automobile, aéronautique, énergie, ferroviaire, ...)
- La deuxième partie fait une analyse des besoins industriels spécifiques aux CPS et met en évidence les véritables difficultés que rencontrent les acteurs concernés pour les adopter. Elle présente ensuite les verrous scientifiques et technologiques propres aux CPS qui nécessitent une action de R&D spécifique. Elle montre de plus l'existence d'importantes possibilités pour la mutualisation des travaux de R&D dans un cadre coopératif. Elle présente enfin un benchmark des programmes d'aides nationaux et internationaux dans ce domaine ;
- La troisième partie est consacrée à la description précise du dispositif proposé pour mettre les technologies des CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française. Le dispositif proposé est articulé autour d'une feuille de route technologique et scientifique et d'un programme d'accompagnement à destination des PME. Le dispositif capitalise sur les projets préexistants et est en synergie avec les nouvelles feuilles de route (nanoélectronique, IoT, IA). Une première esquisse des besoins de formation est formulée et une évaluation de son besoin en financement est incluse.

Première partie : Les CPS, une technologie clef des systèmes numériques : définition et impacts industriels

La position nationale forte dans les secteurs importants de l'économie tels que l'automobile, l'énergie, l'aéronautique est néanmoins menacée par des changements profonds provoqués par la pénétration massive des technologies numériques. Traditionnellement la plupart des sous-systèmes électroniques étaient développés pour fonctionner de manière indépendante les uns des autres. La numérisation massive change le jeu car elle permet d'envisager la maîtrise de liens continus (connectivité, interaction) au sein des systèmes eux-mêmes, et entre ces systèmes et leur environnement qui peut être humain, physique (infrastructures, machines, etc.) ou numérique.

Ces nouveaux systèmes sont fondamentalement affectés par les ruptures suivantes, qui les transforment en profondeur :

- la connectivité intensive des systèmes embarqués aboutissant à des systèmes de systèmes implique de combiner deux types de liens : d'une part la connectivité des objets à l'intérieur d'un système qui impose de fortes contraintes de sûreté, et d'autre part la connectivité du système avec le monde extérieur qui exige de fortes contraintes de sécurité ;
- l'intelligence embarquée dans les CPS doit répondre également à un double défi : d'une part un nouveau type de calcul à la fois déterministe, à haute performance et basse consommation, et d'autre part le traitement efficace des algorithmes d'apprentissage profond ;
- l'interaction du calcul avec le monde physique (capteurs, actuateurs) des systèmes embarqués actuels doit évoluer pour prendre en compte les aspects dynamiques et évolutifs de l'environnement.

Ces ruptures combinées engendrent un fossé entre les approches traditionnelles et les besoins des nouveaux systèmes. C'est ce fossé que les technologies spécifiques des CPS se proposent de combler.

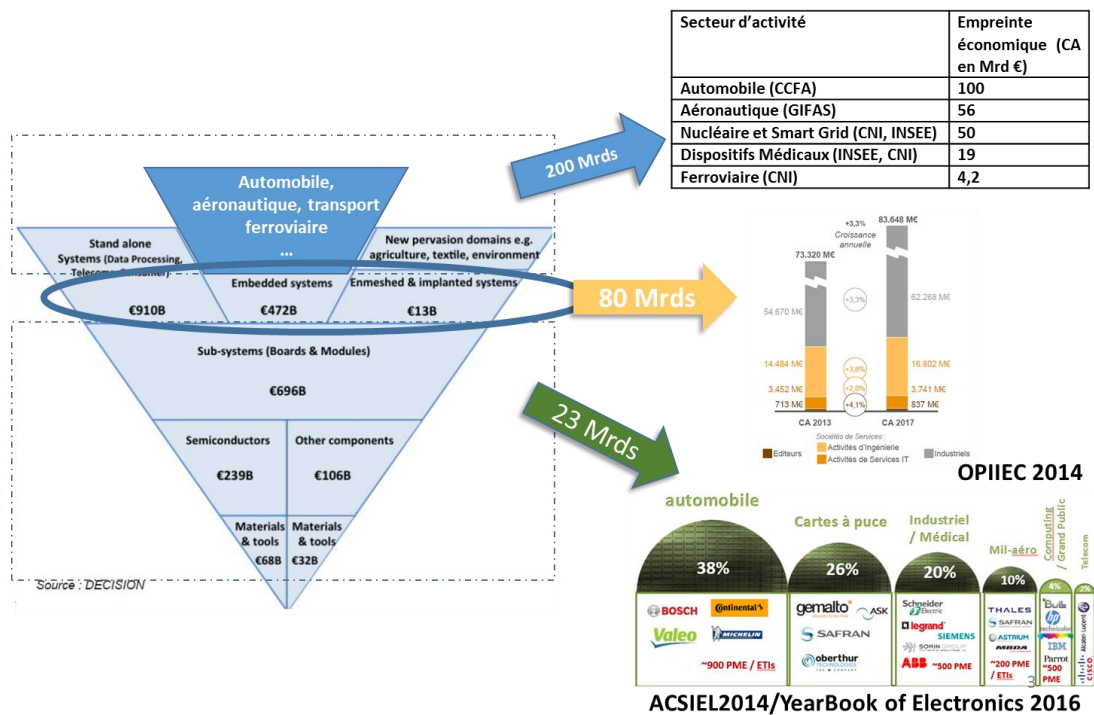
Ce faisant, les technologies des CPS sont fondées sur la synergie entre les composants (matériel et logiciel) et les systèmes, et la synergie entre le numérique et le physique. La maîtrise des CPS au niveau national permet d'amplifier l'impact des initiatives nationales stratégiques déjà lancées comme celles relatives à la nanoélectronique, aux logiciels embarqués et à l'intelligence artificielle dans une approche synergétique. En revanche, la non maîtrise des CPS constituerait une menace d'affaiblissement de secteurs clefs de l'économie française, qui pèserait sur toute la chaîne de la valeur, depuis les systèmes les plus complexes jusqu'aux composants.

A travers des exemples d'impacts des CPS dans différents secteurs industriels, on a pu constater que le potentiel et les défis associés aux CPS sont particulièrement importants pour la compétitivité de l'industrie française, quel que soit le secteur concerné. L'industrie française devra saisir rapidement les nouvelles opportunités de développement offertes par les CPS. La non maîtrise des CPS constituerait une menace d'affaiblissement de secteurs clefs de l'économie française. Cette menace pèserait sur toute la chaîne de la valeur, depuis les composants jusqu'aux systèmes les plus complexes.

Deuxième partie : Impact de l'accompagnement des industriels nationaux dans les CPS

Les CPS ont un impact direct dans une chaîne de la valeur comportant trois maillons essentiels (rapport du HLG¹) :

- les systèmes électroniques : il s'agit de produits et d'équipements à base d'électronique des différents secteurs de l'économie. Ce marché est estimé à 200 Mrd € en France selon l'étude de l'INSEE citée plus haut ;
- les systèmes embarqués : il s'agit de systèmes informatisés conçus pour résoudre un problème ou une tâche spécifique au sein d'un système plus large. Ce marché est estimé à près de 80 Mrd € en France, selon l'étude OPIIEC ;
- les sous-systèmes électroniques : il s'agit des cartes et des modules électroniques qui seront embarqués dans des produits ou des équipements. Ce marché est estimé à près de 23 Mrd € en France selon les études ACSIEL et Marketforecast.



Ces trois maillons sont intimement liés et, pour être durable, une position forte dans un secteur économique nécessite une maîtrise de l'ensemble de la chaîne. À titre de rappel, **l'Europe a toujours su garder une position forte dans les sous-systèmes électroniques et les semi-conducteurs des secteurs où elle est très présente, comme les domaines de l'automobile, de l'énergie et de la sécurité.** Ainsi, même si la part du semi-conducteur européen est en apparence faible (11% de la production mondiale) la part est importante dans les secteurs stratégiques où l'Europe est dominante. Ainsi l'Europe produit 55% des composants pour l'automobile, 50% des composants pour l'énergie et la sécurité et plus de 40% des composants pour le secteur industriel.²

¹ "A European Industrial Strategic Roadmap for Micro and Nano-Electronic Components and Systems", HLG, Jan 2014

² "Digitising European Industry Strengthening competitiveness in digital technologies value chains and platforms", Peter Droell and Khalil Rouhana, European Commission DG RTD and DG CONNECT, 2016

Les CPS introduisent des fossés technologiques propres qui nécessitent une action de R&D spécifique, c'est pourquoi ils font l'objet de programmes d'aides massifs aux Etats-Unis et en Allemagne.

Face à l'importance de ces CPS, les Etats-Unis et plusieurs pays de l'Union Européenne (notamment l'Allemagne, l'Autriche et la Suède) ont lancé des programmes majeurs de financement de la R&D&I dans ce domaine. La Commission Européenne a également inclus dans ses programmes de travail, dès le démarrage de H2020, un financement significatif pour les CPS reconnaissant ainsi ce domaine comme une composante majeure au soutien de la transformation numérique qui impacte tous les secteurs de l'économie.

Le terme de CPS a été initialement introduit aux Etats-Unis pour désigner les systèmes embarqués interagissant avec le monde physique via des capteurs et des actionneurs. Le terme a été ensuite adopté en Europe, premièrement par l'Allemagne et puis par la Commission Européenne via le programme PCRD, comme le pilier principal de l'industrie 4.0 (rapport ACATECH³) pour désigner une évolution des systèmes embarqués connectés et intelligents.

Le même rapport ACATECH donne aussi un panorama des programmes nationaux sur les CPS. On peut voir que plusieurs pays tels que l'Autriche, la Suède, la Finlande et la Belgique, ont aussi mis en place de grands programmes de soutien aux CPS, ainsi que le Japon et la Chine depuis 2014 en dehors de l'Europe et des Etats-Unis.

En ce qui concerne l'Allemagne, le niveau de financement des projets relatifs aux CPS est accessible à partir du rapport ACATECH. Le gouvernement finance les programmes CPS à hauteur de 100 M€/an et ce depuis 2011. Le même rapport détaille les programmes d'aides aux Etats-Unis qui s'élèvent à plus de 1 000 M\$ depuis 2008.

On note donc que l'Europe s'est déjà organisée pour relever le défi des CPS et de leur diffusion. De plus, les principaux concurrents de l'industrie française bénéficient en plus de programmes nationaux, complémentaires, souvent plus agiles.

Les CPS nécessitent une approche de conception globale prenant en compte la connectivité entre sous-systèmes et systèmes et la connectivité avec l'environnement. Cette approche globale entraîne une explosion de la complexité au niveau des méthodes et des outils de conception et crée de nouveaux besoins en termes de briques génériques (logiciel et matériel) spécifiques aux CPS.

Ces nouvelles technologies des CPS sont transversales et servent aux différents secteurs applicatifs. Ainsi une partie significative des efforts et des investissements en matière de recherche et de développement pourra être mutualisée et donc plus largement diffusée à tous les secteurs de l'industrie et pour tous les types d'acteurs (grand groupes, PME et startups). Il s'agit d'une occasion à saisir pour améliorer la synergie entre les composants (matériel et logiciel) et les systèmes, et la synergie entre le numérique et le physique. **La maîtrise des CPS au niveau national et la connaissance des contraintes spécifiques aux CPS permettent d'amplifier l'impact des initiatives nationales stratégiques déjà lancées comme celles relatives à la nanoélectronique, aux logiciels embarqués et à l'intelligence artificielle dans une approche synergétique.**

#

³ Rapport ACATECH « Integrated research agenda Cyber-Physical Systems (agenda CPS) Eva Geisberger/Manfred Broy (Eds.), Mars 2015.

Troisième partie : Proposition d'un dispositif complet visant à mettre les technologies du CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française

Cette troisième partie est consacrée à la description du dispositif visant à mettre les technologies des CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française. Le dispositif proposé est articulé autour d'une feuille de route CPS, technologique et scientifique, et d'un programme d'accompagnement à destination des PME. Le dispositif capitalise sur les projets préexistants et est en synergie avec les nouvelles feuilles de route (nanoélectronique, IoT, IA). Il comprend une expression des besoins en formation spécifique aux CPS. Les besoins de formation ainsi que le chiffrage de son financement sont évalués.

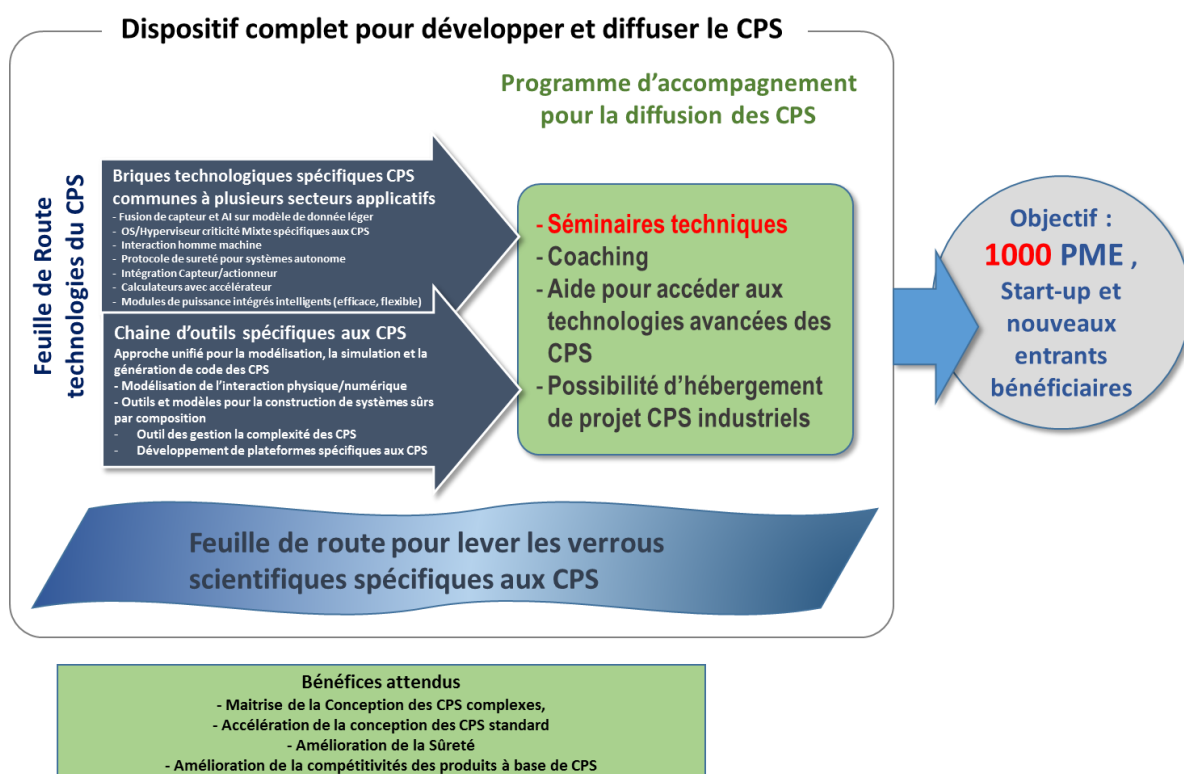
Le dispositif national mettra les architectures numériques des CPS à la portée de l'ensemble de l'industrie française et permettra de réaliser trois objectifs :

1. La maîtrise par les industriels intégrateurs et les équipementiers de l'architecture numérique des principales classes de CPS (véhicules autonomes, avions connectés, nouveaux systèmes ferroviaires, « *smart grid* » nucléaire/renouvelable) autour d'une chaîne d'outils génériques de conception et de validation des CPS intégrant des briques technologiques d'intelligence artificielle. Ces outils sont basés sur des outils du commerce et sur des modules open source.
2. La disponibilité de sous-systèmes cyberphysiques génériques compétitifs au niveau mondial, développés en France, réalisables à partir de composants physiques conçus en France, comme les processeurs génériques de calcul, les sous-système génériques de connectivité multimodale, les sous-systèmes génériques d'interfaces adaptatives et coopératives.
3. La constitution d'un écosystème globalement compétitif sur toute la chaîne de la valeur par l'accompagnement de plus de 1000 PME vers les CPS.

Pour atteindre ces objectifs, le dispositif proposé repose sur deux actions :

- une feuille de route comprenant un volet technologique pour développer des outils open source et des briques génériques spécifiques aux CPS et un volet amont sur les verrous scientifiques spécifiques aux CPS ; cette action vise à couvrir les deux premiers objectifs ;
- un programme d'accompagnement pour faciliter la diffusion et l'accès aux technologies des CPS pour l'ensemble des entreprises, avec une attention particulière aux PME, aux startups et aux nouveaux entrants dans les domaines des CPS ; cette action vise à couvrir le troisième objectif.

Compte tenu des initiatives d'ores et déjà prises notamment aux Etats-Unis et en Allemagne, l'ensemble des feuilles de route doit être opérationnel d'ici deux ans, et monter rapidement en compétence sur les quatre années suivantes, soit six ans au total. C'est principalement cette phase de montée en charge des six premières années qui requière le soutien des pouvoirs publics. Le dispositif proposé capitalise sur les projets existants, et notamment dans les domaines des systèmes embarqués (outils et plateformes de conception, hyperviseur, ateliers de modélisation, véhicules autonomes). Il est aussi en synergie avec les nouvelles feuilles de route technologiques récentes ou en cours d'élaboration (nanoélectronique, IA, IoT).



Dispositif complet à mettre en place en France dans le domaine des systèmes cyberphysiques : une feuille de route CPS et un programme d'accompagnement pour la diffusion des CPS

Conclusion

La mise en œuvre de la feuille de route technologique des CPS, dans la continuité des actions engagées au cours des dernières années, vise à rendre la filière française de l'embarqué, qui représente déjà plus de 400 000 emplois en France, encore plus compétitive afin de créer des activités, de la valeur et donc des emplois sur le territoire national. Elle doit aboutir à des résultats concrets, la maîtrise industrielle des architectures numériques des CPS, pour l'ensemble des acteurs de cette filière : fournisseurs de solutions technologiques ou de services innovants, laboratoires académiques, industriels de toutes tailles intégrateurs de systèmes embarqués. Elle est surtout fondamentale pour le maintien de la compétitivité des filières applicatives qui ont un besoin stratégique de maîtriser ces nouvelles technologies des CPS dans les six prochaines années ; il s'agit notamment de l'automobile, de l'aéronautique, du spatial, du nucléaire, de la distribution d'énergie, ou encore du secteur des dispositifs médicaux, qui représentent ensemble plus de 200 milliards d'euros de chiffres d'affaires en France.