

BRIQUES GÉNÉRIQUES DU LOGICIEL EMBARQUÉ

Mission confiée par

Christian Estrosi, Ministre chargé de l'Industrie

**Nathalie Kosciusko-Morizet, Secrétaire d'État à la Prospective et au
Développement de l'Économie Numérique**

René Ricol, Commissaire Général aux Investissements d'Avenir

Dominique Potier

7 octobre 2010

Remerciements

Le contenu de ce rapport est le résultat de la réflexion collective conduite du 25 juin au 29 septembre 2010 par les membres du Groupe de travail constitué pour la mission et dont les noms figurent ci-dessous :

Eric Bantégnie	Eliane Fourgeau	Alain Ripart
Michel Bidoit	Frédéric Hannyoy	Fred Rivard
Riadh Cammoun	Gérard Lary	Gérard Roucairol
Jean-Luc Chabaudie	Gilles Le Calvez	Josepf Sifakis
Cyrille Comar	Christophe Lécluse	Bruno Sportisse
Jean-Claude Derrien	Claude Lepape	Marie-Line Valentin
Michel Desjouis	Jean-René Lequepeys	
Jean-Luc Dormoy	Philippe Richard	

Le groupe s'est organisé en sous-groupes de travail animés par Eliane Fourgeau, Eric Bantégnie, Riadh Cammoun, Jean-Luc Dormoy et Claude Lepape.

La rédaction du rapport a été un travail partagé avec trois contributeurs principaux : Eric Bantégnie pour la présentation et l'analyse des briques technologiques du logiciel embarqué; Claude Lepape pour la présentation et l'analyse des écosystèmes du logiciel embarqué ; Jean-Luc Dormoy pour les exposés sur l'évolution et la maturité des écosystèmes de l'embarqué.

La motivation, l'engagement de tous pendant la période où s'est déroulée la mission ont été décisifs pour mener à bien, dans un délai limité, une analyse approfondie des enjeux du logiciel embarqué qui a permis de faire émerger les orientations et les priorités proposées.

Je souhaite exprimer ici à chacun des membres du groupe de travail mes remerciements pour ses contributions à cette mission.

Sommaire

1.	SYNTHÈSE	7
2.	CONTEXTE, OBJECTIFS, ORGANISATION ET METHODE DE LA MISSION	9
3.	LE LOGICIEL EMBARQUE	11
3.1.	Introduction	11
3.2.	Logiciel embarqué et microélectronique	14
3.3.	Définition, écosystèmes et caractéristiques du logiciel embarqué	15
3.4.	Modèle de maturité des écosystèmes de l'embarqué	18
3.5.	Enjeux principaux	21
4.	ACTIVITES, ACTEURS ET R&D LOGICIEL EMBARQUE EN FRANCE	25
4.1.	Dimension globale des domaines système et logiciel embarqué	25
4.2.	Activités et acteurs industriels du logiciel embarqué en France	25
4.3.	Activités et acteurs de la recherche publique en logiciel embarqué en France	28
4.4.	R&T logiciel embarqué en France	29
5.	ENJEUX DES ECOSYSTEMES DU LOGICIEL EMBARQUE	31
5.1.	Exigences critiques et exigences de qualité de service	31
5.2.	Analyse et conclusions	33
6.	ENJEUX DES BRIQUES GENERIQUES DU LOGICIEL EMBARQUE	37
6.1.	Introduction	37
6.2.	Analyse des briques	38
7.	PRIORITES TECHNOLOGIQUES POUR LES BRIQUES GENERIQUES DU LOGICIEL EMBARQUE	45
7.1.	Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués	48
7.2.	Vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués.	50
7.3.	Virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core.	52
7.4.	Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués.	54
7.5.	Plates-formes logicielles embarquées de service.	55
7.6.	IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués.	55
7.7.	Bibliothèque génériques pour le traitement (signal, image, contrôle ...) embarqué.	56
7.8.	Gestion de l'énergie embarquée.	57
8.	PROGRAMMES ET INITIATIVES INTERNATIONALES DE R&D EN LOGICIEL EMBARQUE	59
8.1.	Europe	59
8.2.	USA : Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Programme	64
9.	PROPOSITIONS	67
9.1.	Introduction	67
9.2.	Propositions	69
9.3.	Actions d'accompagnement	74
10.	ANNEXE A : LETTRE DE MISSION	77
11.	ANNEXE B : GROUPE DE TRAVAIL	79

12.	ANNEXE C : AUTRES CONTRIBUTEURS	80
13.	ANNEXE D : ENTRETIENS	81
14.	ANNEXE E : CONTRIBUTEURS « LOGICIEL EMBARQUE » A LA CONSULTATION SUR LES USAGES, SERVICES ET CONTENUS NUMERIQUES INNOVANTS	82
15.	ANNEXE F : DOCUMENTS DE REFERENCE	83

1. SYNTHÈSE

Les technologies des systèmes embarqués, logiciel embarqué et microélectronique, ont la capacité de transformer tous les objets du monde physique - du plus petit au plus grand, du plus simple au plus complexe - en objets numériques, intelligents, autonomes et communicants. L'émergence du Web des Objets, jonction du monde du Web et de celui des systèmes embarqués, amplifie de façon considérable cette révolution.

De fait, le déploiement généralisé des systèmes embarqués modifie profondément notre environnement, est porteur de très nombreuses innovations de produits et d'usages et impacte l'ensemble des activités industrielles et de services.

La maîtrise des technologies des systèmes embarqués constitue donc un élément-clé de compétitivité industrielle.

En ce qui concerne la microélectronique, l'analyse des différentes technologies concernées et des sites français de production a été réalisée par Laurent Malier¹ dans le cadre de la mission qui lui avait été confiée en octobre 2009 par le Ministre chargé de l'industrie.

Le présent rapport porte sur le logiciel embarqué et plus particulièrement sur les priorités à retenir pour la maîtrise des briques technologiques du logiciel embarqué et sur la structuration, dans la durée, de masses critiques de compétences technologiques sur ce domaine. Il propose un ensemble de propositions sur ces deux aspects pour une mise en œuvre dans le cadre des Investissement d'Avenir soutenus par le Fonds pour la Société Numérique.

L'analyse des enjeux et priorités du domaine logiciel embarqué présentée dans le rapport est menée selon quatre axes :

- les programmes et initiatives internationales de R&D en logiciel embarqué ;
- la situation des acteurs, des effectifs et de leur structuration ;
- les enjeux des « écosystèmes du logiciel embarqué » selon les exigences propres à chaque marché ;
- les enjeux des différentes « briques génériques du logiciel embarqué ».

Concernant les programmes et initiatives internationales de R&D en logiciel embarqué, la plus significative des initiatives nationales par rapport aux enjeux et propositions présentées dans ce rapport est celle de la Nationale Roadmap Embedded Systems allemande.

La situation des acteurs est présentée et analysée sur la base des études disponibles. Elle met en évidence un potentiel global fort et une situation de leadership dans plusieurs secteurs industriels. Mais elle révèle également un secteur industriel primaire - celui des éditeurs et plus généralement des techno-providers de logiciel embarqué – fragile, ayant aujourd'hui trop peu d'acteurs de taille suffisante pour exploiter pleinement le potentiel technologique national, le pérenniser et le projeter au niveau international. La même situation d'un potentiel « éclaté » est constatée dans la recherche publique.

L'analyse des écosystèmes est présentée en distinguant les différentes natures d'exigences – exigences « critiques », exigences de « qualité de service » - auxquelles doit satisfaire un système embarqué selon le domaine d'application, exigences qui déterminent fortement les

¹ Les sites français de production micro-nanoélectronique, Laurent Malier, mai 2010.

caractéristiques des briques logicielles utilisées. Elle montre également que, dans un secteur donné, la maturité et l'ouverture de la plate-forme logicielle embarquée est un facteur déterminant pour la structuration de l'écosystème de ce secteur.

L'analyse confirme que la nature des exigences structure encore significativement les acteurs et les technologies. Elle met également en évidence le déplacement et l'effacement des frontières entre les domaines des systèmes embarqués à exigences dites « critiques » (aéronautique, ferroviaire, énergie) et les domaines à exigences « non-critique » ou de « qualité de service » (la maison intelligente, l'électronique grand public, l'e-santé, la ville numérique, le smart-grid, etc.). Ainsi, les exigences de sûreté fortes qui étaient jusqu'à présent limitées aux premiers domaines cités vont progressivement s'étendre à l'ensemble des domaines de déploiement des systèmes embarqués. De même, la connectivité généralisée des systèmes embarqués impose à l'ensemble des secteurs des exigences nouvelles de sécurité informatique et de confiance numérique. Enfin, le déploiement de systèmes embarqués devant satisfaire ces exigences dans des marchés de grands volumes fortement contraints en termes de coût et de Time-to-market est à l'origine de nouveaux enjeux technologiques et industriels majeurs.

Les briques génériques du logiciel embarqué sont analysées selon une segmentation technologique, chaque segment définissant lui-même deux briques : la brique « embarquée » proprement dite, c'est-à-dire la brique logicielle dont le code s'exécute et fait fonctionner le système embarqué; la « brique outil » qui a servi à concevoir, configurer ou générer la « brique embarquée ». En conclusion de cette analyse, huit Priorités Technologiques sont retenues et présentées.

L'ensemble des analyses précédentes conduit à formuler huit propositions pour la maîtrise de briques génériques du logiciel embarqué et pour la structuration, dans la durée de masses critiques de compétences technologique :

1. Cibler les instruments vers les objectifs de masses critiques ;
2. Focaliser les ressources sur huit technologies prioritaires ;
3. Mettre en place l'effort financier nécessaire pour structurer des masses critiques de compétences et pour saisir les opportunités ;
4. Structurer les projets « Logiciel Embarqué » selon les axes « Briques technologiques » et « Systèmes » ;
5. Assurer la cohérence technologique et industrielle des partenariats ;
6. Exploiter l'effet de levier des autres instruments de constitution de masses critiques ;
7. Établir une vision multi-annuelle et multinationale;
8. Jouer de l'approche « investisseur avisé ».

Est également recommandé la mise en place d'actions d'accompagnement sur les thèmes suivants :

- Suivi et connaissance du domaine logiciel embarqué ;
- Animation et décloisonnement des écosystèmes ;
- Manifestation internationale Systèmes et Logiciels Embarqués ;
- Disponibilité et accès aux compétences en logiciel embarqué.

2. CONTEXTE, OBJECTIFS, ORGANISATION ET METHODE DE LA MISSION

Comme rappelé en introduction de la lettre de mission (cf. Annexe A) du Ministre chargé de l'industrie, de la Secrétaire d'État à la prospective et au développement de l'économie numérique et du Commissaire général aux investissements d'avenir, l'un des atouts majeurs de l'économie française réside dans l'existence de grands industriels intégrateurs, dans des domaines tels que les technologies de l'information, les télécommunications, l'automobile, l'énergie, l'aéronautique ou encore le spatial.

Ces domaines présentent deux caractéristiques essentielles :

- l'innovation, tous secteurs confondus, y repose de plus en plus sur le logiciel embarqué ;
- les développements logiciels « métier » sont possibles et sont étroitement déterminés par la maîtrise de briques technologiques génériques

Les briques génériques du logiciel embarqué sont donc appelées à jouer un rôle comparable à celui de la micro-nanoélectronique quant à leur impact sur la capacité d'innovation - et donc la compétitivité – de l'ensemble de l'industrie.

L'évolution technologique (et le jeu des acteurs, tel qu'il peut être observé au niveau mondial) rend nécessaire la constitution d'importantes masses critiques pour le développement des briques génériques du logiciel embarqué.

La maîtrise des briques génériques du logiciel embarqué constitue ainsi un enjeu de premier plan pour la compétitivité de moyen et long terme de l'industrie française. A ce titre, ces technologies ont été retenues au titre du « volet numérique » des investissements d'avenir.

A partir de ces constats, l'objectif fixé à la mission est de conduire l'analyse et de formuler des propositions pour :

1. Les priorités à retenir pour la maîtrise des briques technologiques du logiciel embarqué.
2. La structuration, dans la durée, de masses critiques permettant d'adresser les principaux verrous technologiques génériques du logiciel embarqué.
3. La préparation du cahier des charges des appels à projets du programme « économie numérique » des investissements d'avenir.

Les impacts attendus de la mise en œuvre de ces propositions sont :

- Un ensemble de priorités technologiques pour le développement du domaine, partagées, suivies et mises à jour par:
 - les programmes du volet « économie numérique » des investissements d'avenir ;
 - les pôles de compétitivité ;
 - les organisations professionnelles du secteur (Syntec informatique, CG2E, FIEEC ...) ;
- Le développement et la structuration d'écosystèmes naissants d'entreprises fournisseurs de briques génériques du logiciel embarqué et des services associés, avec une méthodologie pour les identifier et les susciter, ou la maturation d'écosystèmes déjà installés, de façon conjointe et intégrée.
- La structuration des acteurs de la recherche publique autour d'ensembles économiques et technologiques cohérents

- Le développement de l'innovation et de la compétitivité des produits et systèmes dans tous les secteurs de l'industrie et des services par la mise en œuvre intensive des technologies du logiciel embarqué.

La mission a été conduite avec un Groupe de Travail dont la liste des membres est donnée en Annexe B. Il rassemble une vingtaine de professionnels représentatifs des principaux acteurs et des principales thématiques du domaine :

- Responsables d'entreprises des secteurs concernés de l'industrie et des services.
- Responsables d'entreprises fournisseurs de briques génériques et plus généralement de technologies pour les systèmes embarqués.
- Experts de la recherche publique et de l'industrie en matière de logiciels embarqués et technologies associées.

Le Groupe de travail s'est structuré en 4 sous-groupes, chaque sous-groupe pouvant faire appel à des personnalités extérieures au Groupe de travail afin d'assurer une réflexion aussi ouverte que possible. La liste des participants à ces sous-groupes (hors membres du Groupe de travail) est donnée en Annexe C.

Elle a également procédé à des entretiens avec les représentants d'activités ou d'organisations professionnelles non représentées dans le groupe de travail. La liste des personnalités entendues est donnée en Annexe D.

La mission a pris en compte et analysé les contributions sur la thématique Logiciel Embarqué issues de la Consultation publique sur le développement des usages et services numériques lancée par le Secrétariat d'État à la prospective et au développement de l'économie numérique. Sur les 400 réponses reçues, plus de 10 % abordent la thématique du Logiciel Embarqué. La liste de ces contributeurs est donnée en Annexe E.

Par ailleurs, la mission a fait appel aux pôles de compétitivité concernés par le sujet d'une part en les invitant à s'associer aux activités des sous-groupes, d'autre part en les interrogeant sur la cartographie des acteurs du logiciel embarqué dans leurs périmètres (toutefois, il n'a pas été possible de finaliser ces cartographies dans le délai fixé à la mission). Les pôles consultés sont :

- Aerospace Valley,
- Images & Réseaux,
- Minalogic,
- Systèmes de Communications Sécurisés (SCS),
- Systematic,
- Transactions Électroniques Sécurisées (TES).

Chacun de ces pôles a par ailleurs apporté sa vision et ses priorités en matière de Logiciel Embarqué par la contribution adressée à la Consultation sur le développement des usages et services numériques.

Enfin, la mission s'est largement appuyée sur les rapports, études et visions technologiques publiées ces dernières années. La liste de ces documents est donnée en Annexe F.

3. LE LOGICIEL EMBARQUE

3.1. INTRODUCTION

En associant et intégrant composants logiciels évolués, puces électroniques puissantes et miniaturisées les systèmes embarqués permettent de rendre intelligents, sûrs et communicants tous les objets de notre quotidien, du plus petit au plus grand, du plus simple au plus complexe. L'émergence du Web des Objets, jonction du monde du Web et de celui des systèmes embarqués, amplifie de façon considérable cette révolution².

Le déploiement généralisé des systèmes embarqués révolutionne donc notre environnement et l'ensemble des activités industrielles et de services. De fait, dans les industries anciennement établies (automobile, aéronautique, télécommunications, sécurité, énergie, logistique ...), les systèmes embarqués (matériels & logiciels) interviennent déjà aujourd'hui pour près d'un tiers dans les coûts de R&D global du produit.

L'étude IDATE/TNO³ réalisée en 2006 en vue de la seconde phase du programme Eureka ITEA a dimensionné à 132 milliards €, à l'horizon 2015, l'activité mondiale de développements logiciels, pour l'essentiel des logiciels embarqués, dans les principales activités industrielles : aérospatial, automobile, électronique grand public, équipements médicaux, équipements de télécommunications, automatismes industriels. La croissance moyenne annuelle estimée était de 7 % sur la période 2002 – 2015

2015	R&D expenses (Billion EUR)	Software R&D expenses as a percentage of total R&D expenses	Software R&D expenses (Billion EUR)	WW market size (Billion EUR)	Value added (Billion EUR)
Aerospace	51	45%	23	341	191
Automotive	129	35%	45	1 355	705
Consumer Electronics	21	60%	13	197	110
Medical Equipment	84	33%	28	471	280
Telecom Equipment	36	65%	23	257	144
Automation	3	15%	0.5	42	30
TOTAL	EUR 324 Billion		EUR 132 Billion	EUR 2 663 Billion	EUR 1460 Billion

Les chiffres clés de cette étude sont présentés sur la figure ci-dessus. Les données plus récentes disponibles montrent que ce niveau mondial d'activités de développement de logiciel embarqué de 132 milliards € à l'horizon 2015 est très probablement sous-estimé.

Systèmes et logiciels embarqués ont fortement évolué depuis leur apparition dans les années '60 avec quatre phases principales⁴ comme représenté ci-dessous :

- Années 1960 – 70 : Réalisation en logiciel de fonctions auparavant réalisées en matériel.

² Cf. « Pourquoi et comment le monde devient numérique ? », Leçon inaugurale de Gérard Berry au Collège de France, janvier 2008

³ Software Intensive Systems in the future, TNO / IDATE, September 2006

⁴ Les périodes sont données ici à titre indicatif, la chronologie pouvant varier d'un marché à l'autre.

- Années 1970 – 80 : Ajouts de nouvelles fonctionnalités (non réalisables en matériel).
- Années 1980 – 90 : Croissance et maîtrise de la complexité par des architectures logicielles propriétaires.
- Années 2000 : Interopérabilité (système) et maîtrise de la complexité par des architectures logicielles ouvertes.

Le développement aujourd'hui de véritables architectures logicielles intégrées à tous les niveaux de systèmes embarqués - dispositifs terminaux tels que capteurs, actionneurs, cartes à puces et autres objets de la sphère personnelle et industrielle - permet de gérer et d'opérer à distance chacun de ces objets via des systèmes de supervision adaptés. Ces architectures intégrées apportent ainsi la possibilité de transformer n'importe quel objet du monde physique en plate-forme logicielle avec toutes les conséquences potentielles en termes d'évolutivité et de flexibilité fonctionnelle, de connectivité et d'ouverture, de maintenance et de gestion.

Les frontières entre les modèles économiques du monde réel et du monde virtuel sont remises en cause par cette transformation des produits en plates-formes logicielles. De nouvelles opportunités d'innovations en matière de produits et services s'ouvrent avec la transposition

des modèles économiques "Web Centric" au monde physique des objets.

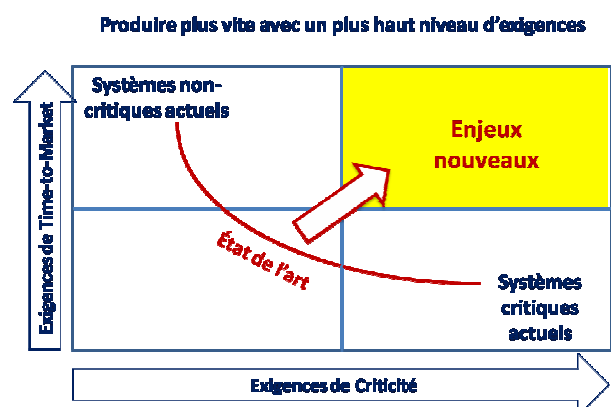
La valeur du produit final est ainsi de plus en plus largement portée par les différents logiciels qui y sont intégrés. C'est la «softwareisation» de la valeur qui se traduit par une forte augmentation de la valeur logiciel dans le produit final où il peut y avoir plusieurs ordres de grandeur entre la valeur perçue et le coût unitaire.

Secteur industriel	% R&D Système Embarqué dans Produit final	% R&D Logiciel dans Système Embarqué
Automotive	56 %	41 %
Avionics / Aerospace	54 %	30 %
Industry / Automation	48 %	55 %
Telecom	58 %	30 %
Consumer / Home	62 %	59 %
Medical	53 %	14 %

Cette tendance se manifeste dans la forte augmentation de la part R&D logicielle dans la part R&D globale des entreprises, tous secteurs industriels confondus : de 31% en 2002 à 41% estimé à l'horizon 2015. Le tableau ci-contre, extrait de l'étude VDC 2007, précise la part des systèmes embarqués et du logiciel dans la R&D des produits pour les plus importants secteurs industriels.

Une autre tendance structurante est le déplacement et l'effacement des frontières entre les domaines des systèmes embarqués à exigences dites « critiques » (aéronautique, ferroviaire, énergie) et les domaines à exigences « non-critique » ou de « qualité de service » (la maison intelligente, l'électronique grand public, l'e-santé, la ville numérique, le smart-grid, etc.).

De fait les exigences de sûreté et sécurité fortes qui étaient jusqu'à présent limitées aux premiers domaines cités vont progressivement s'étendre à l'ensemble des domaines de déploiement des systèmes embarqués. Il en résulte comme illustré ci-dessus des enjeux



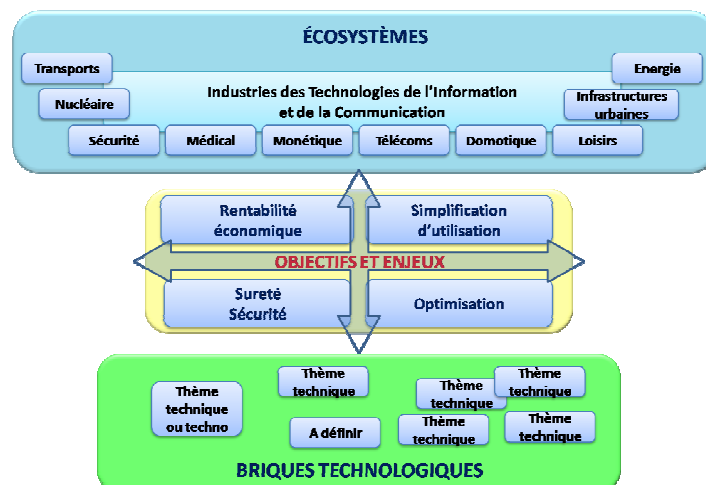
nouveaux majeurs en termes de capacité à répondre à ces exigences dans des contextes de Time-to-Market très contraints.

Le rôle du logiciel dans le domaine des systèmes embarqués ne se limite pas aux composants logiciels embarqués dans le produit final. Il intervient également de façon majeure dans l'ensemble des étapes du cycle de développement d'un système embarqué, conception système, développements logiciels, tests, intégration, vérification et validation. La qualité et l'efficacité des outils de développement conditionnent directement la productivité des équipes en charge des développements de systèmes embarqués. Cet aspect est d'autant plus important que la productivité du développement logiciel dans le domaine des systèmes embarqués reste faible – entre 0,5 et 5 LoC (Line-of-Code) par heure pour les domaines « critiques » – et ne progresse que lentement malgré l'importance des investissements de R&D sur le sujet. Les raisons principales de cette faible productivité sont la complexité et l'automatisation limitée – et donc les coûts élevés – des tâches de vérification et de validation (de 40 % à 50 % du coût total de développement), d'intégration matériel / logiciel et de certification dans le cas de produits soumis à des réglementations en matière de sûreté.

Composants des plates-formes logicielles embarquées d'une part, outils logiciels de développement des systèmes embarqués d'autre part sont les deux ensembles technologiques objets de la mission « Briques génériques du logiciel embarqué (BGLE) ».

Ces composants et outils du logiciel embarqué sont fortement déterminés par les contextes applicatifs dans lesquels ils sont mis en œuvre, contextes eux-mêmes encore hétérogènes et par ailleurs fortement évolutifs. Les briques technologiques répondent en effet à des exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles (performances, sûreté de fonctionnement, sécurité informatique, consommation énergétique) propres à chaque écosystème.

Comme représenté sur la figure ci-dessous, l'analyse des enjeux et priorités du domaine logiciel embarqué ne peut être menée qu'en travaillant simultanément d'une part selon l'axe « écosystèmes du logiciel embarqué », d'autre part selon l'axe « briques technologiques du logiciel embarqué ». C'est l'approche suivie par la mission.



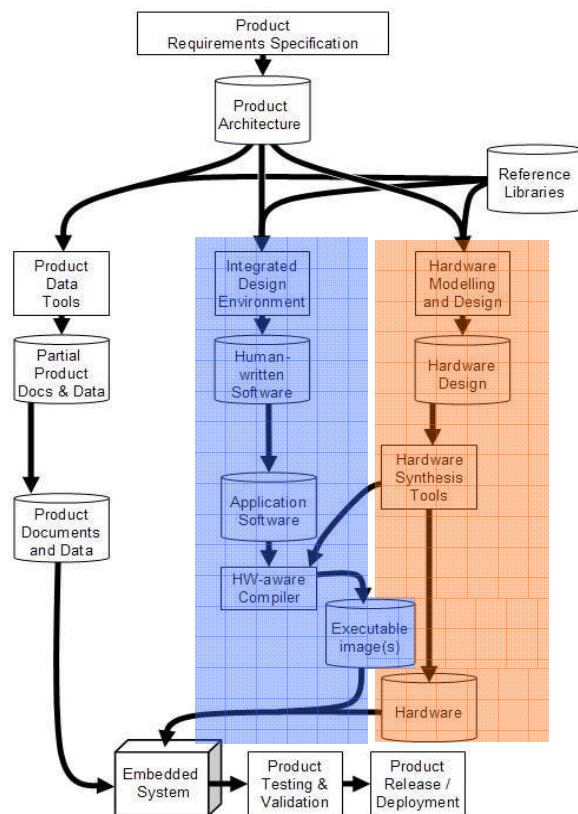
Dans la suite de ce chapitre, les relations et frontières entre logiciel embarqué et microélectronique sont d'abord rappelés. Les écosystèmes du logiciel embarqué et leurs caractéristiques sont ensuite présentés et les enjeux principaux sont exposés. Le concept de

maturité d'un écosystème, défini par les caractéristiques de la plate-forme logicielle (plate-forme d'exécution ou « run-time ») mise en œuvre, est introduit dans la dernière partie du chapitre.

3.2. LOGICIEL EMBARQUE ET MICROELECTRONIQUE

DEPENDANCES MICROELECTRONIQUE / LOGICIEL EMBARQUE

Composants et outils du logiciel embarqué n'existent pas indépendamment des plates-formes matérielles, de leurs composants microélectroniques et des outils associés. Dans la démarche de conception et de développement d'un système embarqué ces deux technologies de base du numérique sont mises en œuvre de façon fortement imbriquées.



Un premier niveau de dépendance se situe, comme illustré ci-contre sur le schéma extrait de la Embedded Systems Common Technical Baseline⁵, dans le « flot de conception » d'un système embarqué qui fait intervenir, en simplifiant, les principales étapes suivantes :

- A partir des exigences système (fonctionnelles et non-fonctionnelles):
 - conception de l'architecture du produit,
 - allocation des fonctions entre microélectronique et logiciel,
 - choix, pour chaque fonction à réaliser, entre développement spécifique ou utilisation de COTS (composants logiciels, chipsets).
- Développement, test et vérification des composants (ingénieries microélectronique et logiciel).
- Intégration des composants et validation

du système embarqué en regard des exigences système.

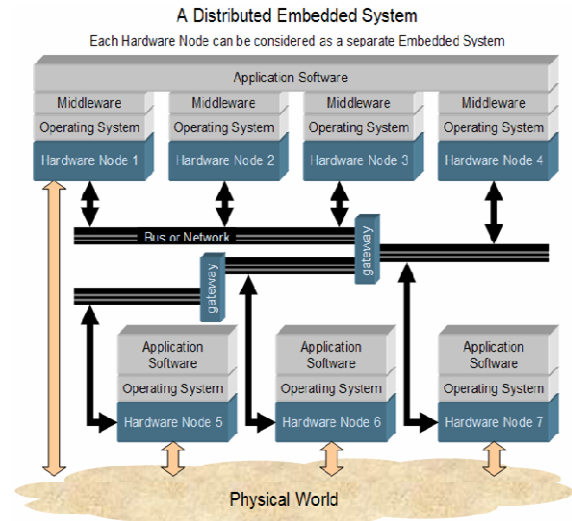
Un second niveau de dépendance se situe au niveau des architectures de calculateurs embarqués.

Comme indiqué sur la figure ci-dessous, extraite également de la Common Technical Baseline, les nœuds de calcul (processeurs, DSP, FPGA, ASIC) intègrent un ensemble de composants logiciel de base tels OS, middleware de distribution et de communication, drivers divers, etc.

⁵ Embedded Systems Common Technical Baseline, B. Bouyssounouse (VERIMAG), Th. Veitshans (CEA), Ch. Lecluse (CEA), juin 2008

Dans les contextes contraints des systèmes embarqués (sûreté de fonctionnement, sécurité informatique, gestion de l'énergie, performances), un enjeu essentiel est la maîtrise conjointe des architectures de calculateurs, de leurs logiciels de base et des outils permettant d'y implanter et exécuter efficacement des applicatifs.

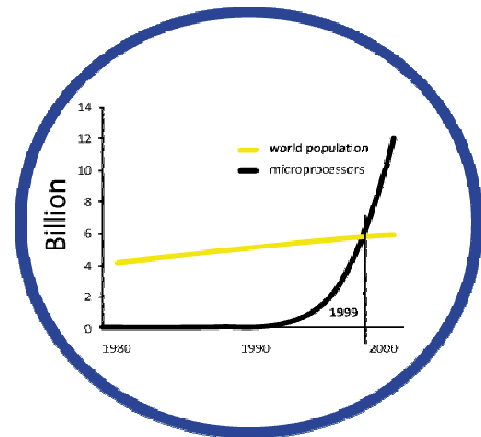
Enfin, un système embarqué est un système en soi qui doit être supervisé tant du point de vue de l'état technique de ses composants matériels et logiciels que de la gestion de son énergie. Ces tâches incombent au logiciel et sont de plus en plus déterminantes dans les performances globales du système.



VOLUMES ET EQUATION ECONOMIQUE MICROELECTRONIQUE / LOGICIEL EMBARQUE

Les données principales du domaine microélectronique, microprocesseurs ou microcontrôleurs (MCU) ⁶, à prendre en compte pour analyser l'évolution des besoins en logiciel embarqué sont les suivantes :

- En 1999, comme illustré sur la figure ci-contre, le nombre de microprocesseurs ou microcontrôleurs en service a dépassé la population humaine ;
- Il y a environ 100 milliards de MCU actuellement en service, à comparer avec le nombre de PC en service qui était de 1 milliard en 2008;
- Plus de 10 milliards de microcontrôleurs (MCU) ont été produits en 2009 ;
- 60% des nouveaux produits en cours de conception utilisent un 32-bit (et non plus un 8-bit ou un 16-bit) ;
- La croissance des MCU 32-bit est supérieure à 20 % ; l'évolution vers des MCU 32-bit crée une demande forte en capacité de développement des logiciels embarqués ;
- Le prix moyen d'un MCU 32-bit est de 2€ à 7€, directement proportionnel aux tailles des mémoires embarquées dans le MCU ; les tailles des nouveaux MCU pour l'embarqué atteignent près de 2 Méga de flash exécutable; dans ces contextes de volumes massifs, un logiciel embarqué est un logiciel sous fortes contraintes économiques.
- En 2009, plus de 45% des MCU tournent à moins de 100 Mhz, 30% à moins de 500 Mhz ; la consommation électrique est directement liée à la fréquence du MCU.



3.3. DEFINITION, ECOSYSTEMES ET CARACTERISTIQUES DU LOGICIEL EMBARQUE

Un Système Embarqué (SE) est un ensemble matériel / logiciel intégré dans un objet (technique ou non technique) et dotant cet objet d'autonomie, c'est-à-dire d'une capacité de perception,

⁶ Un microcontrôleur rassemble un processeur et des périphériques (entrées/sorties avec le monde extérieur) dans un boîtier

de traitement, d'action et de communication en interaction avec son environnement physique et humain.

Les systèmes et logiciels embarqués jouent un rôle majeur dans la quasi-intégralité des secteurs industriels. Très présents au sein d'industries telles que :

- les transports terrestres (automobile et ferroviaire),
- le nucléaire,
- la défense, l'aéronautique et l'espace,
- les télécommunications (téléphones portables, assistants personnels, applications internes chez les opérateurs),

le logiciel embarqué joue également un rôle de plus en plus important dans de nombreux autres secteurs comme :

- la production, la distribution et la gestion de l'utilisation de l'énergie,
- la production industrielle (automatique, systèmes discrets et continus),
- l'instrumentation médicale,
- le bâtiment (domotique),
- l'électronique grand public (terminaux mobiles, multimédia, jeux et loisirs numériques),
- la logistique (commerce et distribution),
- les infrastructures urbaines (eau, trafic, captation de la qualité de l'air),
- la sécurité (vidéosurveillance, moyens d'identification)
- les transactions bancaires et commerciales (terminaux de paiement, cartes à puce).

Quelques chiffres :

- En moyenne, 1/3 du coût global d'un avion est aujourd'hui lié aux systèmes embarqués, dont 40% en développement de logiciels.
- Environ 20% du coût d'une automobile vient de la conception et de la réalisation des systèmes embarqués ; un véhicule peut regrouper aujourd'hui jusqu'à 70 ECU (Electronic Control Unit) ; le système embarqué a également un effet de levier important : le succès commercial d'une automobile dépend de plus en plus de la qualité des systèmes embarqués et de l'offre de services à l'utilisateur.
- La part du logiciel embarqué dans le développement de nouveaux produits et systèmes de distribution et de gestion d'énergie dépasse les 15%.

Le domaine du logiciel embarqué présente des contraintes et des impératifs spécifiques. L'importance de ces contraintes varie énormément d'un domaine à l'autre, ce qui a un impact significatif sur l'écosystème global du logiciel embarqué.

DES FONCTIONS CRITIQUES

Un système est considéré comme critique dès lors que son dysfonctionnement, pour quelque cause que ce soit, pourrait avoir des conséquences graves sur la sécurité de l'environnement, des personnes, des entreprises ou des biens.

La criticité d'un système se traduit naturellement par un besoin fort de réduction du risque :

- réduction de la probabilité d'un dysfonctionnement susceptible d'avoir de fortes conséquences,
- réduction des conséquences possibles d'un dysfonctionnement.

Ceci, dans la plupart des cas, sous des contraintes de temps-réel fortes (mais, pas toujours) et avec des exigences de réduction de risque qui s'expriment au niveau du « système » global : matériel et logiciel ; capteurs, actionneurs et moyens de communication ; en termes de disponibilité de l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du système.

La production d'énergie nucléaire, la production et le raffinage de produits pétroliers ou de produits chimiques dangereux, les transports aériens et ferroviaires constituent les secteurs de plus forte criticité.

Trois éléments de criticité et donc de confiance dans les systèmes, doivent être distingués :

- Sûreté de fonctionnement (en anglais, « dependability ») : confiance portant sur la réalisation (dans tous les cas) de fonctions données ;
- Sécurité des personnes et des biens (« safety ») : confiance portant sur l'absence de conséquences graves, même en cas de panne ;
- Sécurité de l'information (« security ») : confiance dans la confidentialité et l'intégrité des données et dans l'impossibilité de détourner le système à des fins autres que celles prévues par ses concepteurs.

Ces éléments sont bien entendus liés : la sûreté de fonctionnement contribue à la sécurité des personnes et des biens, la sécurité de l'information peut avoir un impact fort sur la sûreté de fonctionnement, etc.

DES CONTRAINTES DES QUALITES DE SERVICE

Les systèmes embarqués sont par ailleurs soumis à des limitations en termes de volume, de poids, de puissance de calcul, de mémoire disponible, d'alimentation et de consommation énergétique, qui obligent à réaliser « au mieux », c'est-à-dire sans garantie formelle, diverses fonctions « non-critiques » selon des niveaux de qualité de service fixés :

- des fonctions de mesure et transmission d'information et d'action immédiate sur le monde physique (régulation) ;
- des fonctions d'optimisation, par exemple, de la productivité ou de l'efficacité énergétique d'une machine, ou du confort d'un utilisateur final ;
- des fonctions d'interaction avec un utilisateur final, avec des limitations possibles en termes d'interface (affichage réduit), de disponibilité, de « qualité de service » ou de performances en temps réel.

Notons que ces limitations peuvent être soit directement de nature technique, soit la conséquence de contraintes économiques quant au coût de production, d'installation, d'utilisation ou de maintenance du système embarqué. Plusieurs types d'innovation peuvent donc « changer la donne » et procurer des avantages compétitifs à différents acteurs :

- une réduction des contraintes (potentiellement inhomogène selon les secteurs, par exemple plus lente dans le domaine spatial du fait des sévères contraintes de l'environnement) : miniaturisation des composants, augmentation de la puissance de calcul ou de la mémoire, consommation énergétique réduite, capacité de réutilisation d'énergie naturellement présente dans l'environnement (par exemple, une recharge de batterie à partir de micro-capteurs solaires) ;
- une réduction des coûts des composants ;
- une réduction des coûts de développement système (ex : architectures standardisées, favorisant la réutilisation d'applications et la capitalisation de la connaissance) ;

- une amélioration des performances pour des contraintes données, pouvant passer par une gestion fine de ces contraintes (par exemple, une réduction de la fréquence de transmission d'information lorsque la batterie est en partie déchargée) ;
- une meilleure gestion de l'obsolescence des composants (ex : architectures standardisées, favorisant la réutilisation d'applications, indépendamment de l'architecture matérielle ou du choix de composants).

3.4. MODELE DE MATURITE DES ECOSYSTEMES DE L'EMBARQUE

INTRODUCTION, MOTIVATION

Dans le domaine des systèmes et logiciel embarqués, l'innovation couvre un champ large allant du perfectionnement de solutions issues d'un écosystème déjà bien établi à l'émergence, en réponse à une demande de services numériques innovants, d'un nouvel écosystème traversant des frontières industrielles apparemment bien établies.

Structuré par les secteurs « historiques » – avionique, automobile, énergie, etc. – le sentiment partagé est qu'il est nécessaire pour le développement du domaine de dépasser ces frontières ou les approches en silos afin de faire émerger davantage des fournisseurs de technologie multi-domaines. La « softwareisation » constatée des systèmes embarqués constitue une autre manifestation de ces évolutions.

Le passage d'un écosystème à un stade de maturation supérieur peut très bien mettre en grande difficulté un acteur apparemment bien installé – c'est ainsi le cas de Nokia aujourd'hui avec le passage de l'écosystème mobile de l'état « plate-forme ½ ouverte » à « plate-forme ouverte », passage aujourd'hui dominé par Apple et Google/Android.

Afin d'avoir un canevas sous-jacent permettant de mieux comprendre ces évolutions et d'appuyer et justifier les propositions faites, la mission a utilisé un modèle de l'évolution et de la maturation d'un écosystème propre aux technologies de l'information, modèle empirique auxquels les systèmes embarqués n'échappent pas.

LE MODELE

Le modèle repose sur une double constatation :

- l'industrie des technologies de l'information est structurée en une série d'écosystèmes qui, lorsqu'ils ont atteint une certaine maturité, sont caractérisés par une infrastructure ou plate-forme d'exécution d'un côté, et un ensemble de services (logiciels) applicatifs de l'autre ;
- la plate-forme d'exécution regroupe de façon cohérente des composants de type HW⁷, OS⁸, MW⁹, réseau, etc., fournis par un ou plusieurs acteurs. *C'est elle qui structure l'écosystème en question et organise les masses critiques technologiques.*

Par exemple :

- le monde des PC est structuré par le couple Intel-Windows ;

⁷ Hardware (HW) : le matériel électronique.

⁸ Operating System (OS) : le système d'exploitation est une couche logicielle fournissant aux couches applicatives divers services (par exemple le multitâche) de partage des ressources matériels.

⁹ Middleware (MW) ou intergiciel : une couche intermédiaire entre l'OS et le logiciel applicatif, fournissant des services de haut niveau d'abstraction (sécurisation, communication entre composants ou entre calculateurs, etc.).

- le monde des jeux comporte trois écosystèmes principaux : PS3 (Sony), Wii (Nintendo), Xbox (Microsoft) ;
- le monde du mobile vit une compétition intense entre 5 ou 6 écosystèmes : Nokia-Symbian, divers idiomes de Linux, Android, iPhone, Palm OS, Windows Mobile, RIM ;
- le web lui-même est devenu une plate-forme d'exécution avec IP, les web services ;
- dans le monde de l'aéronautique civile, est apparue avec le programme Airbus A380 la première plate-forme modulaire intégrée d'applications avioniques IMA, autour du standard de partitionnement de ressources ARINC 653 et basée sur un réseau Ethernet sécurisé AFDX assurant la sûreté de fonctionnement ;
 - cette plate-forme IMA a vocation à se généraliser pour intégrer l'ensemble des systèmes avioniques (temps réel très critique, électronique déportée...) ;
 - parallèlement se met en place sur les avions une plate-forme plus ouverte dédiée aux applications non-critiques et aux applications compagnie, combinant donc les contraintes d'ouverture et d'évolutivité d'un système d'information et de sécurisation propre à l'embarqué afin de garantir la robustesse aux intrusions.
- dans le monde automobile, AUTOSAR et la standardisation de la plate-forme de services dédiée aux applications embarquées automobiles, dite plate-forme des *Basic Software AUTOSAR*, rendent possibles :
 - la réutilisation d'applications à l'identique sur différents modèles, systèmes et sous-systèmes embarqués, avec tous les bénéfices économiques induits ;
 - le déplacement de la valeur vers les éléments réellement différenciant de l'Architecture Électronique Embarquée véhicule, dans une dynamique d'innovation durable ;
 - l'ouverture du secteur à de nouveaux entrants (indispensable aux ambitions de mobilité étendue du secteur) ;
 - l'accélération de l'innovation, portée par les applications et leurs usages et non plus par l'infrastructure, devenue à terme commodité.
- Dans le domaine de la carte à puce, la spécification IAS ECC¹⁰, dont l'objet est de guider l'implémentation des logiciels embarqués dans la puce, détermine un écosystème associant industriels du domaine, fournisseurs d'outils de test, opérateurs de tests de conformité et agences publiques.
- Dans le domaine des services numériques au domicile des particuliers, les acteurs industriels concernés regroupés au sein de l'AGORA Domiciliaire¹¹ (Orange, SFR, Bouygues, Numéricable, Schneider Electric, Legrand, EDF, Spidcom, Veolia Environnement, SAGEM Communications, Technicolor) considèrent que ces marchés ne pourront se développer sans le passage au stade d'une plate-forme ouverte et appellent les « techno-providers » à faire des propositions dans ce sens.

A maturité, cette plate-forme d'exécution est ouverte, au sens où le client achetant un objet digital (par exemple un PC ou une console de jeu) peut se procurer ensuite de nouveaux services (des applications, des jeux) et les installer. Cela ne signifie pas que le business model sous-jacent est ouvert, il peut être strictement contrôlé par un acteur.

L'objet digital avec sa plate-forme d'exécution ouverte est alors « porteur du business modèle » au sens où il en permet une consommation (et des revenus) postérieurs à son achat. Ceci

¹⁰ Identification Authentication Signature – European Citizen Card

¹¹ Livre Arc-en-Ciel, AGORA du Réseau Domiciliaire, juillet 2010

est en opposition à un matériel qui une fois acheté réaliserait « juste » sa fonction sans procurer de revenus (par exemple le tableau de bord d'une voiture ne génère pas de revenus une fois vendu).

Lorsqu'un nouveau marché apparaît, on n'a pas tout de suite de plate-forme ouverte, on passe par une série d'étapes évoluant vers la maturité, que l'on peut grossièrement caractériser par les états suivants :



Ce type d'évolutions est particulièrement visibles dans les domaines de l'embarqué, comme illustré par les exemples cités précédemment.

Un écosystème est donc *in fine* structuré par la plate-forme d'exécution qui « domine » lorsqu'on a abouti à la maturité. Cette domination se traduit de différentes façons : standards, technologies et solutions conformes aux standards ou propriétaires. Les industriels fournisseurs des briques, ou de l'ensemble, de cette plate-forme sont alors dans une position forte – monopole ou oligopole. Les industriels fournisseurs de services doivent développer pour cette plate-forme, aux conditions imposées.

Le niveau de maturité d'une plate-forme d'exécution définit donc l'ensemble des briques technologiques qu'il convient de maîtriser pour rester compétitifs. Il est structurant à la fois dans la constitution des partenariats (au niveau national, européen et mondial) et pour la structuration des masses critiques technologiques de l'écosystème. Il est donc nécessaire de distinguer, pour l'analyse et les propositions concernant les briques technologiques et les masses critiques, les deux niveaux technologiques suivants :

- le niveau des briques technologiques ;
- Le niveau de la plate-forme d'exécution¹², ou niveau « système » portant sur l'intégration complexe de briques technologiques génériques et / ou spécifiques.

Ces deux niveaux ont été pris en compte dans les travaux de la mission et dans ses conclusions.

Le modèle proposé permet également d'une part, d'identifier les risques dans les domaines où il existe des positions fortes ; d'autre part, à l'inverse, de mettre en évidence les opportunités dans les domaines émergents ou en changement important, comme par exemple celui de la maison intelligente ou de l'e-santé, où des actions concertées et volontaristes sont nécessaires pour les saisir.

Il est proposé que ce modèle de maturité soit utilisé comme guide pour l'évaluation de l'impact économique potentiel des propositions issues des appels à projets du programme « économie numérique » des Investissements d'Avenir.

Il est recommandé également que soit établie une cartographie des écosystèmes existants ou en voie de formation dans l'embarqué afin de pouvoir approfondir les enjeux propres à chacun en particulier pour les secteurs émergents.

¹² Dans l'ensemble de ce rapport, l'expression « plate-forme » a uniquement le sens de plate-forme logicielle d'exécution, telle que définie ici.

3.5. ENJEUX PRINCIPAUX

ENJEUX TECHNIQUES ET INDUSTRIELS

Plusieurs enjeux techniques et industriels sont communs à tous les secteurs :

- Enjeux de plates-formes :
 - Interopérabilité des briques et des systèmes (architecture logicielle)
 - Capacités de traitement et de communication
 - Efficacité énergétique à prendre en compte dès la conception
- Enjeux de conception et de développement
 - Co-conception optimisée matériel / logiciel (liée au compromis généricité / performance) et prise en compte de l'efficacité énergétique
 - Co-conception multi-acteurs
 - Conception virtuelle pour une mise au point efficace de spécifications/exigences fiables
 - Outils du cycle de développement
- Enjeux industriels :
 - Ouverture à des parties tierces *versus* sécurité
 - Ingénierie collaborative structurante de la relation entre acteurs *versus* protection de la propriété intellectuelle
 - Généricité des plates-formes *versus* performance et optimisation des ressources
 - Réduction des coûts d'installation et des besoins de maintenance

ENJEUX DE DECLOISONNEMENT INTER-SECTORIEL

Les fortes différences entre secteurs existent et constituent de fait un enjeu en soi tant elles structurent encore les acteurs, autant chez les intégrateurs (en termes de compétences et de processus de développement), que chez les équipementiers, sociétés de service et éditeurs de logiciels impliqués dans les différents secteurs applicatifs.

De ce point de vue, les actions qui contribuent à décloisonner et à rapprocher les secteurs sont essentielles. L'initiative lancée en 2007, le CG2E¹³ (Club des Grandes Entreprises de l'Embarqué), est un bon exemple de ce qui peut être organisé pour favoriser une démarche d'harmonisation partielle au plan technique des écosystèmes correspondants. Elle vise à partager les bonnes pratiques entre plusieurs domaines industriels à exigences critiques (Aéronautique, Spatial, Automobile, Nucléaire, Ferroviaire, Automatisation et Contrôle industriel) pour ce qui concerne le développement de systèmes embarqués à logiciel prépondérant, couvrant une large gamme d'applications.

Toutefois, ces différences sont amenées, sans s'estomper totalement, à évoluer rapidement. Un exemple de changement structurant, porteur d'enjeux nouveaux, est la coexistence et l'interaction dans un même système de fonctions critiques et de fonctions à qualité de service :

- Si les exigences de certification et les normes quant aux processus de développement sont concentrées sur les fonctions critiques, la pression du marché ou de divers acteurs

¹³ Initiative lancée par les pôles de compétitivité Aerospace Valley, Image & Réseaux, Minalogic et Systematic et le Comité Embarqué de Syntec informatique.

(états, organismes de certification) peut pousser à offrir des garanties contractuelles sur des fonctions à qualité de service.

- Indépendamment de toute garantie, il peut être intéressant d'exploiter certains résultats obtenus sur des systèmes critiques pour fiabiliser des fonctions à qualité de service (meilleure fiabilité, maintenance et évolution plus aisée). Ce qui pose évidemment des questions de perméabilité entre domaines, de coût, et de compétences disponibles.
- Selon les secteurs, des fonctions critiques et à qualité de service pourraient être amenées à cohabiter sur différents systèmes, voire sur un même système partitionné et sûr de fonctionnement, sous réserve du développement des méthodologies et des compétences nécessaires, en visant une conception d'architecture adaptée.

ENJEUX DE COMPETENCES

Les grands industriels de l'électronique ont engagé dans les dix dernières années la transformation majeure et difficile d'une base de compétences à dominante électronique vers une base de compétences à dominante logiciel. Aujourd'hui, l'enjeu principal est pour eux l'accès à des profils qualifiés et expérimentés.

L'étude OPIIEC 2009¹⁴ mettait en évidence les besoins de recrutement et les offres de formation existantes (périmètre France) :

- Besoins de recrutements : 42 500 dont 12 750 jeunes diplômés et 29 750 profils expérimentés chez les industriels et SSII sur la période 2007-2012.
- Offres de formation initiale : une adéquation globale au niveau quantitatif mais avec des fortes insuffisances qualitatives :
 - Seuls 20 % des jeunes diplômés auront reçu une formation dédiée « systèmes embarqués ».
 - Une attente des entreprises pour des cursus intégrant les aspects management de projet, gestion de projets complexes à l'international, etc. avec en conséquence une tension sur les profils ingénieurs.
- Offres de formation continue : pas d'offre structurée avec nécessité de valider auprès des entreprises les besoins de formation continue pour structurer l'offre.

Pour les PME et les bureaux d'étude électroniques, la mutation vers le logiciel embarqué est encore largement à faire. Comme le constate le programme CAP'TRONIC (Compétitivité et Innovation des PME par l'Électronique), ces entreprises disposent aujourd'hui de trop peu de compétences en développement de logiciel embarqué (manque de méthodologies et d'outils) et sont de plus en plus confrontés à des exigences fortes de leurs clients (donneurs d'ordre, intégrateurs, utilisateurs finaux) en termes de robustesse et de sûreté de fonctionnement.

L'enjeu aujourd'hui pour ces PME et bureaux d'étude en électronique producteurs de systèmes embarqués est développer leur savoir-faire en logiciel embarqué afin qu'elles puissent répondre aux demandes de leurs clients et poursuivre le développement de leur activité.

En ce qui concerne les formations initiales en systèmes et logiciels embarqués, leur développement constitue un défi pour l'enseignement supérieur.

Le rapport¹⁵ INRIA de 2006 sur les logiciels embarqués notait : « À l'heure actuelle, il n'existe pratiquement pas, dans l'enseignement supérieur français, de cursus complet et cohérent pour

¹⁴ Adéquation entre les besoins en compétence et l'offre de formation dans les 10 métiers clés de l'informatique embarquée, OPIIEC / Katalyse 2009

la conception des systèmes embarqués (c'est un peu moins vrai dans l'UE). Les disciplines à enseigner sont en effet très variées (automatique, traitement du signal, électronique, informatique) et le plus souvent dépendent d'UFR et/ou d'Écoles Doctorales distinctes. ».

L'étude OPIEC/KATALYSE déjà citée recommande la mise en place de Master spécialisés « Systèmes embarqués ».

ENJEUX GLOBAUX DES TIC

Il faut rappeler l'existence de liens forts entre le domaine des technologies de l'embarqué et celui des technologies de l'information en général. Par exemple, l'optimisation de problèmes combinatoires suppose généralement un compromis entre qualité du résultat et temps de calcul, que le système d'optimisation soit embarqué ou non. En ce qui concerne la consommation énergétique, les architectures embarquées peuvent être pleines d'enseignement pour le calcul « basse consommation » en général. Le domaine du High Performance Computing (HPC) et celui des architectures de calculateurs embarqués ont de nombreux enjeux technologiques communs.

En matière de logiciel libre, ses enjeux généraux valent également pour l'embarqué. En l'absence d'éditeur pour une classe de briques donnée, le recours au logiciel libre peut constituer un moyen de faciliter les collaborations structurantes, les transferts de technologie ou la mise en œuvre de standards ouverts :

- Dans la mesure où les licences libres sont des contrats type bien déterminés, ils facilitent la négociation contractuelle et assurent la sécurité juridique des parties en présence ;
- L'accès aux sources permet de faciliter la rétro-ingénierie, la certification, l'ajout de tests et de fonctionnalités ;
- Il assure des droits équilibrés aux différents contributeurs.

Comme confirmé par de nombreuses études, la France rassemble un potentiel de développeurs de logiciel libre remarquable. La structuration de ce potentiel est également un enjeu de masse critique.

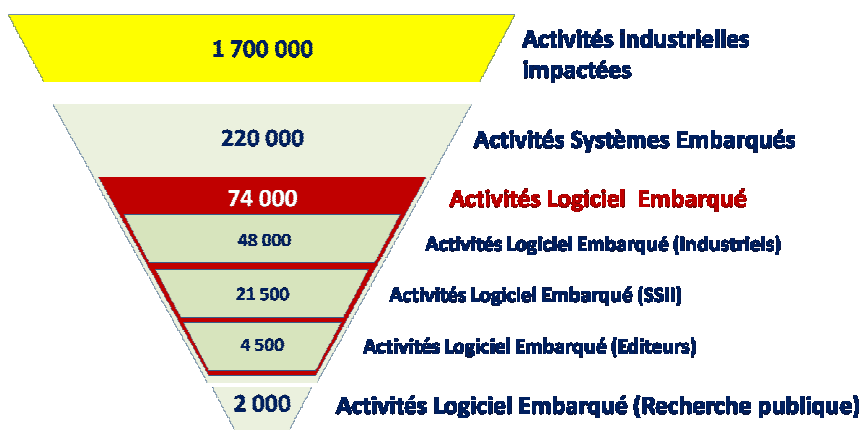
En effet, davantage encore que pour le domaine général des technologies de l'information, la pérennité des composants logiciel libre pour l'embarqué est essentielle. Elle ne peut être assurée sans l'existence d'organisations structurées de développement et de diffusion du logiciel libre, qu'elles soient commerciales ou « non-profit », ayant une ambition de leadership européen.

¹⁵ Logiciels embarqués, Albert Benveniste, INRIA, septembre 2006

4. ACTIVITES, ACTEURS ET R&D LOGICIEL EMBARQUE EN FRANCE

4.1. DIMENSION GLOBALE DES DOMAINES SYSTEME ET LOGICIEL EMBARQUE

La dimension du domaine systèmes et logiciel embarqué, en termes d'emplois directement concernés et d'emplois impactés est figurée sur la figure ci-dessous.



Le premier enjeu exprimé par ce schéma est le nombre d'emplois impactés : 1 700 000 emplois dont :

- 1 500 000 emplois dans les secteurs industriels dont la compétitivité est étroitement déterminée par la maîtrise du logiciel embarqué, soit plus de 50 % des emplois industriels en France¹⁶.
- 200 000 emplois dans les activités de services informatiques et conseil en technologies sur ces secteurs¹⁷.

Le second enjeu est le niveau d'activité que représente le développement des systèmes et logiciels embarqués :

- 220 000 emplois pour les systèmes embarqués, soit une activité annuelle d'environ 30 milliards d'euros ;
- 74 000 emplois pour les logiciels embarqués, soit une activité annuelle d'environ 10 milliards d'euros.

Les autres enjeux sont décrits dans les sections suivantes où sont détaillés les différents types d'activités et catégories d'acteurs.

4.2. ACTIVITES ET ACTEURS INDUSTRIELS DU LOGICIEL EMBARQUE EN FRANCE

Depuis l'apparition des systèmes embarqués, la France a eu une activité scientifique, technologique et industrielle forte et reconnue en matière de logiciel embarqué. Citons simplement deux exemples, l'un déjà ancien, l'autre récent, de cette situation : en 1983, la conception du langage de programmation Ada par l'équipe de CII-Honeywell Bull dirigée par Jean Ichbiah, en réponse à un cahier des charges établi par le département de la Défense des

¹⁶ Données INSEE, base Enquête Annuelle d'Entreprises, 2007

¹⁷ Source Syntec informatique, 2008

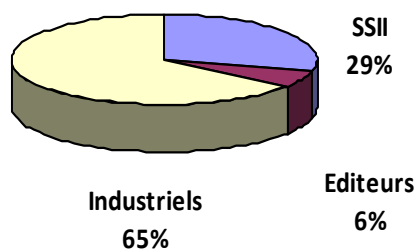
États-Unis (DoD) pour les applications temps-réel et embarqués nécessitant un haut niveau de fiabilité et de sécurité; en 2007, l'attribution du Prix Turing à Joseph Sifakis pour ses travaux sur le Model Checking, une technologie de vérification des systèmes complexes à fortes exigences de sécurité et de sûreté, performante et fiable, très largement utilisée pour les systèmes embarqués critiques.

Afin de caractériser aussi précisément que possible l'activité industrielle logiciel embarqué en France, on distingue ici chaque fois que les données sont disponibles : l'activité *systèmes embarqués*, regroupant électronique embarquée et logiciel embarqué ; l'activité *logiciel embarqué* proprement dite.

Les données d'activités qui suivent sont extraites des études^{18, 19} réalisées pour les Assises de l'Embarqué 2007 et 2008.

L'industrie des systèmes embarqués en France représentait 220 000 emplois (hors secteurs de la micro-électronique) en 2008. A titre de comparaison, ce chiffre était pour la même année de 345 000 pour Allemagne²⁰, soit en rapportant ces deux chiffres aux populations respectives (64,3 M et 82,0 M), un effectif sensiblement plus élevé en Allemagne.

Sur les 220 000 emplois, l'activité logiciel embarqué en représentait 74 000 avec une croissance annuelle de 11 % sur l'horizon 2008-2013. Ces 74 000 emplois se répartissent eux-mêmes entre trois catégories d'acteurs comme représenté sur la figure, soit :



- 4 500 chez les éditeurs,
- 48 000 emplois chez les industriels utilisateurs et intégrateurs de logiciels embarqués,
- 21 500 chez SSII dont 43 % sur des activités de régie.

Effectif total France	Nombre de sociétés (Éditeurs, SSCT)	Effectif total Logiciel embarqué
>500 p.	35	10 000
50 – 500 p.	140	5 000
< 50 p.	1 735	11 000
Total	1 900	26 000

Pour les éditeurs et sociétés de services et de conseil en technologies la répartition des effectifs selon la taille des sociétés est donnée dans le tableau ci-contre. Il est à noter que les 1 735 sociétés ayant un effectif inférieur à 50 p. représentent 42 % de l'effectif global et 91 % du nombre des sociétés. L'effectif moyen s'établit à

14 p.

Pour l'ensemble éditeurs et sociétés de services et de conseil en technologies, leur répartition géographique sur le territoire est représentée sur la carte ci-après.

Au vu des données précédentes et de cette carte, les activités des éditeurs et sociétés de services et de conseil en technologies, apparaissent comme fortement fractionnées et dispersées sur le territoire, traduisant pour la plus grande part une activité de proximité plutôt

¹⁸ Cartographie du secteur des fournisseurs de Logiciels et Services dans le domaine des systèmes embarqués, PAC et IDC, 2007

¹⁹ Etude sur le marché et les compétences autour des logiciels embarqués, OPIIEC / PAC, 2008

²⁰ Embedded Systems in Germany, BITKOM / PAC, 2008

que des activités technologiques fortes, appuyées sur des concentrations significatives de compétences, ayant une capacité de projection nationale et internationale.

De fait, la part du chiffre d'affaires réalisé en France est de 93 % pour les SSII, de 81 % pour les éditeurs (Étude PAC/ IDC 2007).

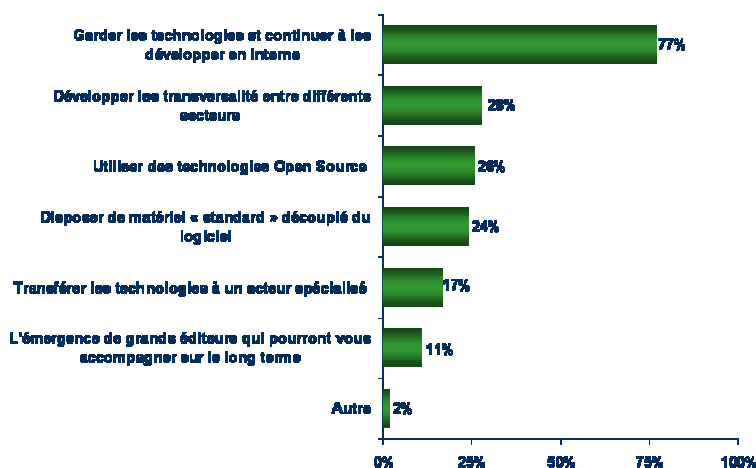
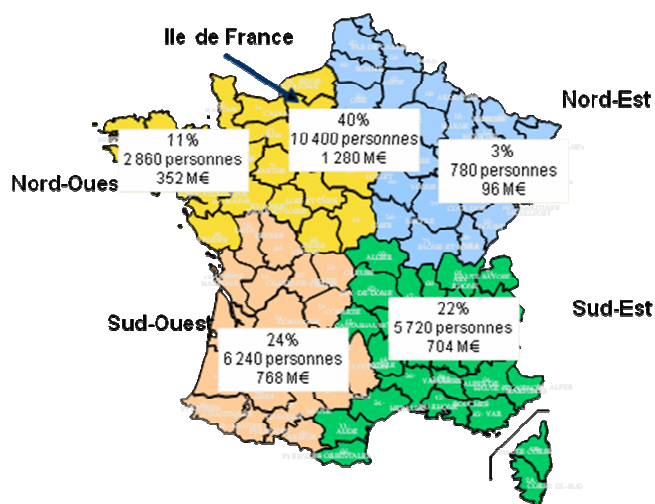
Dans le palmarès 2010 des éditeurs de logiciels français publié par Truffle²¹, deux éditeurs de logiciel embarqué sont cités : Dassault Systèmes à la 1^{ère} place (mais pour lequel le logiciel embarqué ne représente encore qu'une très faible part de ses activités) ; Esterel Technologies à la 55^{ème} place. Dans le palmarès 2009 des éditeurs européens toujours publié par Truffle, seul Dassault Systèmes figure, à la 3^{ème} place, dans le Top 100.

La plus grande partie des activités, 65 %, se trouve chez les industriels utilisateurs et intégrateurs de technologies et services du logiciel embarqué. Ce niveau élevé tient à plusieurs causes :

- le caractère critique de ces technologies et de ces compétences dont la maîtrise interne est indispensable pour la compétitivité et l'innovation des produits ;
- les spécificités « métiers » propres à chaque domaine (aéronautique, automobile, ferroviaire, défense, énergie, médical, etc.) qui limitent l'émergence d'une offre de solutions standardisées ;
- la longue durée de vie (plusieurs dizaine d'années dans les domaines aéronautique et défense) des produits qui conduit les industriels à exiger des engagements de pérennité d'activité que très peu de fournisseurs peuvent satisfaire ;
- la forte adhérence des couches de logiciels embarqués aux matériels et la diversité de ces matériels selon les domaines ;
- la complexité de la mise en œuvre des systèmes embarqués qui exige des ingénieurs très

qualifiés disposant d'un savoir-faire qui ne peut être acquis que par une longue expérience.

Ces aspects sont confirmées par les réponses des industriels concernant leurs stratégies de pérennisation des technologies du logiciel embarqué (étude PAC / IDC 2007) présentées sur la figure ci-contre.

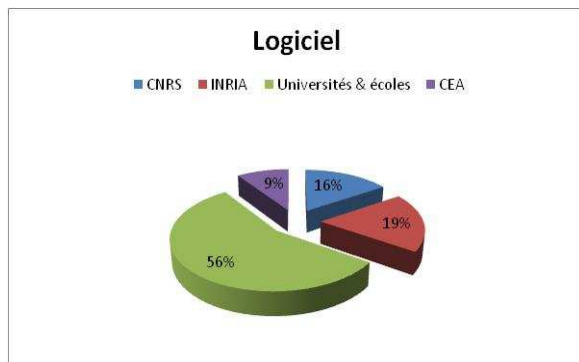


²¹ www.truffle100.fr

Pour 77 % des réponses, la stratégie de pérennisation des technologies du logiciel embarqué est de garder ces technologies et de continuer à la développer en interne.

Le transfert de ces technologies à un acteur spécialisé ou l'émergence de grands éditeurs pouvant apporter un support sur le long terme n'est envisagé que dans respectivement 17 % et 11 % des réponses.

4.3. ACTIVITES ET ACTEURS DE LA RECHERCHE PUBLIQUE EN LOGICIEL EMBARQUE EN FRANCE



L'Alliance des Sciences et Technologies du Numérique (ALLISTENE)²² fait le constat d'un potentiel de recherche public national en STIC important, mais éclaté.

Pour le logiciel, tous domaines confondus, l'effectif global 2009 est de 6 700 chercheurs (dont 56 % d'enseignants-chercheurs) qui se répartissent entre les différents organismes comme indiqué sur la figure ci-contre.

En termes de masses critiques de recherche en logiciel, les effectifs sont, comme indiqué plus haut, dispersés entre un nombre importants de laboratoires (plus de 30 UMR CNRS). En dehors du CEA LIST, il n'existe pas laboratoire public de recherche de taille significative majoritairement dédié aux systèmes et logiciels embarqués.

L'estimation des effectifs de la recherche publique en matière de logiciel embarqué a été faite à partir des données ALLISTENE de la façon suivante :

- par application d'un premier coefficient ETP (Équivalent Temps Plein) de 50 % sur l'effectif Enseignants-Chercheurs.
- par application ensuite d'un coefficient mesurant la part des activités consacrées au logiciel embarqué. Ce coefficient, différent d'un organisme à l'autre, a été validé par les représentants de ces organismes.

	Enseignants Chercheurs	CNRS	CEA	INRIA	Total
Données ALLISTENE	56%	16%	9%	19%	
	3 752	1 072	603	1 273	6 700
Pourcentage (Equivalent Temps Plein)	50%	100%	100%	100%	
	1 876	1 072	603	1 273	4 824
Pourcentage des activités logiciel embarqué)	35%	35%	70%	35%	
	657	375	422	446	1 899

Le tableau ci-dessus résume ces éléments. Nous retiendrons pour la suite du rapport le chiffre de 2 000 chercheurs de la recherche publique travaillant sur le logiciel embarqué.

Une analyse plus fine à la fois quantitative (potentiels et masses critiques) mais aussi qualitative, thématique par thématique, serait d'une grande utilité. Une première étude de ce

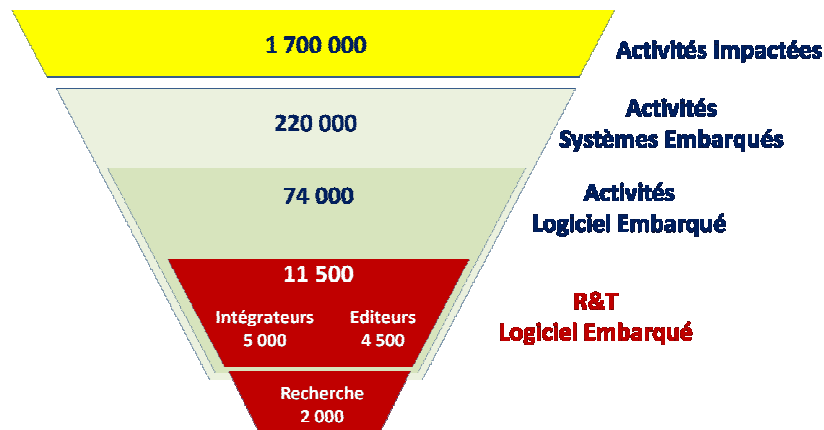
²² ALLISTENE , Création de l'Alliance des Sciences et Technologies du Numérique, MESR, décembre 2009

type, mettant en regard enjeux industriels et priorités de la recherche publique, a été faite en 2006 par un panel d'experts présidé par Albert Benveniste²³.

Il est recommandé que cette étude soit renouvelée en 2011 dans le cadre des groupes programmatiques mis en place par ALLISTENE.

4.4. R&T LOGICIEL EMBARQUE EN FRANCE

DIMENSION GLOBALE DE LA R&T LOGICIEL EMBARQUE



La figure ci-dessus présente (en rouge) la capacité « Recherche et Technologie » (R&T) en logiciel embarqué national (mesurée en effectifs, base 2007) rapportée aux capacités globales de développement en logiciel embarqué et en système embarqué.

Le niveau indiqué d'activités technologiques correspondant à un investissement technologique en logiciel embarqué d'environ 1,7 milliards d'euros pour l'année où il a été estimé (2007).

Sur la base d'une prévision de croissance annuelle moyenne de 7 %, le montant cumulé des investissements technologiques en logiciel embarqué sur la période 2011-2020 sera de 32 milliards €.

DONNEES DETAILLEES

Les données globales ont été obtenues en évaluant la capacité de développement technologique en logiciel embarqué pour les différentes catégories d'acteurs :

- recherche publique, comme précisé plus haut : 2 000 p
- éditeurs de logiciel embarqué : 4 500 p.
- SSII : La part des effectifs des SSII ayant une capacité de développement technologique en logiciel embarqué est estimée à 7 % de l'effectif total logiciel embarqué (Étude PAC / IDC 2007), soit : 1 500 p.
- Industriels : la part des effectifs des industriels ayant une capacité de développement technologique en logiciel embarqué est estimée à 7 % de l'effectif total logiciel embarqué (Étude PAC/ IDC 2007), soit : 3 500 p.

Une caractérisation de la répartition géographique des activités de R&D en matière de logiciel embarqué a été conduite à partir de l'analyse²⁴ des projets de logiciel embarqué du programme

²³ Logiciels embarqués, Albert Benveniste, INRIA, septembre 2006

ARPEGE financés par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) pour les années 2008, 2009 et 2010.

Ce programme est en place depuis plusieurs années, la grande majorité des acteurs du logiciel embarqué ayant une activité propre de R&T y participent et on peut donc considérer que ces données constituent un bon indicateur de l'intensité de R&T en logiciel embarqué dans les différentes régions, particulièrement en ce qui concerne les laboratoires publics.

Le tableau ci-contre donne le nombre de participations à des projets de logiciel embarqué du programme ARPEGE, avec la répartition par catégories d'acteurs, cumulé pour les années 2008, 2009, 2010.

Région	PME	Gdes Entrep.	Labos	Total %
%	14%	22%	63%	
Total	30	47	133	
Île-de-France	11	24	42	37%
Rhône-Alpes	4	5	24	16%
Bretagne	4	2	12	9%
PACA	1	3	12	8%
Midi-Pyrénées		8	7	7%
Pays de la Loire	5	1	5	5%
Lorraine	1	1	8	5%
Languedoc-Roussillon	2		6	4%
Aquitaine		2	5	3%
Autres (< 3 %)	2	1	12	7%

En termes de participations, les cinq ensembles régionaux les plus actifs sont :

- Île-de-France (37 %)
- Rhône-Alpes (16 %)
- Bretagne et Pays-de-Loire (14 %)
- Midi-Pyrénées et Aquitaine (10 %)
- Provence-Alpes-Côte d'Azur (8 %)

Concernant les budgets dépensés, toujours pour les projets de logiciel embarqué du programme ARPEGE, le montant cumulé sur 2008, 2009 et 2010 est de 85,5 M €. Les pourcentages de répartition de ce montant par région sont quasi-identiques à ceux des participations.

²⁴ Je remercie l'ANR pour ces données ainsi que Raymond Fournier, CEA/DRT, qui a réalisé les analyses présentées.

5. ENJEUX DES ECOSYSTEMES DU LOGICIEL EMBARQUE

5.1. EXIGENCES CRITIQUES ET EXIGENCES DE QUALITE DE SERVICE

EXIGENCES CRITIQUES

Le tableau suivant précise pour les principaux secteurs :

- les principaux enjeux de criticité concernés (sûreté de fonctionnement, sécurité des personnes et des biens, sécurité de l'information),
- la présence de contraintes de temps-réel, plus ou moins « dures »,
- la nécessité ou non de mise en œuvre de systèmes de secours (plans d'urgence ou, plus simplement, gestion d'alarmes) en cas de panne « catastrophique »,
- le niveau d'exigence en termes de certification,
- la nature des normes associées aux processus de développement (moyens mis en œuvre, objectifs de résultats).

Secteur	Criticités			Contraintes temps-réel	Gestion de panne catas.	Exigence de certification	Normes processus de développement
	Sûreté	Sécurité	Sécur. Info				
Automobile				Dures	Oui	Moyenne en croissance (ISO 26262)	Moyens
Ferroviaire				Dures	Oui	Forte	Moyens
Aéronautique				Dures	Oui	Forte	Objectifs
Espace				Dures pour les lanceurs, faibles pour les satellites	Selon les applications, alarmes au minimum	Forte	Objectifs, mais avec préconisation de moyens
Nucléaire				Dures	Oui	Forte	Objectifs
Énergie (production, distribution, utilisation)				Dures	Alarmes	Variable	
Production industrielle				Selon le procédé	Selon le danger	Variable	
Instrumentation médicale				Moyennes	Alarmes	Forte	Objectifs
Bâtiment (domotique)				Selon l'application	Alarmes	Faible	
Télécoms				Selon l'application	Alarmes	Variable selon les réseaux	Moyens
Électronique grand public				Faibles	Non	Faible	
Logistique				Faibles	Non	Faible	
Infrastructures urbaines				Faibles	Alarmes	Faible	
Sécurité				Moyennes à fortes	Alarmes	Croissante	Moyens
Transaction électronique				Moyennes	Non	Forte	Moyens

EXIGENCES DE QUALITE DE SERVICE

Le tableau ci-dessous résume les fonctions à qualité de service les plus souvent concernées dans chaque secteur :

- mesure et communication,
- interface homme-machine,
- régulation et optimisation du confort d'un ou de plusieurs utilisateurs, d'un procédé ou processus complexe, de la consommation ou de la production d'énergie,
- qualité de service en termes de disponibilité et de performances,

ainsi que les limitations gérées et les liens entre fonctions critiques et fonctions à qualité de service.

Secteur	Fonctions principales						Limitations principales	Interactions entre fonctions critiques et fonctions à qualité de service
	Mesure et comm.	IHM	Optim. Confort	Optim. Process	Optim. Énergie	Qualité de service		
Automobile							Coût des composants et du logiciel	Aujourd'hui : réseaux et processeurs indépendants. Intérêt à fusionner demain ?
Ferroviaire							Nécessité d'assurer ces fonctions sans compromettre la sécurité	Il faut démontrer l'indépendance entre les fonctions S (critique) et NS (Non-critique) ⇒ ségrégation ou développement des fonctions NS avec le niveau de sécurité le plus élevé
Aéronautique							Coût, durée de vie, consommation énergétique et poids	Il faut démontrer l'indépendance entre les fonctions S (critique) et NS (Non-critique) ⇒ ségrégation ou développement des fonctions NS avec le niveau de sécurité le plus élevé
Espace							Poids et blindage des systèmes ⇒ impact sur les processeurs et la mémoire disponible	Prédominance des fonctions les plus critiques (« safety ») assurée par le hardware
Nucléaire							Coût et durée de vie (gestion de l'obsolescence)	
Énergie (production, distribution, utilisation)							Coût (production et installation), taille, alimentation et consommation énergétique	Limitées aujourd'hui, mais la capacité d'intégrer des fonctions de protection, mesure et optimisation, sans perte de confiance vis-à-vis des fonctions critiques, est un sujet important pour le futur
Production industrielle								
Instrumentation médicale							Coût, durée de vie, consommation énergétique	
Bâtiment (domotique)							Coût (production et installation), taille, alim. et consommation énergétique	
Télécoms							Coûts, performances, alim. énergétique dans les pays émergents	Sécurité info pour toutes fonctions

Secteur	Fonctions principales						Limitations principales	Interactions entre fonctions critiques et fonctions à qualité de service
	Mesure et comm.	IHM	Optim. Confort	Optim. Process	Optim. Énergie	Qualité de service		
Électronique grand public							Coûts	Sécurité info pour toutes fonctions
Logistique								Sécurité info pour toutes fonctions
Infrastructures urbaines								Sécurité info pour toutes fonctions
Sécurité								Sécurité info pour toutes fonctions
Transaction électronique								Sécurité info pour toutes fonctions, gestion de la confiance

5.2. ANALYSE ET CONCLUSIONS

Les tableaux précédents font apparaître des points communs et des différences fortes entre secteurs, avec des conséquences tant chez les intégrateurs de systèmes globaux (en termes de compétences et de processus de développement), que chez les équipementiers, sociétés de service et éditeurs de logiciels impliqués dans les différents secteurs applicatifs.

EXIGENCES CRITIQUES

L'importance forte en France de différents secteurs soumis à des exigences critiques en termes de **sûreté de fonctionnement** et de **sécurité des personnes et des biens** a eu pour effet le développement de techniques innovantes et de compétences dans le domaine académique, chez les éditeurs de logiciels et, de manière plus inégale, au sein des grands groupes. Cette avance est cependant à contraster à deux facteurs de faiblesse :

- Si dans la plupart des secteurs concernés (automobile, ferroviaire, aéronautique, espace, nucléaire, énergie, télécoms), de grands groupes prédominent parmi les intégrateurs et les sous-traitants de rang 1, les PME sont beaucoup plus nombreuses parmi les sous-traitants de rang supérieur et les compétences souvent trop morcelées pour bénéficier des synergies entre secteurs.
- La tension entre maîtrise des coûts et exigences de certification ne s'exprime pas de manière homogène sur l'ensemble de ces secteurs. Dans le contexte évoqué au point précédent, cette différence a pour conséquence une moindre assimilation des technologies de sûreté et sécurité dans les secteurs d'exigence moyenne ou variable, comme l'énergie et les télécoms, par exemple.

Le renforcement des synergies et le développement de briques technologiques et d'outils largement réutilisables d'un secteur à l'autre (et certifiés autant que possible) permettrait donc (i) aux fournisseurs de technologie innovants d'accroître leur marché (et donc de grandir) et (ii) aux grands intégrateurs de renforcer leur avantage concurrentiel en termes de sûreté de fonctionnement et de sécurité des personnes et des biens. La disponibilité de middleware certifié, masquant la dépendance au matériel ou facilitant la coexistence de fonctions critiques et de fonctions à qualité de service sur une même plate-forme multi-cœurs, et le développement d'une gamme cohérente d'outils de développement, d'intégration, de simulation, de validation et de gestion de tests, sont des éléments clés à considérer dans cette perspective. Parallèlement à ces efforts de recherche et développement, une coopération plus

intense des acteurs français en ce qui concerne les normes et standards (e.g., dans le cadre du CGEE, de l'AFNOR et de l'AFIS) leur permettrait de définir et de défendre des standards cross-domaines correspondant aux progrès accomplis et donc de mieux défendre leurs positions concurrentielles sur le marché mondial.

Plus ou moins indépendamment des contraintes de certification, le besoin de **diagnostic** et de **gestion d'alarmes** est universel ou presque. Les chercheurs et éditeurs français sont reconnus en ce qui concerne les technologies logicielles de base (fouille de données, moteurs d'inférence) utilisées dans ce domaine, mais la traduction de cette compétence en applications de diagnostic est bien moindre. Coordonner des actions dans ce domaine pourrait permettre à des fournisseurs intermédiaires et des sociétés de service françaises de renforcer leurs positions sur de tels sujets. Notons cependant que si l'enjeu et les compétences de base sont communs à de nombreux secteurs, la capacité à développer du logiciel générique au-delà de quelques outils de base reste à déterminer.

Les entreprises françaises sont connues pour être globalement moins sensibles que d'autres aux problèmes de **sécurité informatique**. Les secteurs plus proches du grand public (instrumentation médicale, bâtiment, télécoms, électronique grand public, infrastructures urbaines, sécurité) font néanmoins apparaître cette problématique comme critique. La sécurité « démontrée » de l'information y est un facteur de confiance du client et les risques liés au détournement d'information conséquents. Dans les autres secteurs, quand bien même la sécurité des personnes et des biens constitue la préoccupation dominante, le besoin de protéger les systèmes des intrusions intentionnelles ou non ne cesse de croître. Les acteurs nationaux se doivent donc de progresser sur ce sujet (sur lequel ils se concertent somme toute assez peu), moins pour construire des facteurs de compétitivité, très incertains, que pour écarter des risques.

EXIGENCES DE QUALITE DE SERVICE

La **mesure** (capteurs), la **communication filaire ou non**, et les **interfaces homme-machine** apparaissent comme des problématiques transverses aux différents secteurs applicatifs. Il n'émerge cependant pas de fournisseurs « forts » de briques matérielles et logicielles communes aux différents secteurs. Les développements, qu'ils soient accomplis directement par des équipementiers ou par l'intermédiaire de sociétés de service, sont souvent spécifiques (plus que nécessaire). Dans le meilleur des cas, ceci confère au produit final des qualités indéniables, mais pour un coût de développement supérieur à ce qu'aurait pu permettre une mutualisation d'une partie des développements. Favoriser le développement de briques réutilisables d'acquisition de données, de sélection et de présentation de données pertinentes sur de multiples supports, ainsi que des outils de spécification, de génération automatique et de simulation d'interfaces (de communication ou IHM, de et vers des systèmes fixes ou mobiles) constituerait donc un moyen d'améliorer la compétitivité de l'ensemble de l'écosystème français et de réduire les risques de dépendance vis-à-vis d'outils venant de l'étranger.

De nombreux systèmes embarqués ont une fonction **d'optimisation** : d'un processus industriel, de la consommation énergétique d'une installation (usine, bâtiment, data-center), du confort d'un ou de plusieurs utilisateurs dans un bâtiment ou un moyen de transport. La **qualité de service**, i.e., l'optimisation de la disponibilité d'un service ou du temps de réponse d'un système, constitue aussi un sujet d'optimisation, tenant compte des ressources disponibles, au niveau d'un objet embarqué lui-même ou dans « le réseau ». Pour l'essentiel, la recherche et

les développements à réaliser pour mieux remplir de telles fonctions sont évidemment dépendant du secteur considéré. Si la recherche publique française est souvent en pointe en ce qui concerne la théorie du contrôle ou l'optimisation, elle manque (et l'industrie également) des moyens nécessaires au prototypage et à l'expérimentation facile mais réaliste de nouvelles idées. Des plateformes d'expérimentation destinée à quelques grands domaines pourraient permettre de raccourcir le temps de cycle de l'idée à sa réalisation. Par ailleurs, la maîtrise des principales limitations, qui contraignent l'optimisation, est importante et peut donner lieu au développement d'outils cross-sectoriels : interfaces pour la gestion de l'énergie (au niveau d'un objet embarqué lui-même ou dans « le réseau ») ou pour la distribution de calculs (« cloud computing ») par exemple. A nouveau, l'émergence d'éditeurs de logiciels « forts » sur ces sujets comblerait l'espace existant entre une recherche publique dynamique et des intégrateurs porteurs de besoins.

ENJEUX DE DECLOISONNEMENT DES ECOSYSTEMES

Le développement des marchés pour les briques génériques du logiciel embarqué est freiné par une situation de *silos* de la plupart des écosystèmes actuels.

Cette situation existe pour des raisons historiques. Chaque écosystème s'est développé à partir d'un type d'application porté (au début) par les acteurs d'un domaine industriel existant avec pour conséquence, selon les cas :

- Des écosystèmes reposant sur des concepts technologiques spécifiques (propriétaires).
- Des écosystèmes reposant sur des concepts technologiques proches, mais incluant chacune des spécificités ; c'est par exemple le cas dans le domaine des systèmes critiques où ces particularités s'expriment en termes de standards, de certification, etc.
- Des écosystèmes ayant en commun un même contexte de déploiement, des utilisateurs ou des usages communs ; c'est par exemple le cas de la maison intelligente, entre l'énergie, la santé, l'aide aux personnes, la sécurité et en outre les usages informationnels, multimédias et de loisir ; mais il y a multiplicité d'acteurs et absence aujourd'hui de technologie commune.

Un élément essentiel pour le décloisonnement des écosystèmes est le niveau de maturité de leurs plates-formes. Arrivé au stade de la plate-forme semi-ouverte ou ouverte, un écosystème est susceptible de converger avec d'autres domaines et de partager davantage des briques technologiques.

Faire converger les écosystèmes apporte les avantages et effets positifs suivants:

- il permet à des fournisseurs de technologie d'adresser plusieurs domaines industriels et marchés en même temps ; c'est une condition indispensable pour leur permettre d'atteindre la taille critique, par exemple :
 - outils et plates-formes pour systèmes critiques,
 - plates-formes et services pour les nouveaux usages : réseau électrique intelligent (smart grid), E-santé, systèmes de transport intelligents, ville numérique, etc.
- cela est vrai pour la partie plate-forme d'exécution et outils de conception, mais aussi probablement pour la partie applicative ; des synergies de services et des fertilisations croisées peuvent être trouvées, permettant là aussi la croissance des industries de services.

Les propositions faites visent à permettre des regroupements d'acteurs favorisant la convergence des écosystèmes. En accompagnement, un travail approfondi d'organisation et de suivi de ces évolutions doit être encouragé et soutenu.

6. ENJEUX DES BRIQUES GENERIQUES DU LOGICIEL EMBARQUE

6.1. INTRODUCTION

L'ensemble des analyses présentées dans ce chapitre a été faite à partir de la segmentation suivante des briques génériques du logiciel embarqué (cette segmentation est reprise pour l'essentiel de la Common Technical Baseline déjà citée).

Chaque segment, ou sous-segment, définit lui-même deux briques logicielles: la brique « embarquée » proprement dite, c'est-à-dire la brique logicielle dont le code s'exécute et fait fonctionner le système embarqué; la « brique outil »²⁵ qui a servi à concevoir, configurer ou générer la « brique embarquée »:

Segment		Brique Embarquée	Brique Outil
IHM et Interfaces Systèmes		x	X
Applications		x	X
Plateforme d'exécution		x	X
	Middleware	x	X
	OS	x	X
	Réseaux	x	X
	Logiciel spécifique Plateforme	x	X
Interface hardware (firmware et processeurs)		x	X

L'analyse a été conduite en différenciant les briques et outils associés du domaine « Critique » et du domaine « Qualité de service » ainsi que les briques et enjeux transversaux aux deux domaines, permettant ainsi de faire ressortir à la fois les spécificités de chaque domaine et les grands enjeux.

Comme déjà noté précédemment, il faut rappeler que la distinction « Critique » et « Qualité de service » traverse les domaines industriels (à titre d'exemple, le secteur automobile présente des systèmes « Critiques » - airbags, contrôle moteur ou ABS - et à « Qualité de service », type télématique embarquée).

De plus, la dynamique des volumes fait que l'ensemble des technologies du monde « Qualité de service » est progressivement incorporée aux industries critiques (par exemple l'Ethernet embarqué en avionique) même si des contraintes spécifiques au monde critique y sont incorporées (le déterminisme, par exemple).

Réciproquement, les technologies de génération de code automatique ou de preuve formelle nées dans le monde critique voient une application grandissante en électronique grand public.

Même si la commodité de la présentation des briques de base se fait donc par domaine, résultat du travail analytique, l'objectif a bien été de faire ressortir en synthèse un ensemble priorités de R&D pour les briques génériques du logiciel embarqué, regroupant briques de base et outils associés.

²⁵ Une taxonomie plus précise des outils peut être trouvée dans la « Common Technical Baseline » des systèmes embarqués.

6.2. ANALYSE DES BRIQUES

Afin de déterminer les priorités pour la maîtrise des briques génériques, l'importance de chacune des briques a été qualifiée en regard de quatre critères:

- Maturation de l'écosystème.
- Transversalité sectorielle.
- Impact économique.
- Potentiel technologique existant (France).

Ces analyses ont été conduites pour les trois contextes suivants :

- Contexte des systèmes embarqués critiques.
- Contexte systèmes embarqués à qualité de service.
- Contextes industriels et technologiques transverses :
 - L'effacement des frontières entre écosystèmes pour assurer des marchés homogènes et plus grands.
 - La gestion de la consommation énergétique.
 - La gestion des logiciels « legacy », des librairies de référence, réutilisation, reverse engineering, partage de connaissance...
 - L'«ouverture» des plateformes (en phase de conception, de déploiement...).
 - Le découplage des cycles Système / Matériel / Logiciel et son impact sur la pérennité des codes applicatifs.
 - L'interface avec les grands réseaux (télécoms, internet, media, énergie....).
 - La prise en compte des enjeux et contraintes de sécurité informatique.
 - L'agilité des outils et méthodes de développement.

Les tableaux ci-dessous présentent les conclusions de ces analyses. Dans ces tableaux, chaque case de la seconde colonne correspond à une brique technologique. La situation de la brique par rapport à chacun des quatre enjeux est notée 1 ou 0. Le total de ces notes en dernière colonne mesure l'importance de la brique et détermine son caractère prioritaire signalé par la couleur verte de la case.

ENJEUX POUR LES BRIQUES EMBARQUEES ET OUTILS DU DOMAINE CRITIQUE

Briques Embarquées	Systèmes Critiques Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
IHM et Interfaces Systèmes	IHM et Interface homme/système (Acquisition, extraction, calcul, présentation des données pertinentes, interfaces multimodales, displays certifiés interactifs standardisés , nouvelles ergonomies- type OpenGL)	1	1	1	1	4
Applications	Diagnostic & maintenance prédictive (système à base de règles, moteurs d'inférence, ...)			1	1	2
	Cohérence description système / Modélisation logicielle	1	1	1	1	4
	Distribution des applicatifs sur des réseaux embarqués (ex: IMA3, AUTOSAR, ARINC 661)	1	1	1	1	4

Briques Embarquées	Systèmes Critiques Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
	Applications de vision/perception embarquée/réseaux de capteurs		1	1		2
	Certification multi-domaine en sûreté logicielle ("safety"), interactions entre sûreté et sécurité	1	1	1	1	4
Plateforme d'exécution	Cohabitation d'architectures critiques et non critiques sur la même plateforme matérielle multi-cœurs	1	1	1	1	4
Middleware	Réduction de l'adhérence des applications aux différentes plates-formes matérielles (par ex: Java Virtual Machine certifiable)	1	1	1	1	4
OS	RTOS déterministe dédié pour applications critiques (Standardisation); capacité multi-criticité (A653, Autosar...) et intégration d'applications non critiques	1	1	1	1	4
Réseaux	Middleware de distribution d'applications sur réseau	1	1	1	1	4
	Connexion/Déconnexion à chaud d'équipements		1	1		2
	Architectures Client Serveur embarquées critiques (Autosar, A661)	1	1	1	1	4
	Sécurité des communications embarquées		1		1	2
	Ethernet embarqué (AFDX, TTEthernet..)	1		1		2
Logiciel spécifique Plateforme						0
Interface hardware (firmware et processeurs)	Développement d'une plate-forme embarquée de confiance européenne et des outils logiciels associés	1	1	1	1	4

Outils	Systèmes Critiques Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
IHM et Interfaces Systèmes	Modélisation intégrée système et logicielle permettant des analyses/trade-off entre architecture système et implémentation logicielle, avec Intégration forte entre modélisation système (SysML) et modélisation logicielle et Intégration des outils verticaux "métiers"	1	1	1	1	4
	Spécifications formelles IHM;	1	1	1	1	4
	Plateforme de simulation hybride représentative en phase amont de conception	1	1	1	1	4

Outils	Systèmes Critiques Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
	Bibliothèque d'implémentation des concepts de base des langages formels (ex: symboles SCADE...)			1	1	2
Applications	Outils de Codage automatique certifiés	1	1	1	1	4
	Outils de Génération et de gestion des tests, calcul du WCET, Preuve formelle	1	1	1	1	4
Plateforme d'exécution	Développement "rapide" d'application critiques (sûreté de fonctionnement) sur des architectures parallèles (multi-cœur / multi-processeur homogène ou hétérogène).	1	1	1	1	4
Middleware	Outils d'aide à la conception d'architecture logicielle (distribution, partitionnement, reconfiguration statique, dynamique)		1		1	2
OS	Outils de configuration des OS		1		1	2
Réseaux	Outils de description d'architectures et de bases de données d'I/O intégrées avec la description des architectures système	1	1	1	1	4
Logiciel spécifique Plateforme	Déploiement d'application critiques sur des supports parallèles (multi-cœur / multi-processeur) minimisant l'impact sur leur validation et certification	1	1	1	1	4
Interface hardware (firmware et processeurs)	"Hardware in the loop" : co-design, co-simulation HW/SW		1	1		2

ENJEUX POUR LES BRIQUES EMBARQUEES ET OUTILS DU DOMAINE « QUALITE DE SERVICE »

Briques Embarquées	Systèmes à qualité de service Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
IHM et Interfaces Systèmes	Interfaces tactiles (et autres capteurs) pour appareils mobiles, TV, consumer electronics, et Nouvelles Ergonomies (Inspiration type Iphone)	1	1	1	1	4
	Interfaces Gestion de réseau ou gestion d'énergie HW/SW		1		1	2
Applications	Applicatifs génériques de traitements embarqués (traitement du signal, contrôle)	1	1	1	1	4

Briques Embarquées	Systèmes à qualité de service Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
Plateforme d'exécution	Architectures matérielles génériques et programmables massivement multi-cœurs ("manycore") tendance à la « softwarisation » des plateformes matérielles, homogènes ou hétérogènes	1	1	1	1	4
Middleware	Virtualisation (réduction de l'adhérence des applications aux différentes plate-formes matérielles et OS)	1	1	1	1	4
OS						
Réseaux	Normalisation de stack IP optimisé pour l'embarqué;	1				1
	Architecture orientée services pour plateforme ouvertes	1	1	1	1	4
Logiciel spécifique Plateforme						
Interface hardware (firmware et processeurs)	Interface Hard/Soft pour la gestion de l'énergie	1	1	1	1	4

Outils	Systèmes à qualité de service Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
IHM et Interfaces Systèmes	Outils de génération d'interface pour appareil consumer electronics	1	1	1	1	4
Applications	Modélisation du comportement dynamique et Codage automatique		1	1	1	3
	Outils de génération et gestion des tests		1	1	1	3
Plateforme d'exécution	Faciliter la transition vers les architectures parallèles pour l'embarqué (outils de parallélisation)	1	1	1	1	4
Middleware	Outils d'aide à la conception/simulation et tests de middleware complexes		1	1		2
OS	Outils de configuration des OS			1		1
Réseaux	Outils de développement d'applications orientées services pour les systèmes embarqués	1	1	1	1	4
Logiciel spécifique Plateforme	Outils d'optimisation d'algorithmes sur des machines multi-cœur homogènes ou hétérogènes (mise au point, analyse de performances, dimensionnement...)		1	1	1	3

Outils	Systèmes à qualité de service Enjeux et priorités de R&D	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
Interface hardware (firmware et processeurs)	Outils pour la gestion d'énergie (collecte d'informations pour effectuer un design adéquat du système en vue d'une optimisation de la consommation d'énergie)		1	1	1	3

ENJEUX TRANSVERSAUX

Enjeux Transverses (systèmes critiques et à qualité de service)	Priorités de R&D et Commentaires	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
Effacement des frontières entre « silos » pour assurer des marchés homogènes et plus grands	Recherche de base sur l'alignement des standards de sûreté et de certification (Même OS/ Mêmes outils / Même Middleware / ... configurable en fonction de la criticité / du niveau de certification, donc compatible A653, DO178B, ISO 26262, IEC 61508, etc...)	1	1	1	1	4
	Architectures matérielles génériques et programmables	1	1	1	1	4
	Favoriser la standardisation des données échangées entre systèmes embarqués (diagnostic, maintenance..)	1	1	1		3
La gestion de la consommation énergétique	Logiciel système d'optimisation de la consommation énergétique prenant en compte également les variabilités de process microélectroniques ;		1	1		2
	Minimisation du "temps de réveil" des plateformes		1	1		2
La gestion des logiciels « legacy », des bibliothèques de référence, réutilisation, reverse engineering, partage de connaissance...	Virtualisation des plates-formes matérielles obsolètes pour faciliter la transition vers les architectures parallèles pour l'embarqué	1	1	1		3
	Bibliothèques de composants réutilisables (incluant modèles, preuves/tests, certification)		1		1	2
L'«ouverture» des plateformes (en phase de conception, de déploiement...)	Favoriser la disponibilité de modèles de développement de plateformes hardware et software (portabilité, WCET...)		1		1	2
	Permettre la portabilité multi-plateformes des IHM et interfaces systèmes développées	1	1	1	1	4

Enjeux Transverses (systèmes critiques et à qualité de service)	Priorités de R&D et Commentaires	Enjeu de maturation de l'écosystème	Enjeu Transverse au domaine	Enjeu à fort Impact Economique	Capacité existante en France (potentiel fort)	Total
Le découplage des cycles système/hardware/software (pérennité des codes applicatifs)	Industrialisation des processus d'ingénierie basée modèles avec définition claire des transitions système/HW/SW et prise en compte des différents partages industriels	1	1	1	1	4
L'interface avec les grands réseaux (télécoms, internet, media, énergie....)	Interfaces avec les réseaux Quadruple Play (Téléphonie fixe/Télévision/Internet/Téléphone Mobile)		1	1		2
	Meilleure gestion des énergies (Smart Grid, Smart Transport)	1	1	1	1	4
La prise en compte des enjeux et contraintes de sécurité informatique	Authentification, protection des données, confidentialité, conformité Critères Communs	1	1		1	3
L'Agilité des outils et méthodes de développement	Mise en place de chaîne d'outils cohérentes, combinant méthodes formelles et processus agiles	1	1	1	1	4

7. PRIORITES TECHNOLOGIQUES POUR LES BRIQUES GENERIQUES DU LOGICIEL EMBARQUE

À partir des analyses précédentes, il a été retenu huit Priorités Technologiques pour la maîtrise des briques génériques du logiciel embarqué.

1. Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués
2. Vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués.
3. Virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core.
4. Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués.
5. Plates-formes logicielles embarquées de service.
6. IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués.
7. Bibliothèque génériques pour le traitement (signal, image, contrôle ...) embarqué.
8. Gestion de l'énergie embarquée.

Les deux premières priorités concernent directement le flot de conception dans ses dimensions de conception et de vérification. Les six autres priorités portent sur les différents composants embarqués et sur les outils associés.

Une estimation des besoins d'investissements technologiques pour chacune des priorités a été également réalisée, en intégrant une vision réaliste des capacités françaises scientifiques et industrielles (que ce soit des grands groupes ou des techno-providers PME et ETI) et l'importance des enjeux.

Cette estimation est résumée dans le tableau ci-dessous :

N°	Priorité Technologique	Besoin d'investissement (M €)
1	Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués	80
2	Vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués.	80
3	Virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core.	80
4	Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués.	70
5	Plates-formes logicielles embarquées de service.	70
6	IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués.	40
7	Bibliothèque génériques pour le traitement (signal, image, contrôle ...) embarqué.	40
8	Gestion de l'énergie embarquée.	40
	Total	500

Les huit priorités ont été élaborées de la façon suivante. Les thèmes de R&D correspondant à des enjeux importants pour les briques analysées (noté en vert dans les tableaux du chapitre précédent) ont été regroupés selon un nombre limité de Priorités Technologiques à caractère

fédérateur avec le souci de réunir des masses critiques de R&D autour d'enjeux communs et de donner une priorité aux thèmes transversaux

Les tableaux ci-dessous listent les thèmes de R&D qui sont rassemblées dans chaque Priorité Technologique pour les « Briques Embarquées » et les « Briques Outils ».

Chacune des huit priorités retenues est ensuite présentée et développée.

BRIQUES EMBARQUÉES (PRIORITÉS TECHNOLOGIQUES 1, 2, 3 ET 4)			
CONCEPTION ORIENTÉE MODÈLES DE SYSTÈMES ET DE LOGICIELS EMBARQUÉS	VÉRIFICATION ET CERTIFICATION SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT & SÉCURITÉ INFORMATIQUE	VIRTUALISATION ET PARALLÉLISATION POUR CALCULATEURS EMBARQUÉS MULTI / MANY CORE	ARCHITECTURES RÉPARTIES, MIDDLEWARE ET RÉSEAUX EMBARQUÉS
Cohérence description système / Modélisation logicielle	Certification multi-domaine en sûreté logicielle ("safety"), interactions entre sûreté et sécurité	Cohabitation d'architectures critiques et non critiques sur la même plateforme matérielle multi-cœurs	Distribution des applicatifs sur des réseaux embarqués (ex: IMA3, AUTOSAR, ARINC 661)
Industrialisation des processus d'ingénierie basée modèles avec définition claire des transitions système/HW/SW et prise en compte des différents partages industriels	Recherche de base sur l'alignement des standards de sûreté et de certification (Même OS/ Mêmes outils / Même Middleware / ... configurable en fonction de la criticité / du niveau de certification, compatible A653, DO178B, ISO 26262, IEC 61508, etc...)	RTOS déterministe (open source ou classique) dédié pour applications critiques (Standardisation); capacité multi-criticité (A653, Autosar...) et intégration d'applications non critiques	Middleware de distribution d'applications sur réseau
mise en place de chaîne d'outils cohérentes, combinant méthodes formelles et processus agiles	Authentification, protection des données, confidentialité, conformité Critères Communs	Développement d'une plate- forme embarquée de confiance européenne et des outils logiciels associés	Architectures Client Serveur embarquées critiques (Autosar, A661)
		Déploiement d'application critiques sur des supports parallèles (multi-cœur / multi-processeur) minimisant l'impact sur leur validation et certification	Virtualisation (réduction de l'adhérence des applications aux différentes plate-formes matérielles et OS)
		Architectures matérielles génériques et programmables massivement multi-cœurs ("manycore") tendance à la « softwarisation » des plateformes matérielles, homogènes ou hétérogènes	Architectures matérielles génériques et programmables
		Réduction de l'adhérence des applications aux différentes plate-formes matérielles (par ex: Java Virtual Machine certifiable)	

BRIQUES OUTILS (PRIORITÉS TECHNOLOGIQUES 1, 2, 3 ET 4)			
CONCEPTION ORIENTÉE MODÈLES DE SYSTÈMES ET DE LOGICIELS EMBARQUÉS	VÉRIFICATION ET CERTIFICATION SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT & SÉCURITÉ INFORMATIQUE	VIRTUALISATION ET PARALLÉLISATION POUR CALCULATEURS EMBARQUÉS MULTI / MANY CORE	ARCHITECTURES RÉPARTIES, MIDDLEWARE ET RÉSEAUX EMBARQUÉS
Modélisation intégrée système et logicielle permettant des analyses/trade-off entre architecture système et implémentation logicielle, avec Intégration forte entre modélisation système (SysML) et modélisation logicielle et Intégration des outils verticaux "métiers"	Outils de Codage automatique certifiés	Faciliter la transition vers les architectures parallèles pour l'embarqué (outils de parallélisation)	Outils de description d'architectures et de bases de données d'I/O intégrées avec la description des architectures système
Plateforme de simulation hybride représentative en phase amont de conception	Outils de Génération et de gestion des tests, calcul du WCET, Preuve formelle	Développement "rapide" d'application critiques (sûreté de fonctionnement) sur des architectures parallèles (multi-cœur / multi-processeur homogène ou hétérogène).	
Modélisation du comportement dynamique et Codage automatique		Faciliter la transition vers les architectures parallèles pour l'embarqué (outils de parallélisation)	
Outils de génération et gestion des tests		Outils d'optimisation d'algorithmes sur des machines multi-cœur homogènes ou hétérogènes (mise au point, analyse de performances, dimensionnement...)	

BRIQUES EMBARQUÉES (PRIORITÉS TECHNOLOGIQUES 5, 6, 7 ET 8)			
PLATEFORMES LOGICIELLES EMBARQUÉES DE SERVICES AUX APPLICATIONS	IHM ET INTERFACES HOMMES SYSTÈMES POUR SYSTÈMES EMBARQUÉS	BIBLIOTHÈQUES GÉNÉRIQUES POUR LE TRAITEMENT EMBARQUÉ	GESTION DE L'ÉNERGIE EMBARQUÉE
Architecture orientée services pour plateforme ouvertes	IHMs et Interface homme/système (Acquisition, extraction, calcul, présentation des données pertinentes, interfaces multimodales, displays certifiés interactifs standardisés , nouvelles ergonomies- type OpenGL)	Applicatifs génériques de traitements embarqués (traitement du signal, contrôle)	Interface Hard/Soft pour la gestion de l'énergie
	Interfaces tactiles (et autres capteurs) pour appareils mobiles, TV , consumer electronics, et Nouvelles Ergonomies (Inspiration type Iphone)		Meilleure gestion des énergies (Smart Grid, Smart Transport)

BRIQUES EMBARQUÉES (PRIORITÉS TECHNOLOGIQUES 5, 6, 7 ET 8)			
PLATEFORMES LOGICIELLES EMBARQUÉES DE SERVICES AUX APPLICATIONS	IHM ET INTERFACES HOMMES SYSTÈMES POUR SYSTÈMES EMBARQUÉS	BIBLIOTHÈQUES GÉNÉRIQUES POUR LE TRAITEMENT EMBARQUÉ	GESTION DE L'ÉNERGIE EMBARQUÉE
	Permettre la portabilité multi-plateformes des IHM et interfaces systèmes développées		

BRIQUES OUTILS (PRIORITÉS TECHNOLOGIQUES 5, 6, 7 ET 8)			
PLATEFORMES LOGICIELLES EMBARQUÉES DE SERVICES AUX APPLICATIONS	IHM ET INTERFACES HOMMES SYSTÈMES POUR SYSTÈMES EMBARQUÉS	BIBLIOTHÈQUES GÉNÉRIQUES POUR LE TRAITEMENT EMBARQUÉ	GESTION DE L'ÉNERGIE EMBARQUÉE
Outils de développement d'applications orientées services pour les systèmes embarqués	Outils de génération d'interface pour appareil consumer electronics		Outils pour la gestion d'énergie (collecte d'informations pour effectuer un design adéquat du système en vue d'une optimisation de la consommation d'énergie)
	Spécifications formelles IHM;		

7.1. CONCEPTION ORIENTEE MODELES DE SYSTEMES ET LOGICIELS EMBARQUES

DESCRIPTION DE L'ENJEU

Les processus traditionnels de développement de logiciels embarqués, assez fondamentalement séquentiels (le cycle en « V », font se suivre des phases de conception système, de définition de spécifications systèmes allouées aux fonctions logicielles, de spécification logicielle, de développement, de codage, d'intégration logicielle, d'intégration logicielle et matérielle et de test et validation finales et le cas échéant de certification), chacune des activités précédentes étant suivie d'une activité de vérification et de validation correspondante, ce qui amène à mettre en séquence ces activités à parfois à « cycler » un très grand nombre de fois avant d'obtenir un résultat satisfaisant.

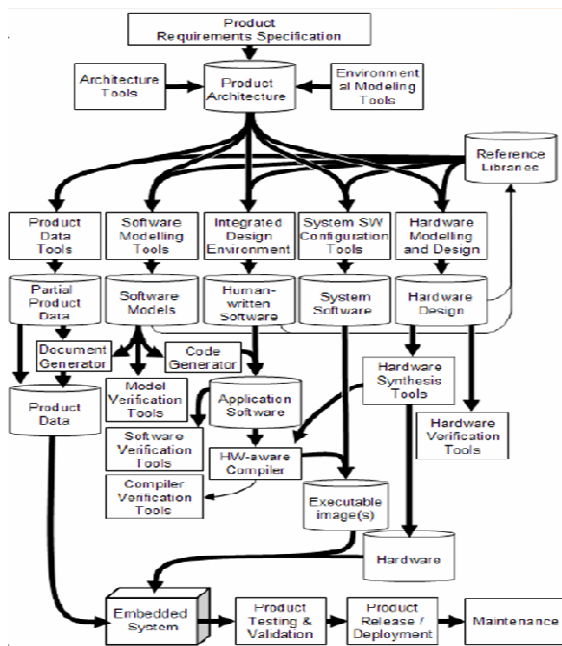
En particulier, le cycle conception, codage, vérification, amenant une re-conception, un re-codage et une re-vérification, etc. peut itérer un nombre inacceptable de fois, amenant des surcoûts et des délais significatifs, qui se chiffrent parfois en milliards d'euros dans le cadre de grands projets.

La conception orientée modèle permet de s'affranchir d'une grande partie de ces risques et de ces coûts, en rendant tout d'abord intelligibles les spécifications systèmes et les spécifications logicielles sous forme de modèles (UML, SysML, SCADE, etc....), ces modèles étant eux même exécutables, donc simulables, intelligibles et vérifiables.

Ces modèles permettent également une représentation précise d'une propriété intellectuelle, sont partageables entre des clients et des fournisseurs dans le cadre d'une plateforme commune de développement et permettent enfin une automatisation des phases de codage, de vérification du codage et de vérification que les spécifications systèmes ont été correctement tracées et implémentées (a fortiori quand des standards de certification requièrent une démonstration a priori de la qualité des produits avant leur mise sur le marché, et pas uniquement des tests).

Tout comme l'adoption large de la modélisation 3D a permis des gains de productivité et de qualité sans précédent en termes de conception physique, la modélisation système et logiciel permet des gains de productivité et de qualité pour le développement logiciel.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE



Assurer un déploiement optimal d'un flot de conception orienté modèles de systèmes et de logiciels embarqués nécessite la mise en œuvre non seulement d'outils individuels mais également de transitions optimales et productives entre les différents outils, sur la base du schéma ci-dessous extrait la Common Technical Baseline.

En particulier, certaines transitions sont particulièrement critiques en termes de processus ou de productivité et doivent faire l'objet d'une attention particulière. La cohérence entre les descriptions systèmes (souvent multiples et informelles) et les modélisations logicielles (souvent formalisées et détaillées) est essentielle.

Les statistiques disponibles d'études de marché sur la cause des bugs dans les systèmes

embarqués montrent qu'environ 75 % de ceux-ci sont liés à des ambiguïtés ou des divergences de compréhension entre spécifications systèmes et spécifications logicielles. Ce type de bugs a pour circonstance aggravante d'être généralement trouvé très tard dans les projets et donc d'être particulièrement coûteux à corriger.

- De ce fait, une véritable industrialisation des processus d'ingénierie basée modèle est indispensable, avec une définition claire des transitions système / logiciel / hardware et une prise en compte des différents partages industriels au sein de plateformes de développement cohérentes et communes et implique donc le choix de standards communs (comme par exemple SysML en modélisation système).
- La mise en place d'un outillage quel qu'il soit ne doit pas non plus se faire au détriment de l'agilité nécessaire des processus : combiner méthodes formelles et agilité constitue donc un véritable enjeu de R&D.
- Une modélisation intégrée entre système et logiciel doit aussi assurer la possibilité d'analyses et de « trade-offs » entre architecture système et implémentation logicielle, avec une prise en compte des différents outils verticaux, propres à chaque métier ou

domaine technique, mais aussi recouvrir des besoins transversaux, comme la simulation hybride (simuler les phénomènes physiques, l'environnement des systèmes autant que leur comportement logiciel).

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

Les thèmes de développement sont donc très vastes, allant de la simulation hybride à la modélisation système, la modélisation logicielle, la modélisation du comportement dynamique, le codage automatique, la gestion et l'automatisation des tests, la certification « cross-domain » des outils (en synergie avec la brique prioritaire certification en sûreté et sécurité) et les diverses techniques de vérification et de validation

Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 80 millions d'euros d'investissement de R&D sur une durée de 3 ans

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les besoins sont tous exprimés à court terme en ce domaine, avec des enjeux et solutions technologiques s'étendant entre le très court terme et le moyen voire long terme sur les sujets plus ardues (comme la simulation hybride généralisée par exemple)

7.2. VERIFICATION ET CERTIFICATION DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT ET DE LA SECURITE INFORMATIQUE DES SYSTEMES EMBARQUES.

Le domaine de la certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique des systèmes embarqués recouvre des problématiques diverses, combinant des enjeux économiques essentiels (un retard d'un an de certification d'un programme d'avion ou de centrale nucléaire se chiffre en milliards d'euros), mais aussi des enjeux de souveraineté (protection de l'information, protection de la sûreté des biens, des personnes et de l'État...) tout à fait critiques

Dans ce cadre, le domaine des systèmes embarqués est soumis à une convergence et une combinaison croissante de contraintes mélangeant sûreté de fonctionnement (l'assurance que le système se comporte toujours comme il est sensé se comporter) et de sécurité informatique (authentification, protection des données, protection de la confidentialité et de la qualité de service, etc.)

DESCRIPTION DE L'ENJEU

Plusieurs enjeux se combinent :

- Développer une solution de suites logicielles de base (langage de modélisation, de programmation et d'exécution, outils de compilation, OS, outils de test et d'évaluation de performances, ...) permettant de décrire des applications critiques avec un haut niveau d'abstraction et de garantir leurs exigences de sûreté de fonctionnement, quel que soit le standard de certification (DO-178B en aéronautique, IEC 61508 pour l'industrie, EN 50128 pour le ferroviaire, IEC 60880 pour le nucléaire, ISO 26262 pour l'automobile, ainsi que tous les standards « système » associés, etc....). Cette solution doit en particulier assurer le déterminisme d'exécution d'une application critique à forte exigence temps réel.
- Développer les formalismes et les outils permettant d'assurer la sûreté de fonctionnement depuis le niveau système jusqu'au code de l'application en particulier

avec les spécificités du logiciel embarqué : parallélisme, nombres flottants, interaction avec l'environnement extérieur.

- Afin de satisfaire les exigences de sûreté de fonctionnement des applications critiques (automobile, avioniques, ferroviaires, nucléaires, ...), l'une des attentes du marché concerne la protection temporelle et spatiale de ces applications qui cohabitent avec des fonctions non critiques.
- Une autre attente est la détection et le confinement de faute dans l'exécution de fonctions critiques, en particulier le dépassement de budget temporel exprimant potentiellement une défaillance dans l'exécution. La maîtrise de la reprise en cas de défaillance et la garantie de disponibilité sont deux éléments clés de cette problématique.
- La disponibilité d'outils certifiés dans plusieurs domaines industriels et les besoins de convergence des standards de certification représentent aussi un enjeu essentiel.
- Dans le domaine des transactions électroniques, un verrou majeur pour le logiciel embarqué consiste à établir la confiance entre les différents éléments d'un système d'information, ainsi qu'avec les utilisateurs.
- En matière de sécurité informatique, des enjeux nouveaux résultent de la connectivité du système embarqué avec son environnement. Par exemple, dans le domaine du transport intermodal, l'intégration d'un véhicule dans le cadre d'une infrastructure de transport globale impose :
 - D'une part la sécurisation et la confidentialité de l'identification du voyageur dans le cadre des accès liés à la facturation et au suivi de son parcours ;
 - D'autre part la sécurisation des données échangées soit entre véhicules, soit entre les véhicules et l'infrastructure.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

- Développer des chaînes d'outils logiciels associées (notamment de codage automatique certifiés, de génération et de gestion des tests, de calcul du WCET et de preuves formelles) permettant de prendre en compte les aspects validation, mise au point et de debug, analyse de performance et optimisation de la consommation du niveau système jusqu'au code source (en synergie avec le thème précédent « Conception orientée modèles »).
- Développer des solutions logicielles permettant de porter des applications critiques existantes fonctionnant sur une solution « Mono-Core » vers des solutions « Multi / Many Core ».
- Assurer la cohabitation d'applications critiques et non critiques sur la même architecture matérielle.
- Développer un noyau temps-réel orienté sûreté et une chaîne de compilation associée pour les applications embarquées. Cette chaîne permettrait au développeur de décrire la conception fonctionnelle de ses applications en termes de tâches temps-réel (modes dégradés inclus) et les outils en réalisent l'implantation fidèle et sûre, via des mécanismes innovants de protection et de confinement d'anomalies.
- Développer une véritable certification multi-domaine et intégrer les interactions entre sûreté et sécurité, par un alignement des standards.
- Développer les technologies de confiance numérique pour le logiciel embarqué : authentification, protection des données, protection de la confidentialité.
- Développer les moyens et les outils d'expérimentation et de test de conformité en matière de confiance numérique.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

- La justification de cet enjeu est avant tout liée aux perspectives très importantes en termes de retombées économiques avec des marchés cibles en plein essor et exportateurs comme l'automobile, l'avionique, le ferroviaire, le nucléaire, la carte à puces sur lesquels la France est en position de leader.
- Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 80 millions d'euros d'investissement de R&D sur une durée de 3 ans.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les premiers marchés sont attendus à très court terme (3 ans)

7.3. VIRTUALISATION ET PARALLELISATION POUR CALCULATEURS EMBARQUES MULTI / MANY CORE.

Depuis maintenant plusieurs années, les difficultés de conception des microprocesseurs et la nécessité d'une meilleure maîtrise énergétique, ont conduit les fabricants à développer et mettre sur le marché des offres multi-cœurs. L'idée maîtresse est de mettre plusieurs processeurs sur une même puce de silicium et de les faire fonctionner à des fréquences d'horloges plus réduite.

Cette évolution répond aussi aux besoins croissants de puissance de calcul pour la mise en œuvre des fonctions embarquées « intelligentes » de type perception, contrôle, cognition. Elles correspondent à des applications de plus en plus nombreuses dans les domaines de la surveillance, de la mobilité, de la robotique, des automatismes, de l'imagerie, etc.

A titre exemple, NEC étudie un système de vision pour de la reconnaissance d'image dans un véhicule apportant 100 Gigaops (10^9 opérations par seconde), mettant en œuvre 128 processeurs et ne consommant que 2 Watts. INTEL travaille sur ces approches avec son équipe de recherche Teraflops Research Chip. Le circuit réalisé par l'équipe d'INTEL met en œuvre 80 processeurs « simples », chacun contenant deux unités de calcul flottant.

D'autres approches dites massivement parallèles ont pour objectif de mettre plusieurs centaines de processeurs sur une même puce. De nombreuses sociétés de création récente sont actives dans ce domaine dans le monde, en Europe et en France.

Comme pour le domaine conjoint du Calcul Haute Performance (High Performance Computing ou HPC), le principal défi scientifique et technologique est de satisfaire à la fois les exigences de hautes performances et les exigences de facilité de programmation et de portabilité des applications. Pour les systèmes embarqués, s'y ajoutent celles de la gestion d'énergie, du coût et du time-to-market pour les marchés « grand public », de la sûreté et de la sécurité.

DESCRIPTION DE L'ENJEU

- Pour le développement de systèmes embarqués, malgré l'augmentation importante des marchés et des volumes, il est devenu indispensable de réduire les coûts et temps de développement de circuits spécifiques dans les nouvelles microélectroniques. Les temps de cycle actuels ne sont pas adaptés à la dynamique de développement de ces marchés et le time-to-market est devenu un enjeu crucial de réussite.
- Les solutions classiques utilisées aujourd'hui pour l'embarqué (processeurs embarqués classiques ou les solutions FPGA) n'apportent pas la puissance de calcul nécessaire et ne

garantissent pas une performance énergétique acceptable garantissant une autonomie suffisante à tous les objets nomades

- La tendance actuelle est de faire appel à des plateformes matérielles de plus en plus génériques et programmables par logiciel mais pour rendre ces solutions encore plus attractives il est indispensable de disposer d'environnements de programmation utilisant un haut niveau d'abstraction permettant de programmer de façon efficace et sûre des applications de plus en plus complexe.
- L'enjeu est donc de disposer de plateformes matérielles et logicielles supportant des applications multiples, dont les performances seront proches d'un System-on-Chip dédié, mais dont le coût et le temps de conception seront comparables à ceux d'un développement logiciel (6 mois comparé à 2 ou 3 ans pour une solution ASIC dédiée).

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

- Développer des langages de programmation pour le développement d'applications parallèles embarquées portables sur de multiples architectures embarquées (Multi / Many-Core)
- Favoriser l'apparition de langage standardisé de programmation parallèle
- Favoriser un rapprochement avec la communauté HPC (problématique assez similaire).
- Développer des techniques de compilation et support d'exécution (OS) permettant l'optimisation d'algorithmes sur des machines multi-cœur homogènes ou hétérogènes.
- Développer des chaînes d'outils logiciels permettant de prendre en compte les aspects validation, mise au point et de correction, analyse de performance et optimisation de la consommation.
- Développer l'environnement de conception et de développement permettant de concevoir des applications sûres et respectant des contraintes temps réel, exploitant les fonctionnalités offertes par la virtualisation du matériel.
- Développer un environnement de simulation permettant de simuler le comportement de son application dans sur un système virtualisé.
- Déployer de manière sûre et fiable des applications sur architectures massivement distribuées est un sujet sur lequel la communauté scientifique doit focaliser ses efforts afin d'apporter des solutions et outils aux industriels du domaine.
- La virtualisation est une tendance lourde des grands systèmes de calcul, qui s'interconnectent en réseau pour former à terme le Cloud-Computing. Porté par d'autres contraintes, cette tendance va également apparaître dans le domaine de l'embarqué.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

La justification de cet enjeu est avant tout liée aux perspectives très importantes de marchés en raison des besoins croissants en matière d'analyse du contenu (compréhension de la parole, compréhension de l'image fixe ou animée, réalité augmentée) pour les produits portables, le grand public et les systèmes de sécurité

Toute une chaîne industrielle peut se mettre en place autour de ces technologies et de ces produits, allant de fabricants de puces (IDM ou société FABLESS), aux éditeurs de logiciels, aux développeurs d'applications et aux utilisateurs finaux de solutions clés en mains.

Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 80 millions d'euros sur une durée de 3 ans.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les premiers marchés sont attendus à court terme (3 ans) et potentiellement déjà là si des solutions appropriées existaient et si des développeurs d'applications pouvaient disposer dès à présent de ces modèles.

7.4. ARCHITECTURES REPARTIES, MIDDLEWARE ET RESEAUX EMBARQUES.

Les architectures de systèmes répartis sont relativement bien maîtrisées dans le contexte d'infrastructures fixes : SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), Control Command (gestion du trafic aérien, surveillance maritime, systèmes de dispatching électrique) etc.

La mise en œuvre de ces architectures dans des contextes embarquées et contraintes en termes de criticité et de qualité de service comporte de nombreux enjeux technologiques.

DESCRIPTION DE L'ENJEU

- Les systèmes embarqués de supervision dans les domaines de la surveillance, de la gestion de trafic, des systèmes de transport (avion, train, voiture) prennent en compte un nombre croissant de fonctions, générant une augmentation de complexité que ce soit en termes d'électronique (calculateurs, réseaux) ou de taille de code. Ainsi, l'avionique des Airbus A310 en 1980 représentait 4 Mo de codes, s'appuyant sur 77 calculateurs et 136 bus numériques. En 1990, sur l'A340, le code faisait 20 Mo, s'appuyant sur 115 calculateurs et 368 bus numériques.
- Ces systèmes, pour des problèmes de maîtrise générale du système global, évoluent vers des architectures avec des réseaux et des calculateurs banalisés. L'augmentation du nombre de fonctions et des échanges entre les fonctions, l'intégration croissante des systèmes ont conduit à augmenter les ressources de calcul et de communication. Ceci a entraîné le besoin de partager les ressources : bus multiplexés, ressources de traitement gérés par un exécutif temps réel, ressources de calcul et de communications banalisées, middleware assurant des services techniques communs. Ces tendances observées dans l'avionique (AFDX, ARINC 661, ARINC 429..) et l'automobile (avec AUTOSAR) va se généraliser dans le temps à d'autres systèmes : infrastructure routière ou ferroviaire communicante, systèmes de surveillance, communication "car-to-car", etc.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

- Développer les technologies de middleware permettant la migration dynamique des tâches en respectant des contraintes temps réel d'un composant à un autre.
- Développer les outils de distribution des applicatifs sur le middleware et les réseaux embarqués.
- Développer les outils de support des architectures client serveur distribuées critiques (AUTOSAR, ARINC 661).

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

- Une telle action fait appel à des compétences architectures, outils et systèmes devant focaliser leurs efforts sur un même objectif.
- Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 70 millions d'euros sur une durée de 3 ans.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les marchés existent à court, moyen et long terme. Des marchés émergent également de domaines qui nécessitent de partager des ressources entre eux : domotique et appareils domestiques, infrastructure routière, automobile et ferroviaire, etc.

7.5. PLATES-FORMES LOGICIELLES EMBARQUEES DE SERVICE.

Cette priorité concerne l'ensemble des technologies de logiciel embarqué permettant à un objet physique d'être pleinement intégré dans l'environnement Web et de réaliser ainsi le concept de Web des Objets. Les applications potentielles, en émergence rapide, sont nombreuses et concernent des marchés de volume : réseau électrique intelligent, réseaux de capteurs, ville numérique, maison intelligente, etc.

Les enjeux technologiques portent d'une part sur les différentes briques logicielles – logiciel de base, web server, web services, etc. – et sur la mise en œuvre de ces briques dans des contextes fortement contraints : puissance de calcul, mémoires, énergie disponible.

DESCRIPTION DE L'ENJEU

Les plates-formes de services sont porteuses de valeur au sens où elles permettent la création et le développement de quatre écosystèmes, chacun enrichissant les trois autres :

- Les fabricants de matériels ;
- Les fabricants de plates-formes logicielles de services et de briques logicielles pour ces plates-formes ;
- Les opérateurs et administrateurs de ces plates-formes ;
- Les fournisseurs de services (applications logicielles).

Générant des revenus à l'usage, ces plates-formes représentent de forts potentiels de croissance en termes d'emplois et de création de richesse.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

- Ubiquité des déploiements des services, non adhérence des logiciels et des services aux plates-formes matérielles, virtualisation des matériels ;
- Définition de standards transverses indépendants des couches matérielles et compatible avec des ressources limitées en bande passante (web des objets communicants) ;
- Compatibilité avec les contraintes (coût, faibles ressources tant mémoire que de calcul) induites par la massification (en centaines de millions) des plates-formes de services.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement de cette priorité est estimée est de l'ordre de 80 millions d'euros d'investissement de R&D sur une durée de 3 ans.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les premiers marchés sont attendus à très court terme (moins de 3 ans)

7.6. IHM ET INTERFACES HOMMES-SYSTEMES POUR SYSTEMES EMBARQUES.

DESCRIPTION DE L'ENJEU

L'ergonomie de l'interface utilisateur est un élément clé de la compétitivité et de l'acceptabilité des systèmes embarqués, manifeste par de multiples exemples qui vont de l'iPhone aux cockpits des Airbus.

Le développement d'interfaces homme-système comporte des enjeux également variés, qui vont de l'acquisition/extraction de données, aux facteurs humains et à la présentation des données pertinentes, l'intégration de capteurs, les interfaces multimodales (son, image, 3D, etc.), l'interactivité, les enjeux plus techniques de portabilité multiplateformes, les interfaces tactiles.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

Sont particulièrement soulignés les enjeux de la portabilité multiplateforme des IHMs et interfaces homme-système (capteurs, actionneurs..), les outils de génération automatique d'interfaces et de description formelle d'IHM.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 40 millions d'euros d'investissement de R&D sur une durée de 3 ans.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les premiers marchés sont attendus à très court terme (3 ans), mais s'inscrivent dans une tendance très lourde de l'industrie à moyen terme sans aucune limite en termes de créativité et d'innovations de rupture tant en termes d'IHM que de capteurs ou d'actionneurs

7.7. BIBLIOTHEQUE GENERIQUES POUR LE TRAITEMENT (SIGNAL, IMAGE, CONTROLE ...) EMBARQUE.

L'intelligence embarquée dans les produits et systèmes repose de plus en plus sur du logiciel de traitement embarqué. Cette tendance lourde de "numérisation" des fonctions de traitement du signal ou des images, de contrôle ou de simulation temps-réel se traduit par le besoin de logiciels embarqués génériques pour le traitement, bibliothèques logicielles indispensables à la maîtrise des applications et services embarqués.

Cette priorité doit être abordée en cohérence avec :

- la Priorité Technologique n° 3 : portabilité de ces bibliothèques sur différentes architectures Multi / Many-Core ;
- la Priorité Technologique n° 8 : optimisation de ces bibliothèques pour réduire la consommation d'énergie.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

La priorité porte sur le développement de bibliothèques logicielles génériques pour le traitement embarqué prenant en compte les contraintes physiques, environnementales et économiques :

- Acquisition et de traitement du signal : numérisation, mesures, communications.
- Traitement d'image.
- Contrôle et commande de systèmes : robustesse, optimisation, auto-adaptation.
- Contrôle et management de réseaux de capteurs et d'actionneurs.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

Un investissement de 40 millions d'euros est estimé nécessaire sur 3 ans permettant de faire émerger et consolider un écosystème et ainsi disposer de bibliothèques de logiciels embarqués pour le traitement. Ce dimensionnement se justifie par l'enjeu de la maîtrise de ces briques logicielles porteuses des fonctionnalités de différenciation des produits et systèmes ("intelligence embarquée").

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les retombées sont immédiates sur des enjeux à court et moyen terme en cohérence avec la disponibilité de puissance de calcul embarqué.

7.8. GESTION DE L'ENERGIE EMBARQUEE.

La consommation énergétique est une des contraintes qui limite la qualité de service de certains (petits) systèmes embarqués, notamment ceux qui ne sont pas directement reliés à un réseau de distribution d'électricité. Elle constitue par ailleurs un enjeu environnemental important : réduire la consommation, éviter les pertes, récupérer l'énergie présente dans l'environnement, représentent autant de moyens d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes embarqués.

Pour faciliter la mise en œuvre de solutions efficaces d'un point de vue énergétique, il apparaît nécessaire de :

- développer des solutions logicielles permettant de mesurer et d'optimiser la consommation (et dans certains cas la production) énergétique d'un système embarqué (matériel et logiciel) ;
- développer des solutions logicielles permettant de mesurer la variabilité d'un système embarqué (matériel et logiciel) et de prendre en compte automatiquement les mesures adéquates pour garantir un bon fonctionnement.

DESCRIPTION DE L'ENJEU

- Dans les systèmes embarqués, la consommation énergétique (statique et dynamique) est devenue un véritable enjeu non seulement pour les objets nomades et portatifs mais également pour tous les autres systèmes. En effet, l'augmentation importante de la puissance de calcul des systèmes embarqués nécessite aujourd'hui de repenser et d'optimiser leur consommation électrique. L'objectif est donc de mesurer la consommation électrique de chaque bloc du système (matériel et logiciel) à l'aide de sondes judicieusement positionnées et de jouer sur le couple tension d'alimentation et fréquence de fonctionnement pour optimiser la consommation énergétique globale tout en garantissant un fonctionnement global optimal. Pour assurer, cette gestion dynamique de la consommation globale d'un système, il est nécessaire de développer des outils logiciels systèmes adaptés.
- De plus en plus de systèmes embarqués incluront dans le futur des « capteurs d'énergie » permettant de générer ou de récupérer dans l'environnement toute ou partie de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement : micro-panneaux solaires, conversion d'énergie mécanique ou vibratoire en électricité, récupération d'énergie lors du freinage d'un appareil, etc. La gestion de multiples sources d'énergie (réseau, batteries, énergie récupérée) devra donc, elle aussi, être assurée.

- Dans les technologies CMOS avancées (32-22-11 nm), la variabilité technologique (dispersion des paramètres de base des transistors MOS) devient importante non seulement dans un même lot de wafers, mais également sur chaque wafer et même à l'intérieur d'une même puce. On ne peut donc garantir, sauf à condition d'accepter une drastique baisse de rendement engendrant une augmentation des coûts de production des puces, les performances d'une puce qu'en prenant des marges importantes qui viennent anéantir les bénéfices attendus de la migration vers une technologie microélectronique plus fine. Les sources de variabilité ne sont pas seulement liées à la fabrication collective des puces mais sont également liées aux conditions d'utilisations (température, tension).
- L'effacement des frontières entre « silos » pour assurer des marchés homogènes et plus grand renforce la nécessité d'architectures génériques plus importantes. Aussi permettre la modélisation de systèmes avec un nombre important de variantes est un enjeu important. Cela passe par la maîtrise des technologies de conception orientées modèles.

PRIORITE DE R&D ASSOCIEE

- Intégrer des sondes permettant de mesurer la consommation (et dans certains cas la production) électrique et sa variabilité ;
- Développer des IPs matérielles et logicielles permettant de contrôler finement la tension d'alimentation et la fréquence de fonctionnement d'un bloc ;
- Développer le logiciel de bas niveau et les mécanismes d'automatique, permettant de réguler et d'optimiser la consommation d'un bloc ;
- Développer le logiciel de bas niveau et les mécanismes d'automatique, permettant de réguler et d'optimiser la variabilité d'un bloc ;
- Développer les plates-formes logicielles (système) permettant de gérer et d'optimiser globalement la production, la consommation et la variabilité du système complet en intégrant la prise en compte des temps de réaction nécessaires à l'occurrence d'événements extérieurs ;
- Développer les outils d'ingénierie dirigée par les modèles pour maîtriser la variabilité des systèmes.

JUSTIFICATION ET DIMENSIONNEMENT

- La justification de cet enjeu est avant tout liée aux perspectives très importantes en termes de retombées économiques et environnementales. L'augmentation drastique du nombre de systèmes embarqués depuis quelques années et les fortes perspectives de croissance à venir rendent indispensable d'optimiser leurs consommations électriques.
- De plus, l'industrie microélectronique a besoin de l'apport de la communauté logicielle pour faire face aux défis à venir des technologies avancées (variabilité, rendement, consommation statique,...) et apporter les solutions adaptées à une poursuite de la loi de Moore.
- Le dimensionnement estimé d'un tel enjeu est de l'ordre de 40 millions d'euros sur une durée de 3 ans afin de disposer des briques de base nécessaires.

HORIZON TEMPOREL (3 ANS / 6 ANS / 9 ANS...)

Les premiers marchés sont attendus à court et moyen terme (3 à 6 ans) et potentiellement déjà là si des solutions appropriées existaient.

8. PROGRAMMES ET INITIATIVES INTERNATIONALES DE R&D EN LOGICIEL EMBARQUE

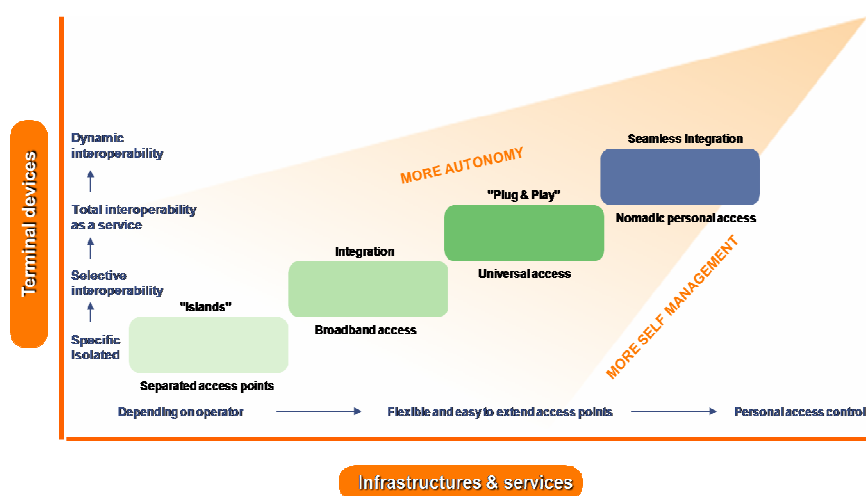
8.1. EUROPE

Les principaux programmes européens et programmes nationaux les plus significatifs de pays membres de l'Union (hors France) sont présentés dans cette section :

- Programmes européens ou multinationaux : programmes Eureka ITEA et ITEA2 et la JTI ARTEMIS
- Programmes nationaux : SPES 2020 (Allemagne), PROGRESS (Pays-Bas)

EUREKA ITEA ET ITEA2

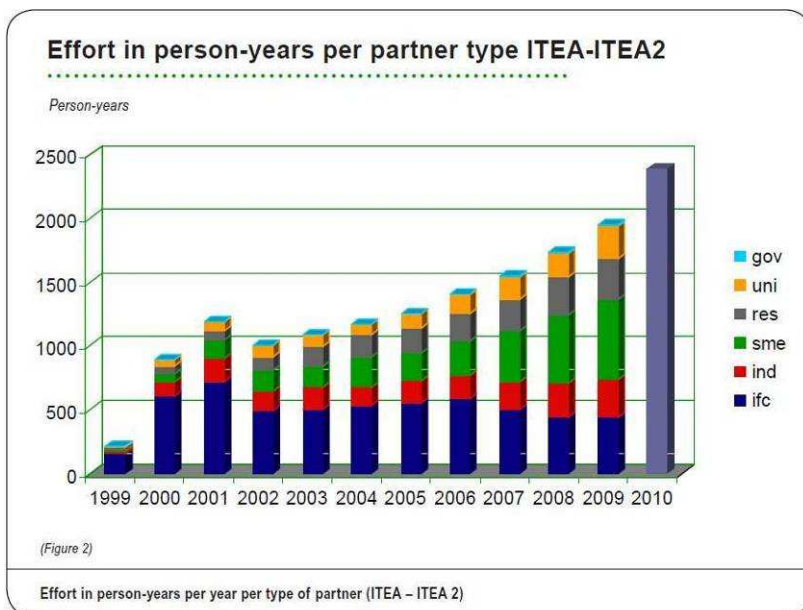
Les programmes Eureka ITEA de 1999 à 2007, puis ITEA2 à partir de 2007 ont proposé une vision commune pour l'avenir de l'Europe en ce qui concerne les systèmes à logiciel prépondérant qui intègrent des logiciels embarqués, vision partagée par les pouvoirs publics et les entreprises privées. Le ciblage sur les principales industries européennes qui mettent au point et utilisent ces systèmes pour rester compétitives a représenté une composante essentielle de cette vision.



La vision ITEA et ITEA2 a été exprimée et mise à jour dans trois roadmaps successives²⁶. Comme illustrée sur la figure ci-dessous, elles mettent en avant les évolutions qui déterminent la façon dont les *Terminal Devices*, c'est-à-dire les systèmes embarqués au sens large, et les *Infrastructures & Services* interagissent.

A la fin du premier programme ITEA, ce sont près de 100 projets qui avaient été cofinancés à l'issue de huit appels à projets, représentant un effort global de R&D de plus de 3 milliards d'euros. Cet effort était partagé pour 93 % par les 7 pays suivant : France, Pays-Bas, Italie, Allemagne, Finlande, Belgique, Espagne (dans l'ordre de leurs niveaux respectifs de contribution). Avec environ 2/3 des projets consacrés aux systèmes et logiciels embarqués, ITEA a fortement contribué à positionner l'Europe au meilleur niveau dans ce domaine avec des résultats structurants dans des domaines tels que la gestion de l'énergie, l'électronique automobile ou la sécurité.

²⁶ ITEA Roadmap for Software Intensive Systems, 3rd Edition, February 2009



ITEA 2 conserve la cible d'ITEA axée sur les industries dont les produits sont à logiciel prépondérant. Il en étend la portée pour traiter d'applications émergentes, par exemple dans les technologies cognitives, les biotechnologies ainsi que les nanotechnologies.

ITEA2 comporte huit appels à projets sur la période 2006-2013 avec un objectif d'effort cumulé de 20 000 personnes-ans, soit le double de l'effort atteint par ITEA. La situation globale à fin 2009 d'ITEA / ITEA2 en termes d'efforts engagés est donné sur la figure ci-dessus.

La participation française a été de 29 % du total des efforts sur ITEA; de 22 % pour ITEA2 (Call 1, 2 et 3).

JTI ARTEMIS

Après une phase d'élaboration de 4 ans sur la période 2004-2007, la Joint Technology Initiative in Embedded Computing Systems, ou JTI ARTEMIS, a été créée par la Council Regulation²⁷ du 27 décembre 2007 qui en définit les objectifs et la mise en œuvre. Les résultats attendus du JTI ARTEMIS sont (extraits du Council Regulation) :

- *coordinate resources and funding from all sources in order to:*
 - *make a significant contribution to the European Research Area by achieving greater coherence of R&D across Europe, and*
 - *achieve higher efficiency by harmonising procedures and removing uncertainty as to the availability of national budgets (as has been experienced in Eureka) and ("when added value can be created") integrating related Eureka activities into the JTIs ;*
- *increase overall private and public investment in the two sectors;*
- *contribute beyond Research & Technology Development to the research and innovation ecosystem - encompassing the participation of SMEs, the enhancement of education and training, and contribution to standards.*

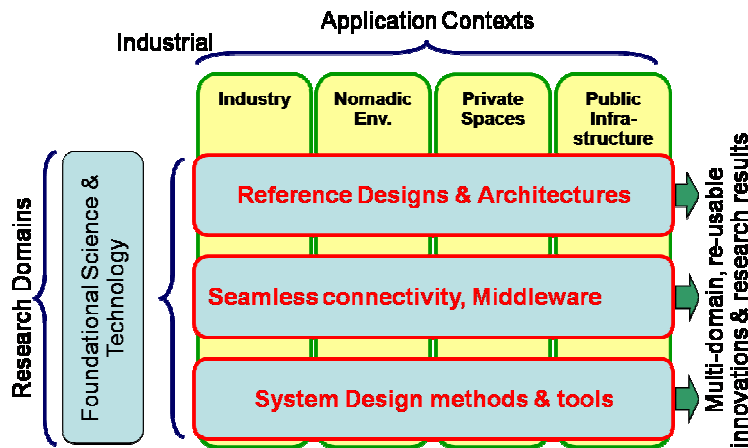
ARTEMIS est un Partenariat Public-Privé (PPP) tripartite comprenant l'industrie, les États membres et la Commission européenne. L'objectif de budget global du programme ARTEMIS sur la période 2008-2013 a été fixé à 2.6 milliards d'euros, financés par les contributions suivantes :

- États membres: 745 millions d'euros.
- EC: 410 millions d'euros.

²⁷ Council Regulation No 74/2008 of 20 December 2007 on the establishment of the 'ARTEMIS Joint Undertaking' to implement a Joint Technology Initiative in Embedded computing Systems

- Secteur privé (industrie): plus que la somme des contributions des États membres et de la Commission européenne.

La vision et les objectifs technologiques d'ARTEMIS sont fixés dans le Strategic Research Agenda (SRA) élaboré durant la phase préliminaire à la création du JTI. Pour ARTEMIS, « *the basis of the SRA is to maintain a strong technological capability in both supply and application of embedded systems by overcoming fragmentation in the Embedded Systems supply base for components and tools* ».



Les priorités technologiques et les domaines applicatifs sont articulés dans le SRA ARTEMIS comme représenté sur la figure ci-contre.

Le JTI ARTEMIS a lancé trois Appels à Propositions en 2008, 2009 et 2010 sur ces priorités. Le dernier Appel sera lancé en 2013. A l'issue des deux premiers appels, 25 projets ont été retenus, financés et engagés pour un montant total d'efforts

de R&D de 405 millions d'euros.

La première évaluation intermédiaire²⁸ de la JTI ARTEMIS fait un constat positif sur la mise en place de la JTI mais observe que ses principaux objectifs stratégiques ne se sont pas encore réalisés au niveau attendu et que le niveau de budget global engagé est significativement en dessous de celui fixé.

ALLEMAGNE

La Nationale Roadmap Embedded Systems²⁹ de l'Allemagne a été élaborée par un groupe de travail mixte industriel (Siemens, EADS Defense & Security, Daimler, OFFIS) et académique (Technische Universität München, Fraunhofer IESE) et publié en décembre 2009 avec le soutien de SafeTRANS, BITKOM, VDI, VDE, VDMA, ZVEI. Ses principaux constats et recommandations sont résumés ci-dessous.

Les systèmes embarqués en Allemagne représentent:

- plus de 3 millions d'emplois dans les hautes technologies,
- 15 milliards d'euros de dépenses en R&D réalisés chaque année par les industries de l'automobile, des automatismes et du médical, dont le CA annuel global dépasse les 500 milliards d'euros,
- une des trois premières places mondiale dans le domaine.

Les Systèmes Embarqués se retrouvent dans tous ces secteurs et sont pour chacun d'entre eux de véritables vecteurs d'innovation essentiels car vecteurs de différenciation, de compétitivité

²⁸ First Interim Evaluation of the ARTEMIS and ENIAC Joint Technology Initiatives, 30 July 2010, European Commission

²⁹ Nationale Roadmap Embedded Systems, ZVEI, 8 December 2009

et de leadership. Pour l'Allemagne, conserver une position de leader dans l'embarqué est crucial, à la fois en ce qui concerne l'emploi et en ce qui concerne la dynamique industrielle.

Définis pour l'horizon 2020, les six segments technologiques prioritaires de la roadmap technologique sont donnés ci-dessous. Il est à noter, comme indiqué pour chacun, la proximité avec plusieurs des Priorités Technologiques retenues dans ce rapport. Un suivi du programme allemand est recommandé.

- Ingénierie à base de modèles [*similaire à la Priorité Technologique n° 1 « Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués »*] ;
- Principes d'architecture ;
- Autonomie des systèmes ;
- Distribution des processus et communications entre processus [*proche de la Priorité Technologique n° 4 « Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués »*] ;
- Interopérabilité [*proche de la Priorité Technologique n° 5 « Plates-formes logicielles embarquées de service »*] ;
- Sûreté, fiabilité et sécurité [*proche de la Priorité Technologique n° 2 « Vérification et certification de systèmes et logiciels embarqués »*].

Sur la période 2010-2020, le coût total des dépenses de R&D sur les systèmes embarqués dépassera les 150 milliards d'euros.

L'effort de recherche à travers les programmes subventionnés requis pour atteindre les objectifs de la roadmap technologique est de 2,5 milliards d'euros, qui se décomposent comme suit : 500 millions d'euros pour chacun des segments précités (autonomie, architecture, distribution et communication, ingénierie virtuelle) et 200 millions d'euros pour respectivement l'interopérabilité et sûreté, fiabilité et sécurité.

La première recommandation est un soutien public substantiel pour mettre en œuvre cette roadmap afin de :

- Maintenir une position de leadership en innovation dans les industries clés (CA global 750 milliards d'euros).
- Protéger plus de 3 millions d'emplois dans les hautes technologies.
- Stimuler les coopérations trans-sectorielles indispensables.

Au plan national, la mise en œuvre des projets sera faite par le programme Software-Plattform Embedded Systems 2020 (SPES 2020)³⁰ du BMBF. Au plan européen, ARTEMIS est l'acteur recommandé.

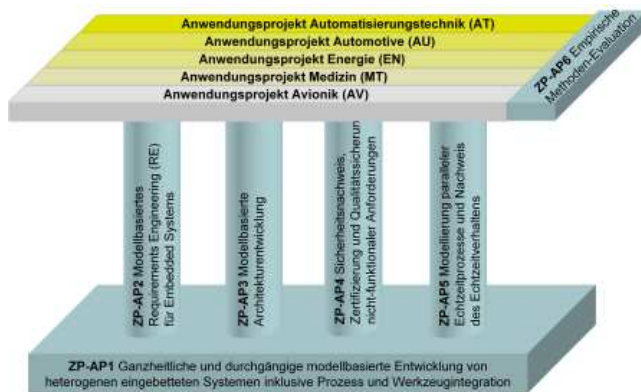
Les autres recommandations portent sur :

1. L'établissement de standards industriels ouverts pour l'interopérabilité, avec la création d'un framework de régulation européen adapté, qui travaillera en coordination avec les organismes nationaux pour une harmonisation au plan européen des différentes initiatives du continent, sous l'égide d'ARTEMIS ;
2. L'établissement de plates-formes technologiques de référence pour garantir la pérennité des résultats de recherche européens, avec une coordination au plan Européen sous l'égide de ARTEMIS ;

³⁰ Cf. <http://spes2020.informatik.tu-muenchen.de/home.html>

3. Une garantie de l'expertise qui se traduira par l'accentuation des efforts de formation et l'encouragement des vocations ;
4. Enfin, l'établissement de coopérations entre experts du domaine, indépendamment du secteur (santé, mobilité, énergie, ...).

Le programme SPES 2020 est constitué, comme représenté sur la figure ci-contre, de six projets technologiques et de cinq projets d'application. Les projets d'application correspondent aux domaines industriels suivant : automatismes industriels, automobile, énergie, médecine et avionique. Les projets technologiques traitent des aspects suivants :



- Sous-projet 1 : « Fondations pour l'approche orientée modèle, incluant les processus et les outils d'intégration ».
- Sous-projets 2 à 5 "Gestion des exigences orientée modèle », "Conception d'architecture orientée modèle », « Preuves de sureté, certification et respect des exigences non-fonctionnelles », « Modélisation et preuve des processus temps-réel parallèles ».
- Sous-projet 6 : « Évaluations

expérimentales ».

PAYS-BAS

Le Ministère des Affaires Économiques des Pays-Bas a lancé en 1997 un programme de recherche consacré aux systèmes et logiciel embarqués, le programme PROGRESS (PROGram for Research in Embedded Systems and Software). La durée initiale du programme était de six ans. Huit appels à propositions ont été lancés, le premier en 1998 et le dernier en 2007. Le budget visé de PROGRESS était de 8 millions d'Euros dont une subvention de 5,5 millions d'euros du Ministère des Affaires Économiques et une participation attendue de 2,5 millions d'euros des partenaires des projets.

En 2001, le Comité de Programme de PROGRESS a mené une action de roadmapping qui s'est traduite par la publication du rapport «Embedded Systems Roadmap 2002, Vision on technology for the future of PROGRESS »³¹.

Le rapport d'avancement intermédiaire du programme publié en 2002 fait état d'une dynamique supérieure aux prévisions. A la fin 2002, 11 millions d'euros étaient engagés dont 6 millions de subventions et 5 millions venant des partenaires des projets, significativement au-delà des prévisions initiales. A cette date, la projection pour la fin du programme était un budget de 17 millions d'euros dont 11,2 financés par les partenaires des projets (à parts égales pour les acteurs industriels et académiques).

³¹ Embedded Systems Roadmap 2002, Vision on technology for the future of PROGRESS, March 30, 2002 [ed. Ludwig D.J. Eggermont], STW Technology Foundation / PROGRESS

Globalement, le programme a engagé environ 35 projets, soit en moyenne 0,5 million d'euros par projet. La nature des projets est très largement de type exploratoire sans, en première analyse, de projets à niveau élevé de maturité technologique.

8.2. USA : NETWORKING AND INFORMATION TECHNOLOGY RESEARCH AND DEVELOPMENT (NITRD) PROGRAMME

Le programme fédéral US Networking and Information Technology Research and Development (NITRD), aujourd'hui dans sa 19^{ème} année, définit le cadre et les mécanismes de coordination entre les différentes agences fédérales qui soutiennent la R&D en technologies avancées de l'information et de la communication.

Pour le programme High Confidence Software and Systems (HCSS), la demande budgétaire est de 147 millions de dollars (115 millions d'euros) en 2011 – avec un budget de 138 millions de dollars (108 millions d'euros en 2010 - et les priorités 2011 sont les suivantes³² :

CYBER-PHYSICAL SYSTEMS (CPS):

Continuing support for research to enable physical, biological, and engineered systems whose operations are integrated, monitored, and/or controlled by a computational core and interact with the physical world, with components networked at every scale and computing deeply embedded in every physical component, possibly even in materials; real-time embedded, distributed systems and software

CYBER-ENABLED DISCOVERY AND INNOVATION (CDI):

Continuing focus to include software for tomorrow's complex systems, including CPS; address challenges of large-scale interacting systems, investigate their non-linear interactions and aggregate or emergent phenomena to better predict system and decision-making capabilities about complex systems – NSF

HIGH-CONFIDENCE SYSTEMS AND FOUNDATIONS OF ASSURED COMPUTING:

Methods and tools for modeling, measuring, analyzing, evaluating, and predicting performance, correctness, efficiency, dependability, scalability, and usability of complex, real-time, distributed, and mobile systems; high-confidence platforms for sensing and control; virtualization, architectures, components, composition, and configuration; systems-of-systems governance, engineering, analysis and testing of software and hardware; specification and synthesis, programming language semantics, and computational models; advanced tools design, development, V&V, and measurement capabilities to assure a safe computing platform; techniques for assuring applications are free from malware, vulnerabilities; quantum information processing.

INFORMATION ASSURANCE REQUIREMENTS:

Methods, tools for constructing, analyzing security structures (management architectures and protocols, etc.); assurance technologies for cross-domain creation, editing, sharing of sensitive information in collaboration environments that span multiple security levels; assured compilation of cryptographic designs, specifications to platforms of interest – ONR, NSA; testing

³² Networking and Information Technology Research and Development, Supplement to the President's Fiscal Year (FY) 2011 Budget, February 2010

infrastructure for health IT standards, specifications, certification (with HHS); cross-enterprise document sharing in electronic health systems.

STANDARDS AND TEST METHODS FOR INTELLIGENT INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS SECURITY (ICS) AND NETWORKS:

Approaches to balancing safety, security, reliability, and performance in SCADA and other ICS used in manufacturing and other critical infrastructure industries (e.g., water, electric power, oil and gas, chemicals, pharmaceuticals, food and beverage, materials processing) and building security into next-generation systems; ensuring performance, interoperability of factory floor network communication devices and systems; leading Smart Grid Industrial-to-Grid Domain Expert Working Group to achieve interoperability of Grid devices .

9. PROPOSITIONS

9.1. INTRODUCTION

Les six constats suivants résument la situation française en matière de Logiciel Embarqué telle qu'elle a été présentée et analysée dans les chapitres précédents de ce rapport.

Ces constats déterminent les propositions qui suivent.

CONSTAT N° 1

Le domaine des systèmes embarqués, et plus particulièrement celui du logiciel embarqué, sont entrés dans une phase d'évolution profonde et rapide. Aux domaines traditionnels des systèmes embarqués critiques s'ajoutent de nombreux nouveaux marchés. Les frontières entre écosystèmes et entre acteurs se redéfinissent à cette occasion. De nouvelles technologies sont en phase d'émergence.

Les enjeux induits par ces ruptures de technologies et de marché sont considérables. Ils guident les propositions faites.

CONSTAT N° 2

Il existe en France un niveau élevé de maîtrise technologique et industrielle du domaine des systèmes et logiciels embarqués. Il se manifeste tant par les positions de leadership mondial des acteurs industriels concernés que par l'excellence, le dynamisme et la reconnaissance internationale de la recherche publique dans le domaine.

Globalement, la France est aujourd'hui reconnue comme un des leaders mondiaux des systèmes embarqués. Cette position doit être impérativement maintenue dans un contexte fortement évolutif tant pour les technologies de base, logiciel embarqué et microélectronique, qu'en ce qui concerne les nouveaux domaines de déploiement et la concentration des acteurs au niveau mondial

CONSTAT N° 3

Les conditions nécessaires sont réunies pour l'engagement et la réussite d'une initiative forte sur le logiciel embarqué. Les différentes roadmaps technologiques disponibles proposent des visions cohérentes ; les acteurs se rassemblent, s'organisent et ont accumulé une forte expérience de recherche collaborative ; le décroisement entre secteurs industriels autrefois autonomes a été engagé. Cette situation est largement le résultat des actions menées au cours des cinq dernières années tant par les dispositifs publics nationaux de recherche et d'innovation (Réseau National des Technologies Logicielles (RNTL), pôles de compétitivité, programmes multinationaux, Assises de l'Embarqué 2007, 2008, 2009 et 2010, programmes de l'Agence nationale de la recherche, etc.) que par les communautés et les organisations professionnelles concernés (FIEEC, Comité Embarqué de Syntec informatique, Club des Grandes Entreprises de l'Embarqué (CG2E)).

CONSTAT N° 4

Les capacités technologiques nationales en logiciel embarqué, tant privées que publiques, sont excessivement fragmentées. Le secteur industriel primaire - celui des éditeurs et techno-providers de logiciel embarqué – est fragile, ayant aujourd’hui trop peu d’acteurs de taille suffisante pour exploiter pleinement le potentiel technologique national, le pérenniser et le projeter au niveau international.

Cette fragmentation des capacités technologiques aussi bien que la fragilité du secteur primaire créent un risque fort, celui qu’à terme, en raison de la complexité et des coûts croissants de développement des briques technologiques du logiciel embarqué, la maîtrise de ces briques au niveau national s’affaiblisse, que les évolutions technologiques futures dans le domaine du logiciel embarqué ne puissent pas être suffisamment anticipées et ensuite exploitées et qu’elles bénéficient alors davantage à des acteurs extérieurs ayant la capacité de les valoriser plutôt qu’aux acteurs nationaux.

CONSTAT N° 5

La phase actuelle d’évolution du logiciel embarqué présente de nombreuses opportunités de croissance et prises de position fortes des acteurs français, tant en matière de briques technologiques que de marchés émergents. Cette situation est la conséquence de l’expansion considérable des domaines d’applications et de la remise en cause des frontières classiques entre les domaines. Ces opportunités doivent être saisies rapidement.

CONSTAT N° 6

Le logiciel embarqué est une technologie largement diffusante, de façon croissante, dans la majorité des secteurs impactés par les usages, services et contenus numériques innovants. Les propositions qui sont faites ne peuvent donc être uniquement portées et mises en œuvre par les acteurs technologiques des domaines traditionnels du logiciel embarqué mais doivent s’articuler étroitement avec les actions menées vers les autres thématiques prioritaires d’intervention du Fonds pour la Société Numérique tels que le réseau électrique intelligent (smart grid), l’E-santé, la sécurité et la résilience des réseaux, les systèmes de transport intelligents et la ville numérique.

A partir de ces constats et sur la base des analyses présentées dans les chapitres précédents, huit propositions sont formulées:

- déterminant les priorités à retenir pour la maîtrise des briques technologiques du logiciel embarqué.
- définissant de nouveaux dispositifs et modalités de projets pour développer et organiser la structuration, dans la durée, de masses critiques permettant d’adresser les principaux verrous technologiques génériques du logiciel embarqué.

- conçues et dimensionnées pour être mises en œuvre et soutenues par le dans les appels à projets de la thématique « Technologies de base du numérique » des investissements d’avenir.

Par ailleurs, un ensemble d’actions d’accompagnement sont nécessaires pour un meilleur suivi et connaissance du domaine logiciel embarqué, pour poursuivre les actions d’animation et de rapprochement des écosystèmes, pour développer la visibilité européenne et internationale des technologies et acteurs nationaux et pour assurer la disponibilité et l’accès aux compétences requises. Ces actions sont présentées dans la dernière partie de ce chapitre.

9.2. PROPOSITIONS

CIBLER LES INSTRUMENTS VERS LES OBJECTIFS DE MASSES CRITIQUES

Le domaine du logiciel embarqué bénéficie en France de plusieurs instruments efficaces de soutien public (FUI, ITEA2, ANR) qui ont contribué fortement dans les dernières années à sa maturité et à son développement. Conçus pour lever des verrous technologiques et assurer la régénération technologique par des actions de recherche collaborative en réseau, ces instruments sont indispensables et leur action doit être poursuivie et renforcée.

Toutefois, les caractéristiques de ces instruments, répondant à d’autres types d’objectifs (ancrage régional, coopération à l’échelle européenne, etc.), ne permettent pas de focaliser complètement leur action sur la structuration de masses critiques pour la maîtrise des briques génériques du logiciel embarqué. Les appels « Logiciel Embarqué » de la thématique « Technologies de Base du Numérique » soutenus par le Fonds pour la Société Numérique sont une opportunité pour aller encore plus loin dans cette logique de focalisation et de constitution de masses critiques.

PROPOSITION N° 1

Cibler les appels à projets « Logiciel Embarqué » de la thématique « Technologies de Base du Numérique » des Investissements d’Avenir sur un nombre limité d’objectifs technologiques focalisés sur les briques génériques du logiciel embarqué.

Définir des modalités d’organisation de projets qui assurent que ces projets contribuent directement à la structuration de masses critiques recherchée.

FOCALISER LES RESSOURCES SUR HUIT TECHNOLOGIES PRIORITAIRES

Il a été identifié huit briques – ou sous-ensembles cohérent de briques - technologiques génériques du logiciel embarqué dont la maîtrise est déterminante pour la compétitivité industrielle. Cette liste est volontairement de taille réduite afin de concentrer les ressources sur ces thèmes et de pouvoir suivre l’impact et les retombées des actions engagées. Cette liste doit être revue périodiquement (tous les 2 ans) afin de tenir compte des résultats obtenus et des évolutions de contexte.

PROPOSITION N° 2

Les huit technologies prioritaires sur lesquelles concentrer les ressources sont :

1. Conception orientée modèles de systèmes et logiciels embarqués.
2. Vérification et certification de la sûreté de fonctionnement et de la sécurité informatique de systèmes embarqués.
3. Virtualisation et parallélisation pour calculateurs embarqués Multi / Many Core.
4. Architectures réparties, middleware et réseaux embarqués.
5. Plates-formes logicielles embarquées de service.
6. IHM et interfaces hommes-systèmes pour systèmes embarqués.
7. Bibliothèque génériques pour le traitement (signal, image, contrôle ...) embarqué.
8. Gestion de l'énergie embarquée.

METTRE EN PLACE L'EFFORT FINANCIER NECESSAIRE POUR STRUCTURER DES MASSES CRITIQUES ET SAISIR LES OPPORTUNITES

Un saut qualitatif et quantitatif est indispensable immédiatement pour saisir les opportunités présentes, mobiliser les acteurs privés et publics et aboutir à moyen-terme, à l'horizon 2015, aux effets structurants souhaités en termes de maîtrise des briques technologiques identifiées comme prioritaires et de constitution de masses critiques.

PROPOSITION N° 3

Compte tenu des enjeux évoqués, d'une part, et du degré de focalisation préconisé, d'autre part, le montant des aides à mobiliser sur les appels à projets « Logiciel Embarqué » du programme « Technologies de Base du Numérique » des Investissements d'Avenir est de 150 millions d'euros ; ces aides devront être mises en œuvre avec un niveau d'incitativité à la mesure des risques technologiques élevés des objectifs retenus.

Ce niveau d'aide générera un effort global de 500 millions d'euros sur les trois prochaines années, dont environ 350 millions d'euros apportés par les acteurs privés et publics, permettant d'engager les actions ciblées indispensables.

La rapidité de la mobilisation constitue un facteur déterminant de l'efficacité de l'effort consenti. C'est pourquoi il est préconisé de concentrer les aides sur deux appels à projets, à un an maximum d'intervalle.

STRUCTURER LES PROJETS « LOGICIEL EMBARQUE » SELON LES AXES « BRIQUES TECHNOLOGIQUES » ET « SYSTEMES » ;

Les analyses présentées dans le rapport mettent en évidence deux principaux axes de structuration des masses critiques :

- l'axe « briques technologiques », autour de briques ou de sous-ensembles cohérent de briques, reposant sur des collaborations entre les développeurs de ces briques ;
- l'axe « systèmes », visant à proposer et valider des architectures innovantes de plateformes logicielles caractéristiques des contraintes de chaque écosystème applicatif (en termes d'architectures, d'intégration, d'exigences non-fonctionnelles...), intégrant des ensembles de briques technologiques et reposant sur des collaborations entre les intégrateurs et opérateurs de l'écosystème et les développeurs technologiques; sur cet axe, les situations sont significativement différentes selon qu'il s'agit :
 - d'un écosystème établi et organisé, techniquement mûr et stabilisé,
 - d'un écosystème émergent et en voie de structuration, tant en termes d'acteurs que de solutions techniques.

Afin que l'appel à projets « Briques Génériques du Logiciel Embarqué » des Investissements d'Avenir atteigne les objectifs fixés, ces axes de structuration doivent être pris en compte dans le cadrage des propositions sollicitées et des consortiums qui les portent. Il est donc nécessaire que l'appel sollicite des projets selon différentes catégories, en termes de finalités R&D et de partenaires, et qu'il fixe les critères d'évaluation propres à chacune de ces catégories.

PROPOSITION N° 4

Il est proposé que l'appel « Logiciel Embarqué » sollicite des projets visant un niveau élevé de maturité (TRL 7) et positionnés sur l'une des deux catégories suivantes :

1. Projets « Briques technologiques », associant différents techno-providers de briques (ou d'ensembles de briques) génériques et à caractère transverse ;
2. Projets « Systèmes », visant à développer et valider des concepts innovants de plateformes logicielles ouvertes caractéristiques des contraintes de chaque écosystème applicatif et associant acteurs de l'écosystème et « techno-providers » de briques génériques.

Les projets devront démontrer leur capacité à :

- Atteindre le niveau de maturité technologique indiqué ;
- Mobiliser un niveau d'effort suffisant (de 50 à 150 h.a.) pour réaliser les effets de masses critiques recherchés ;
- Amener à un niveau de leadership européen les acteurs « techno-providers » impliqués : éditeurs logiciels, communautés du logiciel libre, organismes de recherche technologique;
- Pour les projets « Systèmes », renforcer la position des acteurs impliqués sur les marchés sectoriels existants ou contribuer à la structuration et au positionnement de ces acteurs sur les marchés émergents.

Il est recommandé que ces projets s'appuient, chaque fois que pertinent, sur les ressources mutualisées existantes ou à constituer.

ASSURER LA COHERENCE TECHNOLOGIQUE ET INDUSTRIELLE DES PARTENARIATS

En matière de recherche partenariale, la dimension purement technologique est insuffisante pour structurer des masses critiques dans la durée si elle n'est pas intégrée dans des schémas industriels et des modèles d'affaires partagés. Par exemple :

- projets associant intégrateurs et fournisseurs technologiques : référencement des partenaires fournisseurs dans les bases achat des intégrateurs ;
- projets associant plusieurs fournisseurs technologiques : accord entre ces partenaires en matière d'interopérabilité de leurs technologies ou d'offre de solutions intégrés.
- projets de développement de plates-formes embarquées pour des secteurs émergents : accord de groupement stable des principaux partenaires.

PROPOSITION N° 5

Afin de garantir que les projets engagés aient un impact fort en matière de structuration de masses critiques, il est proposé que, parmi les différents critères d'évaluation des projets, celui relatif à l'appréciation des consortia porteurs des projets porte autant sur les complémentarités technologiques des partenaires que sur les accords industriels, alliances ou plans d'affaires existants ou prévus entre ces mêmes partenaires pour les technologies faisant l'objet des projets.

EXPLOITER L'EFFET DE LEVIER DES AUTRES INSTRUMENTS DE CONSTITUTION DE MASSES CRITIQUES

A coté des appels à projets de R&D qui font l'objet des propositions précédentes, le programme des Investissements d'Avenir prévoit d'autres instruments (Équipement d'Excellence, Institut de Recherche Technologique, Société d'Accélération de Transfert Technologique, Institut Carnot) contribuant à la structuration de masses critiques de R&D, en rassemblant équipements, compétences privées et publiques et en offrant des capacités nouvelles d'intégration, de démonstration et de valorisation technologique.

PROPOSITION N° 6

Afin d'atteindre la meilleure efficacité, profiter des économies d'échelle, renforcer les effets de masse critique, il est recommandé que ces instruments, dans l'hypothèse où ils seraient concernés par les thématiques des systèmes et logiciels embarqués:

- concentrent leurs financements (investissements et fonctionnement) et leurs activités, en ce qui concerne les thématiques précitées, sur les huit priorités technologiques énoncées dans la Proposition n° 2 ;
- assurent toute l'ouverture nécessaire de leurs ressources aux acteurs PME « Techno-providers » du domaine;
- recherchent la constitution de masses critiques de compétences en s'appuyant sur les laboratoires disposant d'une taille significative dans le domaine.

ETABLIR UNE VISION MULTI-ANNUELLE ET MULTINATIONALE

Le saut qualitatif et quantitatif recommandé au titre de la Proposition n° 3 demande à être complété par une action inscrite dans la durée.

Pour mémoire, le programme allemand chiffre à 2,5 milliards d'euros sur la période 2011-2020 l'effort de recherche requis à travers les programmes subventionnés pour atteindre les objectifs de sa roadmap technologique.

Comme indiqué plus haut, plusieurs instruments efficaces de soutien public à finalité industrielle (FUI, ITEA2) ont fait leurs preuves en la matière. Ces instruments ont contribué fortement dans les dernières années à la maturité et au développement du logiciel embarqué. Il convient de capitaliser sur leurs capacités à structurer des partenariats au niveau territorial et européen.

PROPOSITION N° 7

Il est recommandé que les actions portées par FUI et ITEA2 soient poursuivies et renforcées dans une vision multi-annuelle et multinationale:

- en cohérence avec les priorités fixées dans la Proposition n° 2 ;
- en intégrant, dans toute la mesure du possible, les approches et pratiques proposées dans les Propositions n° 4, 5 et 6.

JOUER DE L'APPROCHE « INVESTISSEUR AVISÉ »

L'effort accompli dans le domaine de la R&D doit être complété par une incitation à la mise en œuvre des résultats de cette R&D. Autrement dit, et de manière très concrète, l'appel à projets « Briques Génériques du Logiciel Embarqué » doit trouver son prolongement dans une intervention du Fonds pour la Société Numérique agissant en tant qu'investisseur avisé, au titre des nouveaux usages numériques visés au titre des Investissements d'Avenir (réseau électrique intelligent, e-santé, sécurité et résilience des réseaux, systèmes de transport intelligents, ville numérique).

En effet, le développement de ces nouveaux usages repose essentiellement sur la maîtrise des technologies du logiciel embarqué.

PROPOSITION N° 8

L'intervention du Fonds pour la Société Numérique, agissant en tant qu'investisseur avisé, au titre des nouveaux usages numériques pourra concerner :

- les entreprises offrant des biens ou services relevant de ces nouveaux usages ;
- les entreprises « techno-providers » visant au développement et à la commercialisation de briques génériques du logiciel embarqué, susceptibles d'être utilisées au titre de ces nouveaux usages.

9.3. ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT

Il est recommandé que les quatre actions suivantes soient engagées en accompagnement des huit propositions présentées ci-dessus et bénéficient du soutien des pouvoirs publics. Pour l'année 2011, le coût de ces actions est de 0,7 million d'euros avec un soutien attendu de 0,5 million d'euros.

Pour des raisons de cohérence et d'efficacité, elle recommande également qu'une organisation unique se structure pour porter ces actions, à partir des organisations existantes et avec élargissement à l'ensemble des secteurs professionnels concernés.

SUIVI ET CONNAISSANCE DU DOMAINE LOGICIEL EMBARQUE

Il s'agit de suivre et d'analyser aussi précisément que possible les évolutions rapides du domaine des logiciels embarqués, des écosystèmes et de leurs acteurs.

Pour ce faire, il est proposé la création d'un Observatoire de l'Embarqué qui aura pour missions :

- De rassembler et exploiter les données disponibles.
- De lancer les études complémentaires nécessaires à une meilleure compréhension du domaine et à la préparation d'actions spécifiques (cartographie fine des acteurs « techno-providers », évolution des compétences, etc.).
- De faire des recommandations aux pouvoirs publics et aux organisations professionnelles.

ANIMATION ET DECLOISONNEMENT DES ECOSYSTEMES

Comme indiqué à plusieurs reprises, le rapprochement et le décroisonnement des écosystèmes, en particulier à travers des actions communes de standardisation, est un enjeu fort. Comme démontré par le CG2E (Club des Grandes Entreprises de l'Embarqué), le succès de ces démarches n'est possible que par des actions d'animation, de rencontres et de réflexions communes.

Ces actions doivent être amplifiées et portées de façon pérenne. En particulier, il faut mener à terme l'étude engagée par le CG2E sur les normes et les standards de développement liés à la sécurité des systèmes et logiciels embarqués critiques.

Les standards ainsi préparés sont susceptibles de constituer des actifs immatériels déclencheurs d'investissements privés.

MANIFESTATION INTERNATIONALE SYSTEMES ET LOGICIELS EMBARQUES

Une des manifestations annuelles majeures du domaine des Systèmes et Logiciels Embarqués est Embedded World qui a lieu chaque année en Allemagne à Nuremberg en mars. Embedded World 2010 a réuni 730 exposants et accueilli 18 350 visiteurs. Il n'y a pas d'équivalent en France.

Une manifestation organisée en France, avec la taille critique permettant de s'imposer à l'international et d'y projeter la place de la France dans le domaine, serait un atout pour l'ensemble des acteurs concernés. Une analyse doit être conduite pour valider l'intérêt de ce projet et en définir les modalités de réalisation.

DISPONIBILITE ET ACCES AUX COMPETENCES EN LOGICIEL EMBARQUE

Les études disponibles convergent sur les besoins de profils qualifiés en logiciel embarqué, sur la nécessité de renforcer les formations initiales dans le domaine et sur les difficultés pour l'industrie que représentent les mutations de compétences, particulièrement pour les entreprises de taille limitée.

Une analyse détaillée des risques en matière de disponibilité et d'accès aux compétences en logiciel embarqué doit être conduite et un plan d'action sur le sujet doit être mis en place en partenariat étroit avec les acteurs concernés : le Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche, l'Observatoire Paritaire des Métiers de l'Informatique, de l'Ingénierie, des Études et du Conseil (OPIIEC), la Fédération des Industries Électriques, Électroniques et de Communication (FIEEC), la Chambre professionnelle des sociétés de Conseil et de Services informatiques, des Éditeurs de Logiciels et des sociétés de Conseil en Technologies (Syntec informatique).

10. ANNEXE A : LETTRE DE MISSION



LE MINISTRE CHARGÉ DE
L'INDUSTRIE

LA SECRÉTAIRE D'ÉTAT CHARGÉE DE
LA PROSPECTIVE ET DU DÉVELOPPEMENT DE
L'ÉCONOMIE NUMÉRIQUE

LE COMMISSAIRE GÉNÉRAL
À L'INVESTISSEMENT

Paris, le 9 JUIN 2010

Monsieur,

L'un des atouts majeurs de l'économie française réside dans l'existence, sur son territoire, de grands industriels intégrateurs, dans des domaines tels que les technologies de l'information, l'automobile, l'énergie, l'aéronautique ou encore le spatial.

Ces « systèmes complexes » présentent deux caractéristiques essentielles :

- l'innovation, tous secteurs confondus, y repose de plus en plus sur le logiciel embarqué ;
- les développements logiciels « métier », qui mobilisent souvent des effectifs considérables, y sont rendus possibles – et y sont étroitement déterminés – par la maîtrise de briques technologiques génériques (autour de thématiques telles que la fiabilité des systèmes critiques, la réutilisabilité et l'interopérabilité des composants, le fonctionnement en temps réel, l'immersion des systèmes embarqués dans le web...).

C'est ainsi que les briques génériques du logiciel embarqué sont désormais appelées à jouer un rôle comparable à celui de la nanoélectronique quant à leur impact sur la capacité d'innovation – et donc la compétitivité – de l'ensemble de l'industrie.

Ces technologies de base du numérique – nanoélectronique et logiciel embarqué – constituent un continuum technologique et industriel. L'évolution technologique et le jeu des acteurs, tel qu'il peut être observé au niveau mondial, rendent désormais nécessaire la constitution d'importantes masses critiques pour le développement de ces technologies. Il s'agit là d'un enjeu de premier plan pour la compétitivité de moyen et long terme des filières industrielles françaises. A ce titre, ces technologies ont été retenues au titre du volet numérique du programme « d'investissements d'avenir ».

Votre vaste expérience du logiciel embarqué, tant au titre de votre carrière professionnelle qu'à celui de votre rôle dans le pilotage de plusieurs initiatives de partenariat public-privé, vous qualifie particulièrement pour mener une réflexion approfondie dans ce domaine.

Monsieur Dominique POTIER

C'est pourquoi nous avons souhaité vous confier une mission, que nous vous remercions d'avoir acceptée, afin de nous faire part de votre analyse et de vos propositions quant aux priorités à retenir pour la maîtrise des briques génériques du logiciel embarqué.

Les enjeux stratégiques évoqués ci-dessus, associés à la rapidité des évolutions constatées, rendent nécessaire une action publique volontariste, reposant sur le soutien de projets de R&D coopératifs. L'accent sera mis sur la structuration, dans la durée, de masses critiques permettant d'adresser les principaux verrous technologiques génériques du logiciel embarqué.

Votre rapport contribuera en particulier à préparer le lancement d'appels à projets du programme « économie numérique » des « investissements d'avenir ».

Vous mènerez votre réflexion dans le cadre d'un groupe de travail représentatif des grands acteurs du domaine, dont il vous appartiendra de désigner les membres. Vous veillerez également à prendre en compte les contributions que les acteurs économiques auront apportées à la consultation publique sur les usages et les services lancée par la Secrétaire d'Etat à la prospective et au développement de l'économie numérique et le Commissaire Général à l'Investissement. Vous recueillerez, par ailleurs, l'avis des associations professionnelles concernées.

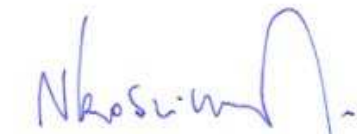
Pour mener à bien votre mission, vous pourrez utilement vous appuyer sur les services de la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services.

Vous voudrez bien nous faire part de vos propositions pour le 30 septembre prochain.

Nous vous prions de croire, Monsieur, à l'assurance de nos sentiments les meilleurs.



Christian ESTROSI



Nathalie KOSCIUSKO-MORIZET



René RICOL

11. ANNEXE B : GROUPE DE TRAVAIL

Nom		Organisme	Responsabilité
Eric	Bantégne	Esterel Technologies	PDG Esterel Technologies Président Comité Embarqué Syntec informatique
Michel	Bidoit	CNRS	Directeur adjoint scientifique de l'INS2I
Riadh	Cammoun	CEA	Président du Comité ARPEGE de l'ANR Directeur du CEA-LIST
Jean-Luc	Chabaudie	ALTRAN	DG Adjoint ALTRAN PRAXIS
Cyrille	Comar	ADACORE	Directeur AdaCore France
Jean-Claude	Derrien	SAFRAN / SAGEM	Directeur Technique logiciels et traitements numériques
Michel	Desjouis	THALES	VP Centre de Compétences Missions & Fonctions, Thales Avionics
Jean-Luc	Dormoy	Groupe EDF	Director, EDF Group Programme, Home Technologies & Smart Metering
Eliane	Fourgeau	DASSAULT SYSTÈMES / GEENSOFT	PDG Geensoft
Frédéric	Hannoyer	ST MICROELECTRONICS	France R&D and Advanced Programs Director
Gérard	Lary	SII	DG SII
Gilles	Le Calvez	VALEO	Directeur Excellence Fonctionnelle R&D, Valeo
Christophe	Lécluse	KALRAY	Directeur Général Adjoint Paris
Claude	Lepape	SCHNEIDER-ELECTRIC	VP Recherche
Jean-René	Lequepeys	CEA-LETI	CEA-LETI
Philippe	Richard	ALCATEL-LUCENT	VP CREE, Alcatel-Lucent Corporate CTO
Alain	Ripart	SORIN	Directeur Scientifique
Fred	Rivard	IS2T	PDG
Gérard	Roucairol	TERATEC et Académie des Technologies	Président Teratec
Josepf	Sifakis	CNRS	Prix Turing 2008
Bruno	Sportisse	INRIA	Directeur du Transfert et de l'Innovation
Marie-Line	Valentin	AIRBUS	Coordination projets de recherche, Centre de compétence Avionique et Simulation d'Airbus Operations

12. ANNEXE C : AUTRES CONTRIBUTEURS

Le Groupe de travail s'est organisé en quatre sous-groupes ouverts à des participants extérieurs. Les sous-groupes mis en place et leurs responsables sont :

- Sous-groupe 1 : Vision et synthèse (Dominique Potier)
- Sous-groupe 2 : Briques génériques du logiciel embarqué (Eric Bantégnie)
- Sous-groupe 3 : Écosystèmes du logiciel embarqué (Claude Lepape, Eliane Fourgeau)
- Sous-groupe 4 : Masses critiques (Riadh Cammoun, Jean-Luc Dormoy)

Les noms des participants à ces sous-groupes (hors ceux du groupe de travail) ainsi que ceux des responsables des pôles de compétitivité ayant répondu au questionnaire sont donnés ci-dessous.

Romain Berrendonner	ADACORE
Philippe Carré	ALCATEL-LUCENT
Olivier Chavrier	SCS
Laurent Cosson	ALCATEL-LUCENT
François Cuny	SYSTEMATIC
Aymeric Fillon	SAFRAN
Gérard Ladier	AEROSPACE VALLEY
Nicolas Rosset	SORIN

13. ANNEXE D : ENTRETIENS

Nom	Organisme	Responsabilité
Gérard Berry	INRIA	Directeur de recherche
François Bichet	DASSAULT SYSTÈMES	Directeur R&D
Thomas Chéhiré	THALES	Directeur Key Technology Domain Software
Roberto di Cosmo	INRIA	Président du Centre National du Logiciel Libre (CNLL) Directeur de l'IRILL
Jean-Pierre Lacotte	TECHNICOLOR	Directeur
David Lesens	ASTRIUM SPACE TRANSPORTATION	Expert Logiciel Embarqué
Gérar Memmi	INSTITUT TÉLÉCOM PARISTECH	Directeur scientifique adjoint
Eric Munier	EADS DEFENSE & SECURITY	Chef de projets R&T
Robert Plana	MESR	Directeur scientifique Maths, Physique, Nanosciences, STIC
Alain Rossignol	ASTRIUM SATELLITES	Responsable R&T système logiciel
Laurent Julliard, Jacques Pulou, Emmanuel Dufour, Denis Chalon, Jean-Yves Larignon	MINALOGIC	Comité EMSOC

14. ANNEXE E : CONTRIBUTEURS « LOGICIEL EMBARQUE » A LA CONSULTATION SUR LES USAGES, SERVICES ET CONTENUS NUMERIQUES INNOVANTS

Catégorie	Contributeurs
Pôles de compétitivité	Aerospace Valley Images & Réseaux Minalogic S2E2 SCS Systematic TES
Organisations professionnelles	FIEEC Gixel Syntec Informatique
Entreprises	Capucine (Carte à puce citoyenne) Cybronics EADS Eolane Ethertrust France Telecom Gemalto IBM IDC IS2T Keynectis Linagora Morpho Oracle Qosmos Sagem Com SAP Secure-IC STMicroelectronics Thales Technicolor Validy
Organismes de recherche	INRIA Institut Telecom IRCCyN Allistene Nano-INNOV
Collectivités	Conseil Général de l'Essonne Région Bretagne
Contributions individuelles	Bruno Bouyssounouse (Verimag) Jérôme Jadot Bernard REYNIER (Cluster Bâtiment Econome)

15. ANNEXE F : DOCUMENTS DE REFERENCE

Embedded Systems Roadmap 2002, Vision on technology for the future of PROGRESS, [ed. Ludwig D.J. Eggermont], STW Technology Foundation / PROGRESS, March 2002

The Growing Importance of Embedded Systems, The Boston Consulting Group, 2004

Software Intensive Systems in the future, TNO / IDATE, September 2006

ARTEMIS Strategic Research Agenda, First Edition, March 2006

Logiciels embarqués, Albert Benveniste, INRIA, septembre 2006

Livre blanc des premières Assises Françaises du Logiciel Embarqué, Syntec informatique, RNTL, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'industrie, mars 2007

Cartographie du secteur des fournisseurs de Logiciels et Services dans le domaine des systèmes embarqués, PAC et IDC, mars 2007

« Pourquoi et comment le monde devient numérique ? », Leçon inaugurale de Gérard Berry au Collège de France, janvier 2008

Étude sur le marché et les compétences autour des logiciels embarqués, OPIIEC / PAC, 2008

Embedded Systems in Germany, BITKOM / PAC, June 2008

Embedded Systems Common Technical Baseline, B. Bouyssounouse (VERIMAG), Th. Veitshans (CEA), Ch. Lecluse (CEA), juin 2008

Adéquation entre les besoins en compétence et l'offre de formation dans les 10 métiers clés de l'informatique embarquée, OPIIEC / KATALYSE, mai 2009

ITEA Roadmap for Software Intensive Systems, 3rd Edition, February 2009

Le Livre blanc des Systèmes Embarqués, Syntec informatique, juin 2009

Nationale Roadmap Embedded Systems, ZVEI, December 2009

ALLISTENE , Création de l'Alliance des Sciences et Technologies du Numérique, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, décembre 2009

EC Council Regulation on the establishment of the ARTEMIS Joint Undertaking to implement a Joint Technology Initiative in Embedded computing Systems, No 74/2008, December 2007

Networking and Information Technology Research and Development, Supplement to the President's Fiscal Year (FY) 2011 Budget, February 2010

Les sites français de production micro-nanoélectronique, Laurent Malier, mai 2010

First Interim Evaluation of the ARTEMIS and ENIAC Joint Technology Initiatives, European Commission, July 2010

Livre Arc-en-Ciel, AGORA du Réseau Domiciliaire, juillet 2010

Le Livre blanc des Systèmes Embarqués, Syntec informatique, octobre 2010