

Systemes embarqués... c'est déjà demain

BRUNO BOUYSSOUNOUSE, JOSEPH SIFAKIS^[1]

Introduisez du logiciel dans un appareil pour faire remplir à ce dernier une fonction spécifique et vous obtenez un système embarqué.

Transport, énergie, télécommunications, électronique grand public..., les débouchés sont considérables.

À tel point que les systèmes embarqués deviennent un enjeu stratégique pour notre économie et constituent désormais une discipline à part entière.

L'injection de l'informatique dans tous les appareils

Capacité à assurer des fonctions critiques et à mêler des composants hétérogènes, autonomie, réactivité... En insérant l'informatique dans les moindres recoins, les systèmes embarqués multiplient les exigences. D'où la nécessité de mêler les compétences pour créer des techniques et des méthodes de conception susceptibles de répondre simultanément à tous les défis techniques.

L'injection de l'informatique dans tous les appareils fournissant un service : c'est à ce défi qu'invitent les systèmes embarqués, ces composants qui intègrent du logiciel et du matériel conçus ensemble, pour remplir des fonctions spécifiques. Tous les appareils incluant des logiciels – visibles ou non – dans leur fonctionnement appartiennent à cette famille. Avec des applications larges : transport (avionique ¹, espace, automobile, ferroviaire), appareils électriques et électroniques (appareils photo, jouets, postes de télévision, lave-linge, systèmes audio, téléphones portables), distribution d'énergie, automatisation, etc.

Un système embarqué capte des informations de son environnement, pour agir dessus, sans intervention humaine. Par exemple, un téléphone portable reçoit la qualité du signal, et « joue » de façon autonome sur les paramètres pour obtenir la meilleure communication possible. Un poste de télévision détecte les caractéristiques

essentiels de l'image, et intervient de multiples façons pour l'optimiser. Une voiture analyse l'état du moteur, et adapte la carburation pour réduire la pollution et améliorer son rendement énergétique. Dans la production et la distribution d'énergie, ils permettent de réaliser d'importants gains en efficacité et en sécurité. Dans l'aviation et le ferroviaire, ils permettent une circulation plus sûre, plus dense, et moins coûteuse à l'exploitation. Dans tous les secteurs de l'économie et de la société, ils améliorent grandement les activités existantes, ou en créent de nouvelles.

Nous considérons que l'utilisation étendue des systèmes embarqués, dans des produits courants, est une évolution majeure pour les technologies et la science de l'informatique.

Repenser l'ingénierie

Voilà une dizaine d'années, le nombre d'applications restait très limité, les processeurs à vocation généraliste

mots-clés

électronique, informatique, recherche et développement

étant les plus courants. Ces derniers étaient réservés aux applications critiques (spatial, avionique, ferroviaire, usines de production), pour des raisons de coûts et de temps de développement.

Aujourd'hui, la généralisation des systèmes embarqués dans les produits de masse modifie les contraintes de leur ingénierie. Les applications se situent en majorité dans l'électronique grand public (téléphonie mobile, automobile, hifi/vidéo, etc.), qui doit répondre à des exigences techniques et économiques, et à des niveaux de service différents selon le segment de marché visé.

Des contraintes appelées à devenir de plus en plus sévères, alors que, dans le même temps, les coûts et les délais se réduisent. Il faudra, par exemple, disposer de techniques d'ingénierie permettant d'estimer les coûts en fonction des choix de conception conjointe logiciel-matériel.

L'ingénierie devra aussi pouvoir facilement intégrer des composants fortement hétérogènes, parfois dans un milieu compétitif. L'enjeu est d'obtenir une coopération harmonieuse entre les systèmes, pour fournir des services globaux. Ce qui complique singulièrement la tâche des développeurs qui doivent prendre simultanément en compte un nombre important d'exigences techniques.

^[1] Du laboratoire Verimag. Article extrait de la revue *Ingénieurs INPG*, octobre 2005.

L'INPG, pièce maîtresse du « pôle mondial de compétitivité » grenoblois

Avec le pôle Minalogic, Grenoble est bien positionné sur le marché des systèmes embarqués. Fort de ses laboratoires de recherche et de sa formation, l'INP de Grenoble en devient un acteur majeur.

« L'Institut national polytechnique de Grenoble accueille chaque année plus de 5 200 étudiants. Fédérant 11 formations d'ingénieur, où la recherche est fortement liée à la formation, l'INP Grenoble compte 38 laboratoires, 9 structures fédératives de recherche, un Collège des Masters et études

doctorales. Il représente aujourd'hui, avec 1 100 nouveaux ingénieurs diplômés par an, le 1^{er} pôle français de formation d'ingénieurs. » (Extrait du site internet de l'INPG)

Coordonnées :

Institut national polytechnique de Grenoble
46, avenue Félix-Viallet
38031 Grenoble Cedex 1
Tél. : 04 76 57 45 00 – Fax : 04 76 57 45 92
Site internet : www.inpg.fr/



Des exigences multiples parfois antagonistes

Quelles sont ces exigences ? En premier lieu, la plupart des systèmes embarqués remplissent des fonctionnalités dites critiques qui peuvent concerner la sûreté des personnes, des biens, des services, et qui rejettent sur la santé économique des sociétés qui les mettent en œuvre. Ainsi, le trafic aérien et ferroviaire, les télécommunications, ou la distribution d'énergie, dépendent aussi du fonctionnement optimal de leurs systèmes embarqués.

Autre contrainte : la réactivité vis-à-vis de leur environnement, avec la notion de temps réel. Dans ces systèmes, une réponse trop tardive équivaut à une réponse erronée. Exemples : l'airbag doit s'ouvrir à l'instant t , le contrôleur de machine de fabrication doit suivre la cadence.

L'autonomie constitue également une exigence forte. Ce qui explique la très grande complexité, en particulier en ce qui concerne leur validation. On compte pas moins d'un million de lignes de code dans un simple téléphone portable.

Ajoutez à cela la capacité à gérer des qualités « extra-fonctionnelles », souvent en conflit les unes avec les autres : qualité du service rendu, sécurité, fiabilité, performance et optimisation des ressources (consommation d'énergie, bande passante de communication, charge de calcul, sécurité, taille/poids, etc.). Leur prise en compte peut varier selon le marché visé.

La performance concerne les aspects dynamiques du comportement du système, tels que vitesse, gigue (*jitter*), efficacité, temps de réponse, temps de latence, etc. La fiabilité englobe la sûreté, la sécurité, la disponibilité, la réparabilité, et toute autre propriété assurant la capacité du système à fournir un service en présence de fautes, erreurs, surcharge ou incident susceptibles de perturber son fonctionnement nominal. Il s'agit aussi de répondre aux contraintes d'implémentation physique, liées à la consommation de ressources et au contexte de déploiement : poids, taille physique, résistance aux vibrations

ou aux irradiations, etc. Il s'avère essentiel d'utiliser au mieux les ressources disponibles, soit pour minimiser les coûts (par exemple, la mémoire) soit pour améliorer l'autonomie (par exemple, en réduisant la consommation d'énergie). Restent l'adéquation du produit à un marché cible et son délai de mise à disposition auprès du consommateur.

Une discipline à part entière

On comprend mieux le besoin de techniques de conception capables de traiter conjointement toutes ces exigences. Voilà pourquoi nous plaïdons pour que les systèmes embarqués



1 L'aéronautique est une grande utilisatrice de systèmes embarqués

© AIRBUS S.A.S.

deviennent une discipline à part entière, réunissant des compétences de l'informatique, de l'électronique, de l'automatique, de l'architecture des systèmes, des mathématiques.

Actuellement, nous ne disposons ni de méthodes ni d'outils permettant d'englober toutes ces contraintes. Le développement de telles approches soulève des problèmes fondamentaux, à l'origine d'une théorie émergente rapprochant l'informatique et la physique.

L'informatique prend en compte des modèles de calcul fondés sur des notions abstraites de machines (par exemple : automates, algorithmes, théorie de la complexité et de la calculabilité, etc.), ignorant les propriétés physiques du calcul (temps d'exécution, retards, latence, etc.). De ce point de vue, le logiciel reste abstrait et se caractérise par des propriétés fonctionnelles. Il n'existe pas de théorie unifiée permettant de prédire le comportement d'un logiciel pour

Les priorités de recherche

La prise de conscience des défis et des enjeux se traduit à plusieurs niveaux :

→ **À l'échelle européenne**, la mise en place de la plate-forme technologique européenne (*European technology platform*) Artemis (www.cordis.lu/ist/artemis/) réunit les principaux acteurs industriels et académiques en Europe, pour définir des grandes lignes de travail et de coopération.

→ **Au niveau national**, les systèmes embarqués figurent parmi les priorités de plusieurs pôles de compétitivité, et font également partie des priorités du programme RNTL (www.telecom.gouv.fr/rntl/).

→ **La région Rhône-Alpes** occupe une place majeure en ce domaine, avec la présence d'acteurs tels que STMicroelectronics, le CEA-Léti, et des activités de recherche de visibilité mondiale à l'Inria, aux laboratoires LSR, Tima et Verimag. Le rôle de leader européen de Grenoble est attesté par la coordination de deux réseaux européens : le réseau européen EuroSoC coordonné par Tima, et le réseau européen d'excellence Artist2 coordonné par Verimag (www.artist-embedded.org/FP6/).

Le pôle de compétitivité grenoblois Minalogic (Micro-nanotechnologies et logiciel Grenoble-Isère compétitivité), un des six pôles français récemment labellisés « pôles mondiaux de compétitivité », a pour ambition de construire un centre de dimension internationale pour les puces miniaturisées intelligentes grâce à la mise en commun de moyens issus à la fois de l'industrie, de la recherche et de la formation en micro-nanotechnologies et technologies du logiciel.

une plate-forme d'exécution donnée. Cette dernière détermine la vitesse d'exécution, et les autres propriétés dynamiques de l'application.

Nous avons besoin d'un cadre théorique unifiant les concepts de calcul

et les propriétés dynamiques héritées du système d'exécution sous-jacent. Son absence lance un défi scientifique majeur, et demeure un obstacle à l'émergence de méthodes de développement rigoureuses et intégrées.

Un enjeu stratégique pour les économies modernes

En 2010, chaque habitant de la Terre devrait être équipé en moyenne de trois appareils de type système embarqué.

Ces derniers tirent la croissance des technologies de l'information et de la communication. Bien placée dans de nombreux secteurs, l'Europe demeure trop timide en matière d'investissements.

Qu'est-ce qui crée la valeur d'un produit ou d'un service de masse ? Réponse : ses fonctionnalités nouvelles et/ou son rapport qualité-coût. En ce sens, les systèmes embarqués deviennent stratégiques pour les économies modernes, en générant une valeur ajoutée et en améliorant la compétitivité. Dans cet ensemble, le poids économique du logiciel augmente constamment. C'est lui qui procure de nouveaux services et permet de différencier les produits.

Le moteur de la croissance des TIC

Avec une progression estimée à 10,3 % par an jusqu'en 2011, les technologies de l'embarqué constituent le premier secteur de croissance des technologies de l'information et de la communication (TIC). En 2003, le marché des appareils embarqués atteignait 8 milliards de pièces par an. Pour 2010, on prévoit que ce nombre aura doublé, soit en moyenne trois appareils par terrien.

Dans le secteur de l'automobile, les équipements embarqués représentent 22 % du coût global d'un véhicule. Ce pourcentage devrait osciller entre 33 et 40 % en 2010. Depuis vingt ans, 70 % des innovations dans ce domaine sont attribuées aux technologies de l'embarqué. Exemple, un véhicule équipé d'un appareil de contrôle de stabilité réduira son risque d'accident de 35 %.

L'Europe bien placée

L'Europe est en position de force dans l'avionique civile, la technologie *fly-by-wire* (commandes actionnées entièrement par voie électronique) fournissant un avantage compétitif décisif pour le coût d'exploitation des avions. Le Vieux Continent est également bien placé dans le secteur spatial pour les véhicules de lancement et pour les satellites. Dans l'automobile, les fabricants européens et leurs fournisseurs bénéficient d'un avantage technologique dans le contrôle de moteur, le freinage et la

1 Des marquages au sol

En amont d'une zone à risque particulier (150 m d'un stop, 50 m d'une sortie d'école, 150 m d'un virage dangereux), une série de bandes blanches transversales est peinte au sol. L'espacement variable entre les bandes détermine un code lu par le véhicule.

15 cm 45 cm

2 Des capteurs sous le véhicule

Des capteurs à infrarouges implantés derrière le pare-chocs avant effectuent une lecture des marquages transversaux. Le faisceau infrarouge émis par le véhicule est réfléchi par la route. Surface sombre = pas de détection
Surface claire = détection

3 Le conducteur alerté

La lecture du code à barres déclenche un processus d'alerte, gradué en fonction du risque. Ici : bip sonore, pictogrammes au tableau de bord, message vocal, vibration de la pédale d'accélérateur et avertisseur sonore extérieur.

4 Réaction du conducteur

Averti par le véhicule du danger et de la distance qui l'en sépare, le conducteur (ainsi que les usagers alentour éventuellement) peut adapter son comportement à temps.

**Les systèmes embarqués devraient envahir la vie quotidienne.**

Ainsi, ils pourraient représenter 40 % du coût d'une automobile en 2010, contre 22 % aujourd'hui

conduite contrôlés par voie électronique (*brake-by-wire* et *drive-by-wire*). La signalisation ferroviaire européenne dépend des systèmes embarqués, qui permettent un trafic plus rapide, plus dense, et plus sûr. Ces technologies seront largement utilisées pour rendre la distribution de l'énergie plus flexible, alors que le marché se libéralise. Elles s'avèrent stratégiques pour le secteur européen des télécommunications, qui

reste encore bien positionné, malgré les difficultés pour le déploiement de l'UMTS. Enfin, l'Europe tire également son épingle du jeu dans les services distribués par voie électronique — banque, santé, formation — utilisant des cartes à puce et autres technologies connexes.

Les enjeux sont tels qu'ils mobilisent les principaux programmes de recherche dans le monde. Difficile de

disposer de chiffres précis sur l'importance des systèmes embarqués dans la R&D. Mais, en moyenne, la part des investissements européens dans les TIC reste loin derrière l'objectif des 3 % du PIB, fixé à la conférence de Lisbonne. Seule la Suède atteint un niveau comparable à celui des États-Unis : autour de 5,2 %. ➔