

# L'automobile du futur

Aujourd'hui, la part de l'électronique embarquée dans le coût total d'une automobile est de l'ordre de 20 à 25 %. Il atteint 35 % pour les véhicules haut de gamme équipés d'un système de guidage. Certaines valeurs publiées il y a seulement cinq ans sont donc d'ores et déjà obsolètes. On prévoyait alors une part de 15 % pour l'électronique embarquée à l'horizon 2000.

Dans les années 1970, l'électronique embarquée a vécu une mini-révolution. Du tout analogique, on est entré progressivement dans l'ère du numérique. Mais qu'entend-on par électronique embarquée ? Ce terme vaut aussi bien pour les avions et satellites que pour les automobiles, voire pour les téléphones portables ou les équipements audio et vidéo. Il exprime simplement que ces objets en déplacement contiennent des équipements électroniques, dont le volume et la consommation ont été minimisés.

Grâce aux progrès de l'électronique, on allait pouvoir transposer en numérique des calculs jusque-là réalisés en analogique. Parallèlement, des travaux théoriques ont permis d'écrire sous forme discrète (numérique) certains calculs qui étaient auparavant écrits sous forme continue (analogique). Exemple typique : la fameuse transformée de Fourier, qui permet de passer de la représentation temporelle d'une fonction à sa représentation fréquentielle, a été remplacée par la transformée de Fourier discrète, dont on a pu tirer une version optimisée pour les puissances de 2, la FFT (Fast Fourier Transform). L'un des avantages du numérique par rapport à l'analogique est de conduire à une bien meilleure maîtrise de la fiabilité

des systèmes (mise au point simplifiée, robustesse aux bruits, pannes moins fréquentes) et d'en abaisser le coût, notamment grâce à la simulation sur ordinateur.

Par ailleurs, une telle évolution ouvrirait tout naturellement la voie à l'usage des calculateurs, qui a peu à peu remplacé l'électronique numérique non programmable dans l'électronique embarquée. Mais ce qui a véritablement permis à celle-ci de «décoller», c'est l'arrivée des microprocesseurs et, dans les années 1980, des premiers processeurs de traitement du signal, ces derniers étant dotés d'instructions adaptées au calcul intensif en temps réel. Les équipements électroniques allaient devenir de plus en plus performants et miniaturisés, offrant la possibilité de réaliser des fonctionnalités essentiellement programmables toujours plus complexes.

En septembre 1998, un projet national pour la définition de l'architecture électronique embarquée a été lancé par le Ministère de l'Industrie. Outre les constructeurs automobiles PSA et Renault, l'Aérospatiale, les équipementiers Sagem, Siemens et Valeo, ce projet comprend également les laboratoires de recherche : INRIA, LORIA INPL, IRCyN. Il a pour but de concevoir et valider un processus rapide et sûr pour la définition de l'Architecture Système



**Sujet:** L'automobile du futur.

**Verbe:** Ne plus conduire.

**Complément:** Les recherches menées à l'INRIA dans le domaine de l'électronique embarquée, et notamment dans le secteur de l'automobile, permettent de faire un état des lieux assez précis des apports de l'informatique embarquée.

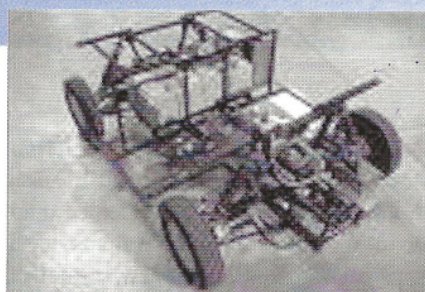
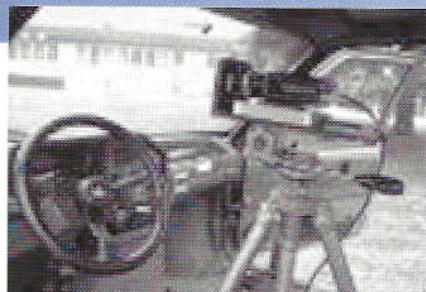
et le développement des logiciels associés embarqués. Ce processus est fondé sur l'indépendance entre matériel et logiciel, sur l'utilisation de méthodes, outils et composants standards, et sur la contractualisation des échanges entre les acteurs. Ce projet vise les applications de transport, notamment l'automobile.

## Petit abrégé d'électronique embarquée dans l'automobile

Le principal objectif de l'électronique embarquée est de contrôler les divers organes de l'automobile. Et cela depuis les plus simples, comme la gestion des essuie-glaces, des clignotants ou de la climatisation, jusqu'aux plus complexes comme le groupe moto-propulseur (moteur et boîte de vitesse). Dans ce dernier cas, l'objectif est de contrôler le fonctionnement du moteur (injection, régime), en fonction du rapport de vitesse, afin de réduire la consommation de carburant et de limiter les émissions polluantes. Autres exemples d'organes complexes : le freinage, les sacs gonflables, les suspensions...

Mais les ambitions des constructeurs automobiles vont désormais au-delà. La voiture du futur sera en effet équipée d'organes d'aide à la conduite. Ces derniers viseront, soit à assurer une meilleure sécurité, soit à garantir un meilleur confort dans la conduite. Pour la sécurité, il s'agit par exemple de systèmes de détection d'obstacles associés à un système d'aide à la décision pour le conducteur. Exemple schématique :





un capteur, de type caméra ou radar, reçoit des informations (telle que la présence d'un camion arrêté sur la voie), et il les transmet, éventuellement après un prétraitement analogique ou numérique, à un microprocesseur. Celui-ci est programmé pour, ou donner directement un ordre à l'organe de freinage, ou bien prévenir le conducteur qui actionnera lui-même le frein.

Pour le confort, des projets concernent les systèmes de positionnement et de choix d'itinéraires en fonction du trafic routier, voire de liaisons avec l'Internet, afin d'offrir l'accès à des informations de nature diverse (hôtels, théâtres, restaurants).

### Quatre grands défis

Jusqu'à présent, chacun de ces organes était conçu, réalisé et testé indépen-

damment des autres. Mais faire en sorte que tous les organes puissent communiquer, que leurs interactions soient parfaitement maîtrisées et contrôlées est aujourd'hui l'un des enjeux les plus importants et un premier défi pour l'INRIA. Cette problématique fait notamment l'objet de recherches dans le cadre du projet PAMPA (voir encadré).

Pour des raisons évidentes de sécurité en électronique embarquée, le deuxième défi concerne la sûreté des logiciels eux-mêmes : c'est le domaine de la sécurité de fonctionnement. Ceci nécessite d'élaborer des techniques de conception de programmes et de mise en oeuvre, qui soient fondées sur des vérifications et des preuves formelles, afin de limiter au maximum les tests et les erreurs qui apparaîtront en fonction-

nement réel. Le projet PARA s'intéresse particulièrement à ce point (voir encadré). Il faut également gérer ce que l'on appelle la «tolérance aux pannes» : les logiciels doivent être capables de réagir en cas de panne de l'un ou l'autre des éléments de l'ensemble. Cela suppose d'être capable d'identifier les différentes pannes possibles, dès la conception.

Pour des raisons d'économie relatives aux contraintes de fabrication, le troisième défi est d'optimiser le logiciel et le matériel. Cet aspect est en effet crucial en électronique embarquée, où tout doit être au maximum miniaturisé, ce qui conduit à minimiser les ressources matérielles. Si les missions essentielles concernent la partie logicielle, il est clair que son rôle ne pourra se limiter à cela. À terme, les chercheurs devront interve-

## Communication série, PC à bord



**5 ANS DE GARANTIE**

- Facilité de portage d'applications de communications MS DOS sous NT
- Support protocoles HDLC, LAPB, X25, MONO/BISYNC, asynchrone, spécifiques (NRM, AIRCAT 500, GP, STR,...)
- Drivers NT, WIN 9x, MS DOS, UNIX,...
- Débit maximum : 7 Mbits/s
- 1 à 64 voies série
- RS232, RS422, RS485, RS449, V35, V36, EIA530,...

**ACKSYS**  
COMMUNICATION ET SYSTEMES  
La communication série sans douleur

3-5, rue du Stade - B.P. 4580 - 78302 Poissy Cedex  
Tél. 01 39 11 62 81 - Fax 01 39 11 47 96  
Site web : [www.acksys.fr](http://www.acksys.fr) - E-mail : [sales@acksys.fr](mailto:sales@acksys.fr)



nir au niveau de la conception des processeurs, afin de concevoir des processeurs optimisés comportant des mécanismes de communication efficace. Il faut en effet assurer la cohérence entre la partie de l'application implantée sur ces processeurs, et celle implantée sur de l'électronique non programmable. Le projet SOSSO s'intéresse principalement à ces techniques d'optimisation aussi bien du logiciel, que du matériel (voir encadré). Enfin, pour des raisons économiques liées aux marchés, le quatrième défi, qui est en grande partie une conséquence des trois précédents, est de réduire autant que possible le cycle de développement des logiciels. Ce quatrième défi se traduit par la mise au point de méthodologies génériques, puis d'outils logiciels qui en sont la concrétisation, destinés à concevoir, à leur tour, des logiciels optimisés et sûrs répondant aux spécifications voulues.

## Un nouveau mode d'utilisation de la voiture

Au titre des réalisations dans lesquelles des équipes de recherche travaillant à l'INRIA se sont largement investies,

l'une d'entre elles a conduit à la définition d'un nouveau mode d'utilisation de la voiture : le libre-service. Ce nouveau service public de transport est basé sur l'utilisation de véhicules électriques disponibles dans des parkings qui leur sont réservés. À mi-chemin entre le taxi et le véhicule individuel, 50 Clios électriques sont maintenant disponibles en libre-service à Saint-Quentin-en-Yvelines, non loin de Paris : en quelques sites stratégiques (gare, zone de bureaux, zones résidentielles), ces véhicules électriques attendent leurs utilisateurs désireux d'effectuer un petit parcours (gare-bureau, bureau-centre commercial).

De quoi s'agit-il ? Ce nouveau concept de transport urbain s'est appuyé sur un constat : l'inefficacité avérée, en ville, de l'automobile classique. Celle-ci occupe trop d'espace (elle est en stationnement la plus grande partie du temps), sa vitesse de déplacement est limitée (encombrement du trafic), et elle transporte peu de personnes (une seule le plus souvent). À cela s'ajoutent les problèmes liés aux émissions polluantes.

Enfin, nombreux sont ceux pour qui l'accès à la voiture sera bientôt réduit, voire interdit, du fait de l'âge ou de contraintes financières (coûts d'entretien de plus en plus élevés, projets de circulation payante en ville). D'où la notion de «véhicule partagé» (il est individuel mais public), et l'idée d'un véhicule électrique doté d'une assistance à la conduite, voire d'une conduite totalement automatisée. Ce concept a été proposé dès 1991 dans le cadre d'un programme associant l'INRIA et l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS).

L'informatique embarquée intervient donc dans différents domaines. Sur le plan de la gestion de la flotte, pour commencer, qui à elle seule pose des problèmes complexes, notamment de communication, de localisation, de contrôle d'accès et de paiement. Ces problèmes ont été traités dans le cadre du programme PRAXITELE, lancé en 1993, et qui associait, outre l'INRIA et l'INRETS, Renault, CGFTE (la filiale transports publics de Vivendi), EDF et Dassault Electronique. Résultat : un démonstrateur achevé en 1995, sur la base d'une

## Projet PAMPA : Gérer la communication de systèmes répartis

À l'instar d'un grand nombre de systèmes techniques actuels (réseaux de télécommunications, réseaux de micro-ordinateurs d'un laboratoire ou d'une entreprise), la voiture d'aujourd'hui, et plus encore celle de demain, met en oeuvre une multitude de calculateurs ou de microprocesseurs (contrôle de l'injection, du pot catalytique, du système de freinage, des lève-glaces, des airbags). La cohérence de fonctionnement de l'ensemble exige, pour le moins, que la communication entre ces divers éléments soit bien établie et efficace. Celle-ci est notamment assurée par des logiciels dits «répartis» ou «distribués», en référence à la distribution des tâches entre tous ces éléments. Pour fiabiliser la conception de ces logiciels, un certain nombre d'outils et de méthodes doivent être mis au point. C'est l'un des objets du projet PAMPA, dont l'équipe est localisée à Rennes. Il s'agit d'un problème d'interaction entre plusieurs dizaines de calculateurs, qui doivent communiquer, s'échanger des données et se synchroniser. Désormais, les problèmes posés par l'électronique embarquée ressemblent donc étrangement à ceux déjà rencontrés dans les réseaux de télécommunications. Parmi ces problèmes, celui de la validité des logiciels face à des protocoles de communication complexes. En particulier, chaque microprocesseur recevant ou envoyant des messages en direction d'un ou plusieurs autres microprocesseurs, il faut gérer une combinatoire d'une grande complexité. Les cadres chercheurs du projet PAMPA travaillent sur la conception d'outils automatiques permettant d'aider aux

tâches de conception, de vérification, de génération de code et de test de programmes réels. L'un des objectifs est de mettre au point des prototypes d'outils, susceptibles d'un transfert industriel, et permettant de faire les tests automatiquement.

Depuis quelques années, les chercheurs de PAMPA transposent leur savoir-faire dans le domaine de l'automobile. C'est ainsi qu'ils participent au programme européen MODISTARC, lancé fin 1997, auquel collaborent également les chercheurs du projet SOSSO de l'INRIA, en partenariat avec les constructeurs automobiles Renault et Peugeot-PSA, ainsi que l'équipementier Dassault Electronique, coordinateur du programme. L'objectif du programme : contribuer à l'effort des industriels européens du secteur automobile pour développer une architecture normalisée (norme OSEK) des systèmes embarqués pour l'automobile.

Parallèlement, une collaboration s'est établie avec le Centre de recherches de Renault. Celle-ci porte notamment sur la mise en oeuvre chez le constructeur d'un prototype d'outil de génération de tests, baptisé TGV, et conçu par les chercheurs du projet PAMPA avec ceux du laboratoire Vérimag de Grenoble. Ce dernier est en cours de transfert industriel dans l'entreprise Verilog. L'objectif est de démontrer qu'un outil comme TGV, mis au point à l'origine pour le secteur des télécommunications, peut être utilisé pour générer des tests dans le secteur de l'automobile.



Clio électrique, et la mise en exploitation commerciale du service en 1997. On compte aujourd'hui 50 véhicules et près de six cents utilisateurs abonnés.

Autre application de l'informatique embarquée dans le cadre de PRAXITELE : le déplacement de voitures vides, de manière automatique, pour les ramener à une station par exemple. La technique développée s'appelle la conduite

«en train», qui permet de déplacer un train de voitures avec un seul conducteur. Elle s'appuie sur la conception d'un capteur spécifique et d'algorithmes de commande. Un tel capteur, implanté dans chaque voiture, permet à cette dernière, à partir des informations recueillies sur le mouvement de la voiture située devant, de régler automatiquement son accélération, son freinage

et sa direction. Un premier prototype a démontré la faisabilité de ce système en 1994.

Étape suivante : intégrer cette technologie dans un petit véhicule destiné à une utilisation en libre-service pour le parcours de petites distances. L'idée est alors d'offrir un moyen de transport motorisé pour les déplacements sur des

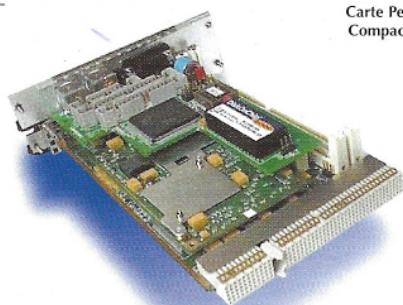
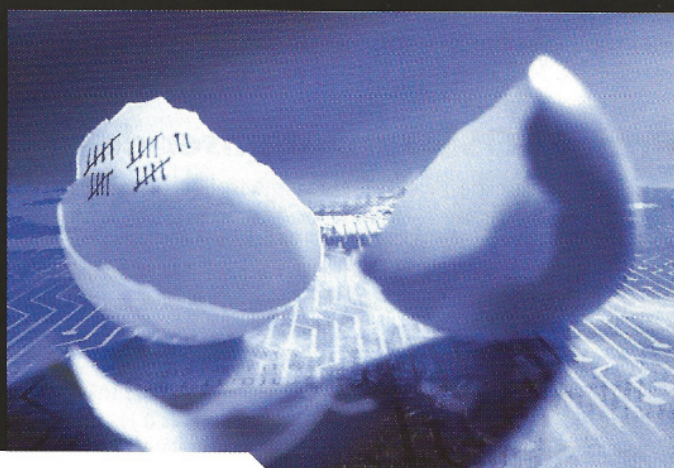
## Projet PARA : Vérifier et valider des logiciels temps réel

Les chercheurs du projet PARA ont développé un grand savoir-faire en matière d'informatique embarquée dans le secteur aérospatial, et tout particulièrement dans le cadre du programme Ariane 5. Aujourd'hui, ils ont engagé une collaboration avec un constructeur automobile. L'idée est de transposer à l'automobile certaines applications développées dans le spatial. Leur domaine de prédilection : la vérification et la validation de logiciels, notamment de logiciels temps réel critiques, c'est-à-dire des logiciels dont la défaillance aurait des conséquences catastrophiques (au plan humain ou financier). Leurs travaux s'appuient sur l'analyse statique par interprétation abstraite, une branche de l'informatique théorique : celle-ci consiste à prévoir statiquement (c'est-à-dire sans exécution) le comportement dynamique des programmes, dans le but de les optimiser mais aussi, et surtout, de les vérifier. L'un des grands avantages de l'analyse statique est d'offrir un moyen de vérifi-

cation à caractère exhaustif, contrairement à des méthodes de test plus classiques. Les applications de cette technique à la vérification sont beaucoup plus récentes que celles concernant l'optimisation. À ce titre, l'analyse du programme de vol d'Ariane 502, réalisée en 1997, représentait une première mondiale.

Il existe des points communs entre l'automobile et le spatial. Dans les deux cas, on utilise des processeurs robustes, mais de puissance moyenne : dans l'automobile, pour optimiser le coût, dans le spatial, car seuls peuvent être mis en oeuvre des processeurs «durcis», c'est-à-dire résistant aux radiations émises dans l'espace. Il en résulte que ces processeurs sont en quelque sorte suremployés. Autre point commun : il s'agit dans les deux cas de logiciels temps réel, dont les architectures sont relativement similaires.

## Gespac libère la technologie



Carte Pentium®II  
CompactPCI 3U

Mobile Module  
Pentium®II  
192MB SDRAM,  
512Kb L2  
Ethernet 100Mbit/s  
Ultra Wide SCSI,  
SVGA/AGP  
Enhanced IDE,  
floppy DiskOnChip®  
et TFFS Support  
Windows NT™,  
Windows® 95, VxWorks®,  
QNX®, pSOS®.

### LE CHEMIN EST LONG QUI VA DE LA NAISSANCE DE L'IDEE AU PRODUIT.

DEPUIS 20 ANS, GESPAC GUIDE LES IDEES IMPATIENTES ET PROMETTEUSES JUSQUE CHEZ SES CLIENTS INDUSTRIELS, LEADERS DES TRANSPORTS, DES TELECOMMUNICATIONS, DU MEDICAL, DE LA DEFENSE. ELLES Y ARRIVENT TRANSFORMEES EN CARTES ELECTRONIQUES, EN CALCULATEURS, EN SOLUTIONS PERENNES ET FIABLES. C'EST CE DEFI QUE GESPAC RELEVÉ CHAQUE FOIS QU'UNE NOUVELLE IDÉE GÉNIALE VEUT FAIRE SON CHEMIN.

- Cartes et systèmes CompactPCI
- Cartes et systèmes Custom
- Certification ISO 9001
- Présence mondiale (Europe, US, Asie)



Gespac membre  
du PCI Industrial  
Computer  
Manufacturers Group



SHAPING INNOVATIVE TECHNOLOGIES



GESPAC S.A. International: +41(22) 706 2100 - France: +33 (0) 1 69 85 33 73 - Germany: +49 (0) 6181 24052 - HTTP://WWW.GESPAC.CH



plateaux piétonniers tels que La Défense (dont la traversée équivaut à deux stations de métro). Cela a abouti, dans le cadre d'un partenariat avec EDF et la RATP, à la réalisation du CyCab, un des tout premiers véhicules entièrement pilotés par informatique. La partie mécanique en est fabriquée par le constructeur français Andruet. Toute l'électronique embarquée a été conçue et mise au point par l'INRIA, en particulier les microcontrôleurs qui contrôlent chaque organe du véhicule (moteur, roues, freins).

Dans sa première version, le CyCab est conduit au moyen d'un joystick : celui-ci transmet les intentions du conducteur (tourner à gauche, à droite) à l'ordinateur de bord, lequel exécute les ordres de manière sécurisée. Le premier prototype a été présenté en juin 1997. L'Université de Nanyang à Singapour a passé commande de trois CyCab, commercialisés par la société Robosoft. Six véhicules seront achetés par l'INRIA en tant que plate-forme d'intégration et de tests pour continuer le développement. À terme, l'objectif est le «tout automatique» : l'utilisateur annoncera sa destination, et le véhicule exécutera l'ordre automatiquement. Ce sera la deuxième version.

## Vers l'automobile communicante...

Mais d'ores et déjà, les chercheurs de l'INRIA voient encore plus loin. Ils réfléchissent entre autres sur le concept de «multimédia embarqué», qui intéresse sérieusement les constructeurs automobiles, y compris pour les voitures privées. On dispose de technologies permettant de stocker un gros volume d'informations, de technologies capables de les afficher sous forme d'écrans graphiques, ainsi que de moyens de communication numérique performants. Des techniques de guidage, s'appuyant sur un copilote électronique, ont déjà vu le jour. L'information temps réel, sur le trafic notamment, commence à être opérationnelle. Pour le reste, l'imagination est au pouvoir : demain, le conducteur du futur réservera peut-être ses places de cinéma, d'hôtel ou de restaurant assis au volant de sa voiture !

## Et la route automatisée

Au-delà même de l'évolution des performances du véhicule, des laboratoires français comme l'INRIA, L'INRETS, l'Ecole des Mines de Paris et le Laboratoire central des Ponts et Chaussées

sont impliqués dans des projets d'assistance à la conduite portant à la fois sur le véhicule et l'infrastructure.

Il est envisageable de concevoir de nouvelles infrastructures routières, réservées à de nouveaux véhicules équipés de systèmes de conduite automatique. À long terme (30 ans ?), une telle rupture technologique pourrait permettre aux voitures de doubler leur vitesse moyenne en toute sécurité (200 km/h), avec des débits pouvant être multipliés par 5 (10 000 véhicules/heure) sur des infrastructures beaucoup plus légères et s'insérant mieux dans l'environnement. Un grand programme de R&D français qui associe ces chercheurs se prépare pour développer et expérimenter les nouvelles technologies pour le transport routier. Un laboratoire regroupant ces organismes de recherche va s'ouvrir en Mars 1999 sur le site de Satory à Versailles. Il disposera de pistes d'essai. ■

INRIA

Coordinateur INRIA pour  
l'électronique embarquée :  
Yves Sorel - Tél. : 01 39 63 52 60

Action de développement LaRA :  
Michel Parent - Tél. : 01 39 63 55 93

## Projet SOSSO : Optimiser de manière globale matériel et logiciel

L'optimisation de l'électronique embarquée distribuée est l'un des axes de recherche du projet SOSSO. Dans ce cadre, l'objectif est de spécifier et d'optimiser conjointement le logiciel et le matériel (co-design) afin de garantir leur cohérence tout au long du cycle de développement, depuis la conception jusqu'à la réalisation.

Pour le logiciel, cette stratégie consiste à spécifier les algorithmes en exhibant leur parallélisme potentiel, et à les coder à l'aide d'un langage de programmation adéquat, afin d'effectuer des vérifications formelles et des simulations. Pour le matériel, elle se traduit par la spécification des architectures, comme des réseaux de composants programmables (processeurs) et/ou non programmables (circuits intégrés spécialisés), interconnectés par des médias de communication. Réaliser un système électronique embarqué, c'est effectuer l'implantation du logiciel sur le matériel, de telle sorte que les programmes puissent s'exécuter, tout en respectant un certain nombre de contraintes. L'une d'entre elles est la nécessité d'une exécution en temps réel de ces programmes, ce qui représente une difficulté essentielle. Autres contraintes : le volume et la consommation du matériel, qui doivent être réduits au minimum.

Les chercheurs du projet SOSSO ont mis au point une méthodologie, baptisée «Adéquation Algorithmes-Architecture» (AAA), qui permet d'optimiser la conception et la réalisation

d'un système électronique embarqué. Et cela au niveau d'un système complet, c'est-à-dire, dans l'automobile, pour l'ensemble des organes concernés. Optimiser, cela signifie minimiser le nombre de lignes de code, le nombre de composants matériels utilisés, et aussi le temps de développement du système lui-même. La méthodologie en question s'appuie sur des modèles formels pour spécifier, vérifier, optimiser. Elle utilise également des techniques de génération automatique de code, particulièrement efficaces pour supporter correctement la communication et la synchronisation entre les différents microprocesseurs et circuits spécialisés. Un logiciel de CAO niveau système, baptisé SynDex, permet de mettre en oeuvre cette méthodologie. Il sert à concevoir et à réaliser des systèmes d'électronique embarquée optimisés selon un cycle de développement très court. Autre préoccupation du projet SOSSO, liée à la précédente : la conception de microcontrôleurs bien adaptés à l'utilisation en réseau, pour répondre aux besoins spécifiques de l'automobile. L'objectif étant toujours cette approche globale, à la fois du matériel et du logiciel, l'optimisation visée ici par les chercheurs du projet SOSSO s'applique également à l'échelle d'un microprocesseur, en y intégrant directement des mécanismes de gestion des synchronisations et des communications entre les processeurs. Enfin, à plus long terme, l'idée est de concevoir simultanément les capteurs et les actionneurs analogiques (par exemple capteurs CCD de vision), en même temps que les composants numériques.