

Technologies numériques : une révolution au quotidien

Joseph Sifakis

Les Mardis de Descartes

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Mardi, 8 avril 2008

- Monsieur le Président de l'Assemblée Nationale
- Madame la Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche,
- Monsieur le Ministre chargé de la Prospective, de l'évaluation des politiques publiques et du développement de l'économie numérique,
- Monsieur le président de la CNIL,
- Mesdames et Messieurs les députés et les sénateurs.

C'est un grand honneur et un grand plaisir pour moi d'être aujourd'hui parmi vous et d'intervenir sur le thème des technologies du numérique et de leur impact.

J'essayerai à travers cette présentation d'esquisser les principales étapes de l'évolution des technologies numériques en mettant l'accent sur les systèmes embarqués. Je soulignerai leur importance économique, leur impact dans la vie de tous les jours avant de présenter des défis sous-jacents.

L'évolution de l'Informatique

L'Informatique est une discipline jeune. Ses fondements théoriques ont été élaborés juste avant la Seconde Guerre mondiale. Son évolution est très fortement liée aux applications et au développement de l'électronique ce qui explique que son périmètre et son champ d'application n'ont cessé de s'élargir au cours des soixante dernières années. Initialement science du calcul scientifique, l'Informatique a été propulsée par les programmes de développement d'armement.

- Dans les années 70, les ordinateurs trouvent une large utilisation dans les applications commerciales et l'administration. Apparaissent également les microprocesseurs qui réunissent sur une puce toutes les fonctionnalités d'un processeur. Commence alors une course vers la miniaturisation des composants électroniques qui permet de doubler les capacités de calcul des puces tous les deux ans (Loi de Moore). Cette croissance exponentielle des capacités de calcul des puces se maintiendra encore pendant au moins dix ans.

- Les années 80 sont caractérisées par l'utilisation des réseaux d'ordinateurs ce qui permet le rapprochement entre les sciences et technologies de l'information et les télécommunications (les STIC). Apparaissent également la souris, Windows et les interfaces graphiques.
- Les années 1990 voient le développement de l'internet et du web, qui donne accès aux technologies du numérique au plus grand nombre. Le concept de la « société de l'information » apparaît.
- Enfin, depuis le début des années 2000, une deuxième révolution parallèle, moins visible, mais avec des incidences plus importantes à long terme, a lieu : celle des systèmes embarqués. A terme, la révolution des systèmes embarqués rejoindra celle du web, comme je vais l'expliquer par la suite.

Il est important de prendre la mesure de cette révolution du numérique, et d'anticiper les changements sur le plan technologique, économique et sociétal, afin de bien préparer l'avenir.

Les systèmes embarqués

Qu'est ce que c'est ?

Un système embarqué est un composant électronique exécutant un logiciel qui est enfoui dans un appareil, par exemple avion, automobile, train, appareil photo, appareil électroménager, téléphone portable, compteur électrique, appareil médical, etc.

Plus de 95% des puces produites aujourd'hui sont embarquées. Leur utilisation étendue dans tous les produits courants est une évolution majeure pour les STIC.

Enjeux économiques

Les systèmes embarqués sont d'une importance stratégique pour les économies modernes. Ils intéressent de près les développeurs de systèmes et de services, car ils peuvent améliorer leur compétitivité et générer de la valeur ajoutée. Le logiciel embarqué prend une part de plus en plus importante par rapport au matériel : on peut différencier les produits en implantant sur le même matériel des fonctionnalités différentes.

Par exemple, grâce aux technologies embarquées, il est possible d'optimiser la consommation d'essence dans une voiture en fonction de l'état du moteur. Il est également possible d'améliorer la sécurité et le confort des passagers, avec des systèmes d'airbag plus fiables et performants, et avec le freinage assisté. Dans une voiture haut de gamme, nous avons aujourd'hui plus de 80 processeurs distincts pour gérer ces différentes fonctionnalités nouvelles qui permettent aux constructeurs de gagner des parts de marché.

L'Europe occupe actuellement des positions fortes dans le transport ferroviaire, l'avionique, l'automobile, l'espace, l'électronique grand public, les cartes à puce, les appareils de télécommunication, la distribution intelligente d'énergie. La compétitivité dans ces secteurs dépend de plus en plus de la capacité à innover en utilisant des technologies embarquées. Il est donc essentiel que l'Europe s'impose comme un leader dans les technologies embarquées – et je pense qu'elle est actuellement bien placée pour réussir.

Une rupture dans l'évolution des STIC

Les systèmes embarqués marquent une rupture importante dans les STIC, car ils doivent satisfaire simultanément des exigences techniques et économiques qui soulèvent des défis scientifiques extraordinaires. Ils doivent être,

- Réactifs : Il peut arriver que les programmes de votre ordinateur ne répondent pas à vos commandes – par contre les logiciels d'un pilote automatique d'un avion doivent réagir dans des délais prédéterminés pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil.
- Autonomes : Votre ordinateur peut se bloquer intempestivement ce qui nécessite votre intervention pour le redémarrer. Les systèmes embarqués doivent assurer un service continu sans intervention humaine ainsi qu'une gestion intelligente de ressources telles que l'énergie, la mémoire, et le temps de calcul.
- Robustes : Les logiciels sont vulnérables aux virus et leur fonctionnement peut être interrompu par des pannes matérielles ou des erreurs d'exécution du logiciel. Les systèmes embarqués doivent résister aux défaillances du matériel et aux erreurs du logiciel (sûreté), ainsi qu'à des attaques malveillantes de toutes sortes (sécurité).

A ces exigences techniques s'ajoutent des exigences économiques et de marché. Les systèmes embarqués sont le plus souvent des produits de masse. Lors de leur conception, ils doivent aussi répondre à des critères d'optimalité économique. Le défi est de fournir des produits au meilleur rapport prix /qualité (en termes de performance et robustesse).

Les technologies embarquées marquent une rupture par rapport aux technologies traditionnelles. En effet, les technologies traditionnelles ne sont pas suffisamment fiables, sont inutilement complexes et font une mauvaise utilisation de leurs ressources, notamment elles sont gourmandes en consommation d'énergie ce qui est prohibitif pour des applications autonomes.

Pour répondre aux exigences des technologies embarquées, il faut un effort sans précédent en R&D pour enrichir l'Informatique avec de nouveaux concepts et paradigmes et pour changer radicalement les méthodes de programmation et de conception des systèmes.

Limitations de l'état de l'art et défis scientifique et technologique

L'Informatique ne dispose pas aujourd'hui de bases théoriques pour la construction de systèmes similaires à celles des autres disciplines scientifiques. On construit actuellement les systèmes complexes de façon empirique, comme on bâtissait les cathédrales au Moyen Age. La conception d'un système complexe, par exemple d'un microprocesseur, nécessite la collaboration de milliers d'ingénieurs – pour un résultat qui n'est pas toujours garanti.

Aujourd'hui sur 100 projets de développement de grands systèmes, 30 échouent complètement, 40 échouent partiellement et seulement 30 atteignent leurs objectifs. Les exigences spécifiques de réactivité, d'autonomie et de robustesse accentuent ces difficultés.

Ce qui amène à des interrogations sur l'état de l'art aujourd'hui.

Il y a actuellement un fossé entre

1. D'une part, le progrès spectaculaire de l'électronique
2. Et d'autre part, l'absence de fondements théoriques, méthodes et outils pour fabriquer des systèmes embarqués satisfaisant les exigences de réactivité, d'autonomie, de robustesse et de marché.

Les technologies de l'électronique progressent beaucoup plus vite que nos connaissances scientifiques et techniques en matière de conception, notamment dans deux directions :

- La miniaturisation des systèmes par les nanotechnologies multipliera les capacités de calcul et permettra peut-être de faire la jonction entre l'Informatique, la biologie moléculaire et les sciences du vivant.
- L'utilisation de réseaux, des télécommunications, notamment des communications sans fil ouvrent des possibilités inégalables de connectivité entre systèmes fixes et/ou mobiles.

Nous disposons déjà des composants électroniques dont nous ne savons exploiter qu'une partie infime de leurs capacités.

Quel est l'état de l'art en ingénierie des systèmes informatiques aujourd'hui ?

Systèmes critiques

D'une part, nous savons développer des systèmes très fiables mais d'une complexité moyenne et à des coûts importants. Ce sont des systèmes que l'on appelle critiques car leur défaillance peut avoir des conséquences catastrophiques. Par exemple, les systèmes critiques d'Airbus ou le système de conduite automatique de la ligne 14 du métro, accusent des coûts de développement importants. De même, il serait

techniquement possible de construire des voitures plus sûres, par exemple avec des équipements de sécurité dotés de technologies de l'avionique (brake-by-wire, drive-by-wire), mais leur coût de fabrication les excluraient immédiatement du marché.

Systemes « best effort » (meilleur effort)

D'autre part, nous savons bâtir des systèmes de type « best effort » comme par exemple les systèmes de télécommunication, les réseaux et le web qui sont d'une robustesse acceptable mais qui ne garantissent pas la disponibilité et la continuité du service.

Quelle est la vision pour demain ?

Pour demain il faut avoir des systèmes critiques moins chers pour pouvoir vaincre les verrous que pose leur utilisation dans le transport, la médecine, la gestion des infrastructures critiques (contrôle du trafic aérien).

Mais le grand défi est d'être en mesure de construire des « systèmes de systèmes » c'est-à-dire intégrer des systèmes de nature différente qui coopèrent harmonieusement. Un obstacle majeur non encore résolu, est la coopération entre systèmes critiques et non critiques. Les pannes des systèmes non critiques peuvent « contaminer » les systèmes critiques en les rendant vulnérables. Par exemple, pour gérer mon compte bancaire ou mon dossier médical avec mon téléphone portable il faut des garanties sur la sécurité (confidentialité) des systèmes qui ne sont pas acquises aujourd'hui.

La liste des applications possibles est longue, donc je me limiterai à donner quelques exemples illustratifs.

Le transport

Les systèmes embarqués trouveront une encore plus large application dans les appareils de transport. Il y a actuellement une multitude de projets pour rendre les moyens de transport plus sûrs, moins polluants et plus économiques. Les projets les plus ambitieux sont ceux visant une « sécurité active », c'est-à-dire où des systèmes embarqués sont utilisés pour assister le conducteur dans des situations difficiles (brake-by-wire, drive-by-wire).

Outre-Atlantique, des projets américains comme PATH pour des autoroutes automatiques (sans conducteur) ont montré leur faisabilité à l'état de maquette, mais il reste encore beaucoup à faire pour pouvoir les réaliser.

La médecine

Les technologies embarquées sont très largement appliquées en médecine et les métiers de la santé.

Dans un avenir très proche, on pourra assurer le suivi à distance d'un patient en utilisant ce que l'on appelle un Assistant Médical à Distance qui est un système d'acquisition, de transmission et de traitement d'informations médicales, intégrant des instruments de mesure ou d'observation par ex. tensiomètre, thermomètre, électrocardiographe. L'Assistant Médical à Distance est utilisé par le patient ou un infirmier, pour réaliser des examens et les transmettre au terminal fixe ou mobile du médecin traitant. Il permettra le suivi régulier de patients éloignés de leur médecin par ex. en milieu rural.

Les technologies embarquées seront largement utilisées en chirurgie assistée par ordinateur pour permettre une précision et une sécurité inégalée dans certains actes chirurgicaux, et en imagerie médicale pour explorer d'une façon non intrusive le corps humain et comprendre son fonctionnement, notamment l'organisation des fonctions du cerveau et des processus cognitifs.

Enfin, la convergence entre des nanotechnologies, biotechnologies, technologies embarquées et sciences cognitives suscite beaucoup d'espoirs sur l'amélioration des performances de l'homme à travers la rencontre entre l'intelligence humaine et l'intelligence des machines.

Les réseaux de capteurs intelligents

Les réseaux de capteurs intelligents est une technologie qui trouvera de nombreuses applications. Ce sont des réseaux de puces avec capteurs et émetteur radio qui déployés sur un terrain (largage par un avion), peuvent s'organiser et coopérer de façon autonome pour collecter des données ou contrôler leur environnement. Cette technologie initialement développée aux Etats-Unis pour des applications militaires (surveillance du territoire), peut être utilisée en agriculture (irrigation automatique intelligente), détection d'incendies de forêts, gestion intelligente d'énergie, gestion des marchandises (RFID), et gestion de la production.

Vers l'intégration des technologies embarquées et du WEB

Enfin, dans un avenir peut-être pas très lointain nous aurons une convergence des technologies embarquées et du web. Certains utilisent le terme « Internet des Objets » ("Internet of Things") pour décrire l'ensemble des technologies permettant à Internet d'atteindre le monde des objets physiques. L'idée est d'utiliser le réseau pour connecter et rendre accessible toute sorte d'appareils et d'objets. On pourra en cliquant sur des liens avoir un accès interactif non seulement à des documents multimédia mais également à des appareils (électroménager, médical, de mesure et de surveillance, de production). La réalisation de cet objectif nécessite le développement de normes et d'infrastructures logicielles fiables et réactives.

Les défis

Recherche et enseignement

Recherche fondamentale

J'ai déjà souligné que les défis technologiques soulèvent des problèmes fondamentaux difficiles. Il s'agit d'enrichir l'Informatique avec des paradigmes et concepts qui viennent du génie électrique et de l'automatique. Cette synthèse interdisciplinaire doit permettre de prendre en compte les caractéristiques physiques des matériels et des environnements lors de la conception des systèmes embarqués. Pour atteindre cet objectif, il faut un effort considérable et soutenu en recherche fondamentale mobilisant des chercheurs de qualité.

Recherche fondamentale vs. Ingénierie vs. Recherche technologique

Au cours des 50 dernières années, les conditions de production des connaissances en Informatique ont changé d'une façon spectaculaire. Nous sommes passés d'une production artisanale à une production quasi-industrielle. Ce que l'on appelle la R&D est le résultat de l'étroite interaction entre trois types de recherche :

- La recherche fondamentale qui explore les fondements de l'Informatique et produit les connaissances de base ;
- L'ingénierie qui utilise les connaissances de base pour développer des méthodes de conception des systèmes - comment construire des systèmes répondant à des exigences données ? ;
- La recherche technologique qui met l'accent sur la mise en œuvre efficace des méthodes de conception en produisant des outils d'aide à la conception et des composants pour un domaine d'application donné.

Dans ce processus du fondamental vers l'appliqué, de nouveaux problèmes apparaissent. Se crée ainsi une dynamique multiplicatrice, un cercle vertueux impliquant ces trois types de recherche. Le dilemme bien connu « recherche fondamentale ou recherche appliquée » n'a plus de sens. On peut difficilement imaginer des progrès en recherche fondamentale coupée de problèmes pratiques.

Les grands établissements technologiques américains (MIT, Berkeley) ont implémenté avec beaucoup de succès ce couplage entre les différents types de recherche. Ils ont été capables de réunir masse critique et excellence pour couvrir tout le spectre des activités en R&D. Ils se sont dotés de dispositifs pour le transfert à travers des startups et des laboratoires mixtes.

Performance, qualité, culture des résultats

Nous manquons cruellement en France et en Europe de grands centres technologiques. Il faut reconnaître que des initiatives comme la mise en place de

Pôles de compétitivité, l'opération campus, le rapprochement Université/Organismes de recherche et l'autonomie des universités, sont des mesures qui vont dans le bon sens. Il en est de même pour des initiatives au niveau européen comme la mise en place de l'EIT (European Institute of Technology) et des plateformes technologiques européennes. Il reste toutefois beaucoup à faire.

Malheureusement, les débats sur la recherche portent sur le quantitatif (crédits, nombre de postes) et ne mettent pas suffisamment l'accent sur la performance et la qualité. Les moyens mobilisés doivent être en cohérence avec les résultats concrets à atteindre et une vision à long terme.

Le système actuel n'est pas suffisamment performant : gouvernance non adaptée, morcèlement des crédits de recherche, lourdeurs administratives.

Les métiers de chercheur et d'enseignant-chercheur ne sont pas suffisamment attractifs. Nous ne sommes pas en mesure d'attirer les meilleurs étudiants et chercheurs étrangers (niveau des salaires, problème de langue). Par ailleurs, les étudiants français les plus brillants sont plutôt attirés par la finance et les services que par les métiers d'ingénieur et de chercheur.

L'amélioration de la performance - c'est-à-dire de l'efficacité dans l'utilisation des ressources - et de la qualité des chercheurs, enseignants-chercheurs et étudiants doit être un objectif prioritaire.

Enfin, Il faut réorganiser la recherche française pour la rendre plus concentrée sur de véritables choix stratégiques, plus performante et plus accessible par le monde économique.

L'industrie

Quels sont les points forts et les avantages de l'Europe dans la course aux technologies embarquées ?

- L'Europe et la France en particulier, ont des positions fortes dans des secteurs industriels qui ont besoin des technologies de l'embarqué pour leur développement. Donc il y a un marché potentiel important et suffisant pour soutenir l'effort en R&D nécessaire et la valorisation.
- Actuellement, les Institutions européennes et les états membres de l'UE, soutiennent la recherche précompétitive sur les systèmes embarqués par un effort qui n'a pas d'équivalent ailleurs. Je citerai la plate-forme Artemis, initiative européenne pour la R&D précompétitive à hauteur de 1110 M€ dont 410M€ de la Commission et 700M€ des états membres pendant la période 2008-13. Par ailleurs, plusieurs pôles de compétitivité mettent les systèmes embarqués au cœur de leur programme (Systema@tic, AerospaceValley, Mindlogic).

- Nous avons des ingénieurs de qualité et des développeurs de systèmes avec une solide culture en ingénierie système, et un large spectre de compétences en matériel et logiciel.

Quels sont les faiblesses et les obstacles possibles dans la course aux technologies embarqués ?

- Le potentiel pour l'innovation en France est moindre par rapport aux Etats Unis mais aussi par rapport à l'Allemagne et les pays scandinaves, malgré une augmentation des moyens pour des projets collaboratifs nationaux et européens. Nous n'avons pas suffisamment de projets finalisés entre laboratoires et industrie couvrant les phases aval du transfert. La part de la recherche technologique dans la R&D en France, est faible. J'espère que la mise en place des Instituts Carnot nous permettra de surmonter ce handicap. Enfin, j'aimerais signaler que l'industrie européenne cherche souvent les idées innovantes auprès des centres technologiques outre-Atlantique alors qu'elles peuvent être disponibles en Europe et en France.
- Un enjeu important est la maîtrise des normes qui sont essentielles pour l'interconnexion et l'interopérabilité des systèmes. Sans rentrer dans les détails, je dirai que les Américains ont un rôle prépondérant dans les normes pour l'ingénierie logicielle et dans des technologies réseaux non spécifiques. L'Europe est en bonne position dans les normes pour l'automobile et le ferroviaire. Pour des domaines comme les télécommunications, les applications médicales chaque région Amérique, Europe, Asie a des normes spécifiques.

Actuellement les technologies embarquées sont très fragmentées : elles sont spécifiques à des domaines d'applications. Cette fragmentation « protège » actuellement les industries qui sont intégrées verticalement : on conçoit tout du circuit au logiciel. L'application des normes permettra une unification et généricité des technologies ainsi que l'émergence des marchés. Par exemple, l'industrie automobile et l'avionique pourraient partager les technologies des systèmes critiques (composants, outils). Toutefois, l'utilisation des normes ne nous sera bénéfique qu'à deux conditions :

- 1) Nous avons le leadership dans leur définition pour privilégier des choix technologiques que nous maîtrisons
- 2) Nous sommes en mesure de développer et commercialiser les outils et les composants d'aide à la conception des systèmes selon les normes. Le développement des outils et composants se fera par des éditeurs d'outils dont la plupart sont actuellement américains – avec deux exceptions notables (Dassault-systèmes et SAP). Les éditeurs d'outils américains contrôlent les technologies d'aide à la conception des puces et des logiciels. Ils sont prêts à conquérir le terrain dès que les conditions seront

favorables. Depuis au moins deux décennies, on les ont systématiquement achetés et cannibalisés la plupart des startups et des entreprises de technologie européennes. Il est urgent de créer un écosystème qui protège nos entreprises innovantes des prédateurs de tout genre, par exemple utilisation de capitaux souverains. L'Europe doit se mobiliser pour créer une industrie du logiciel pour les systèmes embarqués faute de quoi elle perdra à terme ses positions fortes.

Conclusions

J'ai déjà souligné l'importance économique des technologies de l'embarqué dans les sociétés modernes.

J'ai également parlé de la rupture entre STIC actuelles et les technologies embarquées. Cette rupture est une grande occasion pour l'Europe qui a besoin de ces technologies pour préserver ses positions dans l'ensemble des secteurs économiques.

A mon avis, les conditions nous sont très favorables pour un leadership Européen en technologies embarquées à côté des Etats-Unis forts en technologies traditionnelles et de l'Asie forte en composants électroniques. Nous avons des positions industrielles solides, un excellent savoir-faire en conception des systèmes, des ressources humaines et des compétences, et enfin ce qui est le plus important, le marché. Notre réussite est surtout une question de volonté politique et de mobilisation de tous les acteurs du domaine autour d'objectifs concrets, réalistes et ambitieux.

Enfin, j'aimerais dire deux mots sur l'impact sociétal. La convergence entre les technologies du web et les technologies de l'embarqué aura un impact grandissant sur l'organisation du travail, les loisirs, le partage et la production des connaissances. Leur utilisation au service du progrès économique et social est un vaste problème et doit être l'objet d'un débat politique.

Il est important que ce débat soit mené dans la clarté pour déterminer des voies qui respectent nos valeurs fondamentales sans compromettre nos chances de rester des acteurs importants dans cette révolution scientifique et technique. La lutte contre la prolifération des sites au contenu douteux voire inacceptable, le piratage et les actes de malveillance ne doivent pas conduire à des mesures qui remettent en cause le principe de l'accès libre au web et aux connaissances globales, et surtout ne doivent pas porter atteinte aux libertés individuelles.

Les scientifiques et les intellectuels doivent contribuer à la clarification des débats publics en y apportant leur expertise et leur vision.

Pour terminer, je tiens à remercier Valérie Pecresse, Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, pour m'avoir donné l'occasion de m'exprimer sur ce sujet.

Merci pour votre attention.