

Des composants électroniques toujours plus petits et performants

Les progrès spectaculaires réalisés, depuis cinquante ans en matière de microélectronique ne sont pas arrivés à leur terme : non seulement les progrès continuent sur l'axe « classique » de la miniaturisation, mais de nouveaux progrès, considérables, sont désormais possibles dans de nouveaux champs technologiques et, par voie de conséquence, dans de nouveaux champs d'application.

par **Laurent GOUZENES***

La microélectronique a complètement révolutionné notre quotidien, ces vingt dernières années, avec la généralisation du micro-ordinateur (PC), du téléphone portable et des réseaux de communication, qui ont permis, à leur tour, la généralisation de l'Internet, de l'*e-mail* et des services web, ainsi que l'émergence de nouveaux réseaux sociaux. Technologie invisible, bien qu'omniprésente, la microélectronique recèle encore de nombreux facteurs de progrès, dont nous pouvons attendre encore de profondes révolutions.

TECHNOLOGIES

La loi de Moore reste valide

Les progrès technologiques accomplis en matière de composants microélectroniques suivent, depuis cinquante ans, une série de lois exponentielles, dont la plus connue est la loi de Moore, qui pose le principe du doublement, tous les deux ans, du nombre de transistors présents sur une puce. Formidable coïncidence technologique : la miniaturisation de ces composants permet d'en réduire, dans les mêmes proportions, la

consommation électrique par unité de calcul et le prix, alors que la vitesse de calcul augmente également dans les mêmes proportions : de nos jours, une carte à puce peut disposer, dans un volume d'un cm³, de la même puissance que celle d'un Superordinateur Cray des années 80 et, cela, pour une puissance électrique inférieure à un watt ! (voir figure 1).

Cette miniaturisation a permis une extension du spectre des calculateurs avec, d'un côté, l'apparition des supercalculateurs pétaflopiques, constitués de millions d'éléments semblables interconnectés et, de l'autre, des microcontrôleurs, qui ont envahi notre quotidien, dans les télécommandes, les cartes à puce, les téléviseurs ou les téléphones mobiles. La réduction de la consommation énergétique de tous ces systèmes, et ce, quelle que soit leur taille, est devenue un facteur clé de leurs performances finales.

Cette miniaturisation a conduit à une complexité colossale des puces : des mémoires à 16 milliards de bits, ou encore des processeurs à 1 milliard de transistors, sont dès maintenant disponibles (à comparer à la complexité d'une voiture, composée en moyenne de 5 000 éléments ou à celle d'un avion de ligne, avec ses 30 millions de pièces...).

* Directeur des affaires publiques et programmes européens
STMicroelectronics.

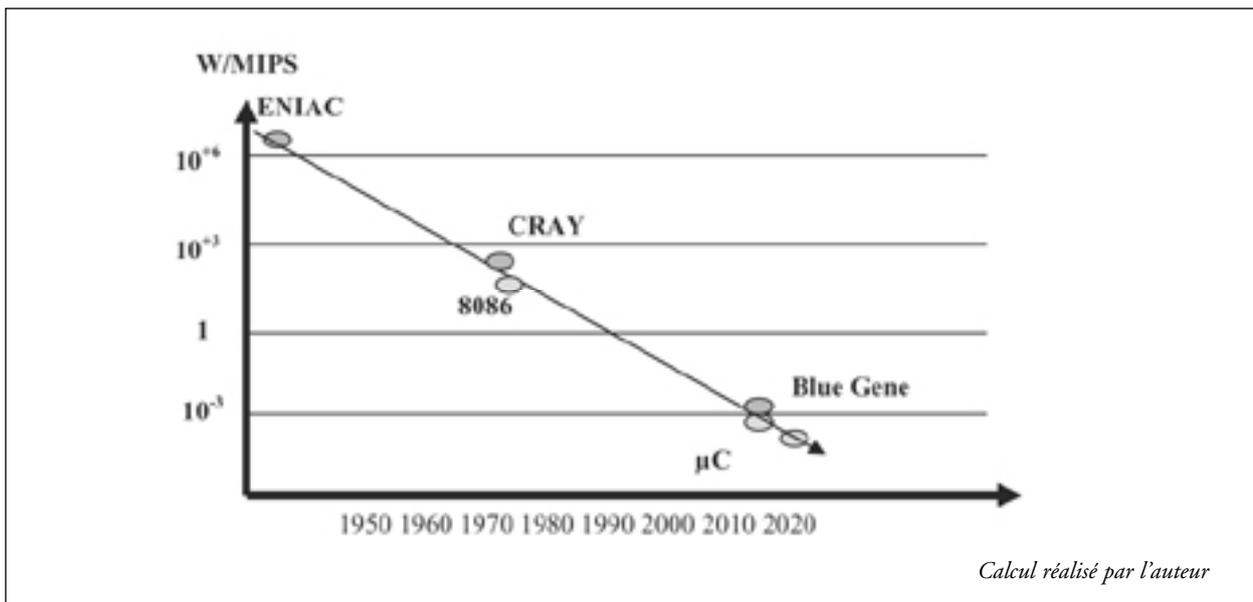


Figure 1. La puissance consommée par unité de calcul baisse d'un facteur 1 000 tous les 15 ans (soit - 60 % par an).

La visibilité technologique donnée aujourd'hui par la *roadmap* de l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) – un document de synthèse et de prévision technologiques réalisé par plusieurs milliers d'experts – va jusqu'à une finesse de gravure de 22 nanomètres (nm), alors que les productions les plus avancées en 2008 avaient une finesse de 45 nm, la majorité de la production se situant, encore, dans des technologies supérieures aux 130 nm. Le fonctionnement d'un transistor est démontré jusqu'à la taille minimale de 6 nm.

Les technologies utilisées dans les puces sont de plus en plus variées, que l'on parle de calcul (haute performance ou basse consommation), de mémoire (volatile ou non) de fréquences (d'une dizaine de MHz à plusieurs GHz).

Cette complexité physique des puces se double d'une question, majeure, d'organisation : les puces contiennent des architectures de plus en plus complexes ; elles sont composées de plusieurs *bus*, de processeurs généralistes et de sous-calculateurs spécialisés, de multiples systèmes d'entrée/sortie, etc. Elles embarquent des millions de codes de logiciel : systèmes d'exploitation, logiciels applicatifs, *drivers*, protocoles de communication, interfaces homme/machine et machine/machine. Nous n'en sommes encore qu'aux débuts de cette révolution des architectures complexes pour le calcul.

Par leur complexité, les composants sont, non seulement, devenus des systèmes à part entière, mais également des systèmes hypercomplexes, ce qui pose, là encore, de formidables défis :

- en matière de conception : comment concevoir de tels systèmes ? Comment écrire leurs spécifications ? Comment optimiser leur architecture, en prenant en compte le couple matériel/logiciel ? Comment en garantir le bon fonctionnement, qu'il soit nominal ou exceptionnel ?...

- en matière de tests : comment les tester ? Quelle logique de test ? Quelles machines adopter ? Quelle optimisation pour les coûts ?...

- en matière de fabrication : l'approche des limites de la matière physique (un transistor de 22 nm est constitué de plusieurs couches d'une épaisseur de 1 à 2 nm) génère de nombreux problèmes inédits, qu'ils soient physiques (quasi-impossibilité, sur un circuit complexe, de ne pas avoir d'atomes non désirés dans des couches critiques, la dispersion relative des procédés augmentant avec la miniaturisation), voire logiques, pouvant aller jusqu'à un changement complet de paradigme en matière de conception et de programmation. Dans de telles conditions, comment garantir le fonctionnement normal et la continuité de service d'un système structurellement imparfait ?

Les nouvelles dimensions technologiques

Les évolutions technologiques possibles dépassent largement le simple calcul, la mémoire ou les communications, comme évoqué plus haut. De fait, la maîtrise des procédés de la micro-ingénierie, des micro-matériaux et de la fabrication de micro- et nano-objets, ouvre des champs technologiques nouveaux au silicium, ainsi qu'aux autres corps semi-conducteurs :

- la conversion photon/électron permet la fabrication, d'une part, des micro-caméras à très faible coût que l'on retrouve aujourd'hui à des centaines de millions d'exemplaires dans les téléphones mobiles et les webcams et, d'autre part, des capteurs d'énergie photovoltaïque ;

- la conversion électron/photon laisse augurer une véritable révolution dans le domaine de l'éclairage, en permettant un rendement lumineux (lumen/watt)

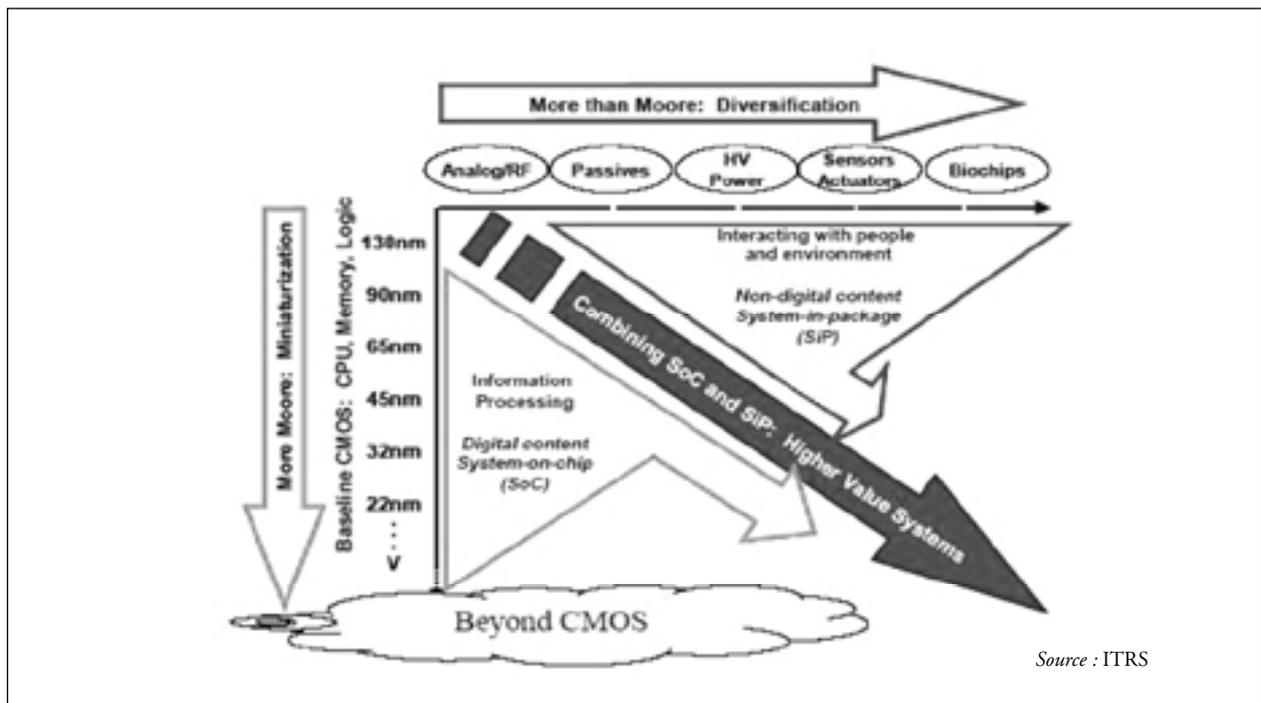


Figure 2.

multiplié par 5, par rapport à celui d'une ampoule à incandescence ;

- les capteurs miniaturisés de mouvement ont, par exemple, révolutionné l'industrie des jeux vidéo (la console Wii) et les films de synthèse ;
- les capteurs chimiques, basés sur le principe d'une molécule (ou d'un ensemble de molécules) greffée sur un transistor, dont les performances électriques varient lorsque se produit une réaction chimique avec une autre molécule (comme, par exemple, les « puces ADN ») ;
- les capteurs de pression ;
- les actionneurs en tous genres : micro-fluidiques (têtes d'imprimantes à jet d'encre, micro-laboratoires d'analyse, etc.), micro-allumeurs (airbags)...

Alors que la loi de Moore s'exprime sur une dimension linéaire et digitale, ces nouvelles technologies s'expriment, quant à elles, dans un espace combinatoire, multidimensionnel et analogique, et offrent, ainsi, des possibilités nouvelles en nombre quasi illimité, ce que traduit le jeu de mots « *more than Moore* » (« Encore (bien) plus que la loi de Moore ! ») (voir figure 2).

Enfin, il faut rappeler (mais nous en reparlerons plus loin) la capacité du silicium à contrôler les électrons, non seulement pour le traitement de l'information, mais aussi pour le contrôle de l'énergie, ce qui était d'ailleurs son premier usage : amplification d'un signal (utilisé dans les amplificateurs), filtrage ou redressement d'un courant (diodes, etc.).

Le développement du *packaging*

Le *packaging* (mise en boîtier) a longtemps été le parent pauvre des développements techniques fondés sur le

silicium, car il s'appuyait sur des technologies traditionnelles (soudage de fils électriques, moulage du plastique et emboutissage du métal), peu intéressantes aux yeux des électroniciens.

Or, ces technologies sont aujourd'hui en plein essor, d'une part, parce que les performances des puces sont de plus en plus étroitement liées à celles de leur boîtier, mais aussi, d'autre part, parce que la recherche de systèmes toujours plus miniaturisés implique l'invention de nouvelles architectures.

L'empilement vertical, consistant à assembler plusieurs puces directement les unes sur les autres, permet de densifier considérablement le système. Ainsi, par exemple, le capteur de pression des pneus d'automobile doit pouvoir transmettre la donnée qu'il mesure au calculateur de sécurité de la voiture et, ce, dans un environnement minimal. La modularité de systèmes tels que les téléphones, reposant sur plusieurs puces, découle non pas d'une obligation technique, mais d'une optimisation des coûts de fabrication des puces en silicium. Par conséquent, la capacité d'assembler ces puces de la façon la plus compacte possible, en les amincissant et en les empilant, est une solution technologique privilégiée.

L'assemblage de puces en 3D pose d'abord des problèmes thermiques « classiques » : il faut, en effet, dissiper la chaleur produite par les différents composants. Plus novatrices sont les technologies d'interconnexion 3D, qui permettent aux puces d'échanger des signaux entre elles :

- l'interconnexion bord à bord, utilisant des entrées/sorties placées sur le pourtour de puces empilées, est la plus ancienne ;
- il est également possible de coller deux puces face à face, en prévoyant des plots d'interconnexion sur toute

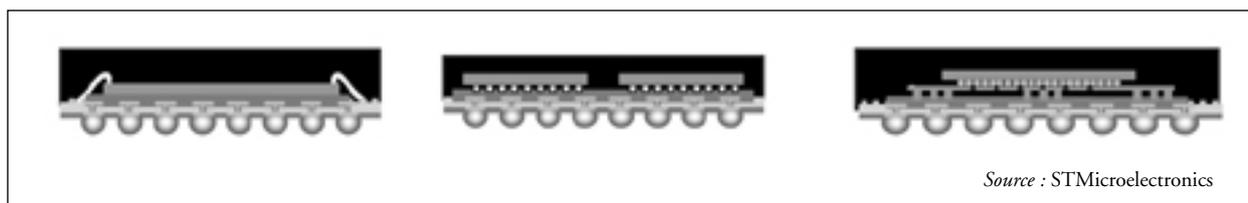


Figure 3. Evolution du packaging.

leur surface, ce qui multiplie d'autant les connexions possibles ;

- enfin, le perçage des puces par des plots verticaux permet d'acheminer le signal à travers la couche de silicium.

Dans le cadre des microsystèmes et des autres technologies « *more than Moore* », le *packaging* devient un élément essentiel : il doit, en effet, répondre, de surcroît, aux sollicitations mécaniques, chimiques, optiques, etc.

Pour illustrer ce point, nous rappellerons simplement qu'en une trentaine d'années (de 1980 à 2009), les caméras vidéo sont passées d'un volume minimal de 2 dm³ à quelques mm³.

LES APPLICATIONS

Les applications des composants silicium sont maintenant tellement nombreuses qu'il devient impossible de les lister *in extenso*.

On assiste à deux grandes convergences :

- la convergence numérique, qui permet de relier tous les types d'appareils aux réseaux d'information ;
- la convergence énergie/numérique, qui permet un contrôle intelligent de l'énergie.

La convergence numérique est d'ores et déjà acquise : on peut lire un livre, regarder une vidéo, stocker et transmettre des informations, jouer, téléphoner... sur toute une gamme d'appareils, allant du PC au téléphone mobile, en passant par la *set-top-box* de salon, avec des différenciations fonctionnelles qui s'estompent rapidement. La tendance, en matière d'applications, est à la multiplication du nombre des objets ainsi interconnectés, en tout premier lieu, la voiture, mais aussi, dans un proche avenir, tous les autres objets de la vie courante non encore informatisés aujourd'hui. Par exemple, le basculement de la chaîne HI-FI traditionnelle vers la chaîne HI-FI branchée directement sur le web ou sur le PC domestique est en cours (avec une certaine lenteur, attribuable à l'effet de base installée). Mais ce sont surtout tous les objets de notre vie quotidienne, que ce soit à la maison, dans la rue ou au travail, que nous verrons, demain, interconnectés : par exemple, quoi de plus facile, demain, dans un embouteillage, de visualiser les rues voisines grâce aux webcams de rue, ou de visualiser l'intérieur de son frigo depuis un téléphone portable, ou encore, dans le domaine de la santé, de transmettre en temps réel des données médicales captées par des instruments embarqués pour le suivi de patients dans un état critique ? Alors qu'aujourd'hui, on

recense moins d'une dizaine d'objets interconnectés par individu, on en arrivera – demain – à une centaine d'objets communicants..., qui interagiront aussi entre eux : par exemple, un panneau routier enverra un message d'alerte aux véhicules de passage. Mais le revers de la médaille, c'est la multiplication des opportunités de propagation de virus ou autres parasites informatiques, avec des risques systémiques (danger de blocage de l'ensemble !).

La seconde convergence est la convergence énergie/numérique. Le but essentiel est le contrôle intelligent de l'énergie, qui s'insère dans un besoin sociétal global d'optimisation de l'énergie et de lutte contre le réchauffement climatique. Le concept *SmartGrid* (réseau électrique intelligent) consiste à recenser, en permanence, l'état des ressources (production et stockage) et des besoins en matière d'énergie, afin de trouver la meilleure adéquation possible entre les deux. Mais il ne suffit pas d'analyser et d'anticiper les besoins d'un côté, et de mesurer et recenser précisément les ressources de l'autre : il faut résoudre des conflits ou des impossibilités : gérer des allocations variables ou des priorités (par exemple, éteindre le four ou le frigo, la machine à laver ou la télévision, ou vendre l'énergie stockée dans la batterie domestique au réseau...). Chaque appareil va devenir programmable et « intelligent », et chaque foyer pourra (devra ?) optimiser ses réglages énergétiques : des protocoles de dialogue très spécifiques seront nécessaires.

CONCLUSION

Tous les progrès technologiques visent à relever des défis, tels que la création de nouvelles fonctions, la diminution des prix, de la consommation énergétique, des volumes des objets ou, encore, l'amélioration des réseaux d'information, de leur fiabilité, de la continuité de service des communications, de l'interface utilisateur, de la rapidité de mise sur le marché des nouvelles applications...

La divergence – exponentielle – des technologies ne peut que susciter une explosion d'applications et de services nouveaux, qui contribueront à la résolution des grandes problématiques sociétales auxquelles nous sommes confrontés, comme la santé, le réchauffement climatique, l'énergie, les transports et la sécurité.