

La micro et la nano-électronique

La miniaturisation continue des transistors depuis quarante ans a mené la microélectronique à l'échelle du nanomètre-: la nanoélectronique est née-! Les formidables défis scientifiques et technologiques justifient des programmes de recherche de plus en plus internationalisés. Mais les enjeux économiques sont également devenus majeurs, tant pour les entreprises que pour les États, et justifient une attention toute particulière aux plans scientifique et financier.

**par Laurent Gouzenès,
Directeur du Plan
et Programmes d'Etude
STMicroelectronics**

Introduction

Les produits électroniques nous accompagnent au quotidien-: téléviseurs, téléphones mobiles, ordinateurs, cartes à puce, etc., de même que les services qui s'y rattachent-: chaînes de télévision et publicité, entreprises de télécommunications, fournisseurs d'accès, services bancaires... La chaîne de valeur de l'électronique est devenue une part incontournable de l'économie mondiale-moderne-: le marché mondial des semi-conducteurs s'élève à 220-mil-

liards de dollars (Mds\$), celui des produits électroniques à 1-100-Mds\$ et le marché plus large des services engendrés par ces technologies à 5-000 Mds\$ (pour un PNB mondial d'environ 50-000-Mds\$). Inexistant voilà dix ans, le marché de la téléphonie mobile représentait déjà, en 2003, 380-Mds\$-: le double du transport aérien-!

La clef de cette omniprésence et de cette importance économique réside dans la technologie des circuits intégrés et des transistors. En 2004, environ 400 milliards de composants discrets (ou circuits intégrés) ont été fabriqués, représentant un total de plusieurs centaines de millions de milliards de transistors, l'élément fondamental des technologies de l'information.

Après presque soixante ans d'existence, le transistor, dispositif physique issu de principes liés à la mécanique quantique et à l'électromagnétisme, a transformé fondamentalement nos façons de communiquer, de commercer, de chercher, de nous distraire, de percevoir et comprendre notre monde et notre environnement. Pourtant son histoire n'est pas achevée-: des centaines de milliers de chercheurs, physiciens, chimistes, informaticiens et mathématiciens du monde entier cherchent encore à améliorer ses performances et usages pour permettre de nouvelles applications et développer de nouveaux marchés de produits et services.

Défis technologiques exceptionnels et enjeux économiques-mondiaux sont la marque de cette industrie particulière.

Un peu d'histoire

L'histoire du transistor et du circuit intégré est récente-: le transistor a été inventé en 1947 par une équipe des laboratoires Bell (ses concepteurs, John

Bardeen, Walter Brattain et William Shockley recevront le Prix Nobel de Physique en 1951). L'élucidation de son fonctionnement repose sur une base scientifique bien établie (l'électromagnétisme) et une science récente-: la mécanique quantique. Grâce à une configuration très spécifique de sa structure électronique, le matériau n'est ni isolant (électrons bloqués), ni conducteur/métallique (électrons libres), il est semi-conducteur-: une portion minime des électrons permet la conduction électrique. Quant au transistor, sa principale fonction est de pouvoir contrôler un courant ou une tension élevée à partir d'un courant ou d'une tension faible-: c'est un amplificateur de signal. Pour donner des ordres de grandeur, les performances de cette technologie originelle sont de l'ordre du MHz pour la vitesse de commutation, et d'un cm^3 en volume par transistor. Cette invention de base permet déjà la réalisation de la fameuse radio à transistors, qui possède l'immense avantage sur les radios à lampes de l'époque d'être opérationnelle immédiatement et de consommer beaucoup moins d'électricité. La réalisation de systèmes électroniques est alors obtenue par l'assemblage de composants discrets individuels. A l'époque, l'assemblage de systèmes complexes reste coûteux et difficile à réaliser.

En 1958, Jack Kilby, chercheur chez Texas Instruments (Prix Nobel 2000), inaugure une autre révolution technologique fondamentale, avec l'invention du premier circuit intégré (4 transistors) et, surtout, la fabrication en parallèle de transistors et de circuits, en une seule étape.

L'industrie entre alors dans l'ère de la miniaturisation. La physique sous-jacente permet l'application d'une recette magique, car tous les paramètres évoluent simultanément dans la bonne

direction: si l'on sait faire plus petit, on sait faire plus complexe, moins cher et plus rapide, tout en consommant moins d'énergie.

Depuis quarante-cinq ans, le progrès dans la miniaturisation est constant: tous les 10 ans, les transistors deviennent 10 fois plus petits. On en assemble donc 100-fois plus sur la même surface, le prix ainsi que la consommation sont divisés par 100 (Cf. schéma 1). Aujourd'hui, on fabrique des transistors de 90 nanomètres (nm), assemblés à raison de 500 millions sur une puce mémoire de 1-cm², avec une performance supérieure à 100 Ghz. Pour comprendre cette minuscule dimension, il faut réaliser que sur la surface d'un cheveu en coupe (~1-000-µm²), on peut loger 27 000 transistors, soit l'équivalent du processeur Intel 8086 (29 000 transistors), qui a démarré l'ère du PC. Un téléphone portable réalisé avec la technologie de 1960 occuperait le volume d'un semi-remorque.

Défis technologiques

L'objectif des technologies de l'information est de réaliser des objets technologiques interconnectables dotés de fonctionnalités de contrôle et de transformation de l'information. Pour comprendre et évaluer les capacités actuelles et futures, il faut répondre à quatre questions clés:

--quels sont les objets permettant de contrôler un courant électrique à l'échelle micro/nanométrique et comment réaliser un élément de taille nanométrique?

--Comment assembler/interconnecter des dizaines de millions (aujourd'hui), voire des milliards d'objets (demain) pour réaliser une fonction complexe?

--Comment faire fonctionner ces millions/milliards d'objets de façon cohérente pour répondre à une finalité?

--Comment concevoir des objets aussi complexes?

Le transistor est aujourd'hui le seul objet répondant à l'ensemble de ces objectifs à bas coût, à condition que la complexité soit limitée à environ 100 millions d'objets (sauf le cas

particulier des mémoires, qui ont une structure répétitive).

Le transistor et les circuits intégrés aujourd'hui

Il existe aujourd'hui beaucoup de formes et de variantes de transistors, selon les besoins: stockage de l'information (DRAM, Flash, EPROM...), calcul rapide et à faible consommation (CMOS), contrôle de puissance (bipolaire), génération de hautes fréquences (RF), photosensibles, etc. (Cf. photos 2 et 3). Les principales formes de transistors sont construites au-dessus d'un matériau très spécifique, le silicium, disposant à la fois des caractéristiques électriques et des possibilités de fabrication à l'échelle nanométrique adéquates. Bien que minuscule, un transistor est un objet extrêmement complexe. Il est réalisé à partir d'une trentaine de matériaux (voire de vide) aux caractéristiques très étudiées: électriques (isolant, conducteur, semi-conducteur), magnétiques (permittivité, etc.) et structurales (cristallin, amorphe, métallique, etc.). Les dimensions de ces diverses couches constitutives varient de 10-nm à 3, voire 2-nm (environ 5 atomes). La répétitivité de certains processus de fabrication est d'une couche atomique: les transistors sont depuis longtemps des objets nanotechnologiques.

Pour fabriquer des transistors en grand volume et de façon structurée (30 millions de transistors par circuit intégré, 300 circuits par plaquette de silicium, 300-000 plaquettes par an dans une usine), il faut maîtriser de nombreuses sciences et technologies de fabrication aux échelles micro et nanométriques (physique, chimie, métallurgie, salles blanches, gravure plasma, dépôts en phase gazeuse, lithographie, matériaux ultra-purs, etc.) et surtout disposer de capacités d'observation à la même échelle (microscopes à effet tunnel, ellipsométrie, etc.). La grande difficulté est que tous ces éléments doivent être réalisés parfaitement pour que l'ensemble fonctionne (Cf. photo 1).

Le second défi consiste à assembler les nano-objets selon une architecture

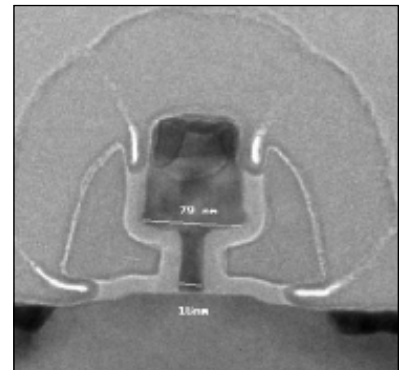


Photo 1. - La grande difficulté est que tous les éléments d'un transistor doivent être réalisés parfaitement pour que l'ensemble fonctionne (Transistor de 16

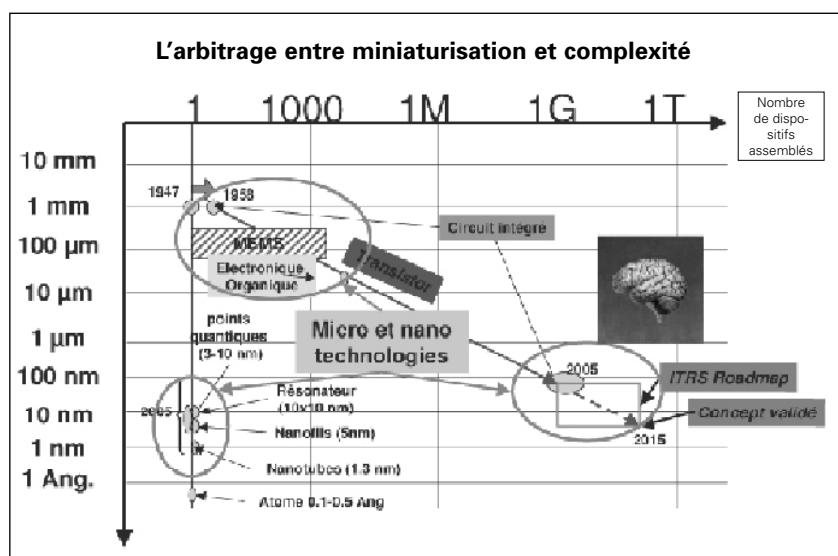


Schéma 1. - Le problème de l'assemblage coordonné d'un très grand nombre de très petits objets n'est pas maîtrisé ailleurs qu'en micro-électronique avancée. Pour le traitement de l'information, il n'y a pas d'alternative crédible sur le court et moyen termes à la microélectronique silicium.

prédéfinie, afin d'obtenir une fonction précise: mémoire, décodage d'adresses, additionneur, ou, encore plus complexe, un microprocesseur complet ou un téléphone sur puce. A titre de comparaison, la fabrication d'une voiture nécessite l'assemblage d'environ dix mille éléments et celle d'un avion de ligne, dix millions. Dix millions de composants, c'est précisément ce qui constitue une puce ordinaire, comme un circuit pour décodeur de télévision numérique ou une puce pour téléphone mobile.

La troisième difficulté consiste à synchroniser le fonctionnement des divers sous-ensembles d'un circuit intégré (processeur, mémoires, bus, unités spécialisées), en vue d'obtenir une finalité utile. Il faut intégrer les logiciels et protocoles de télécommunications, interfaces utilisateur, traitement d'images et du son, calcul temps réel, stockage d'information, sécurité de l'information. Le fonctionnement correct et optimal repose sur la connaissance détaillée de l'architecture physique du système et des délais de transmission d'information entre ses éléments: une unité de calcul d'un téléphone mobile effectue plus d'aiguillages d'information par seconde que la SNCF n'aiguille de trains en un an. Les logiciels apportent aussi une souplesse d'emploi des architectures nécessaire dans un environnement complexe. Les développements des logiciels embarqués sont aujourd'hui indissociables de la technologie matérielle.

Enfin, et pour maîtriser cette complexité croissante, la microélectronique intègre de nombreux domaines de recherche et problématiques pour développer des outils informatiques de plus en plus sophistiqués utilisés dans la conception: mathématiques (l'industrie des semi-conducteurs utilise couramment des démonstrateurs de théorèmes spécialisés pour valider les architectures, cryptographie, traitement du signal...), traitement de vastes volumes de données, simulation, outils pour la construction des architectures de circuits, etc. Un point critique est le test de ces ensembles finaux: nul n'achète un système qui ne fonctionne que partiellement ou pas-du tout. Il-faut donc développer des méthodologies et stratégies de test adaptées.

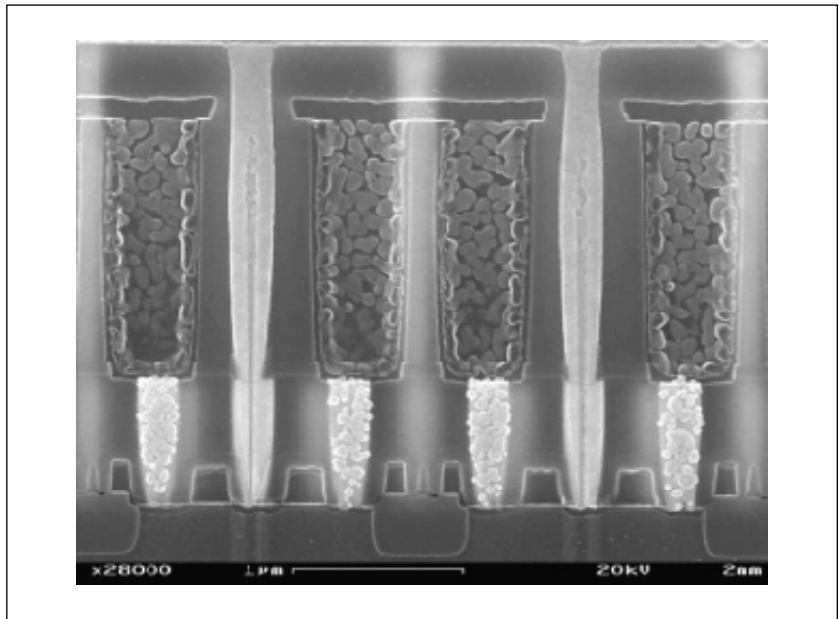


Photo 2. - Il existe aujourd'hui beaucoup de formes et de variantes de transistors, selon les besoins: les structures DRAM permettent de stocker l'information (Structure DRAM embarquée 120 nm).

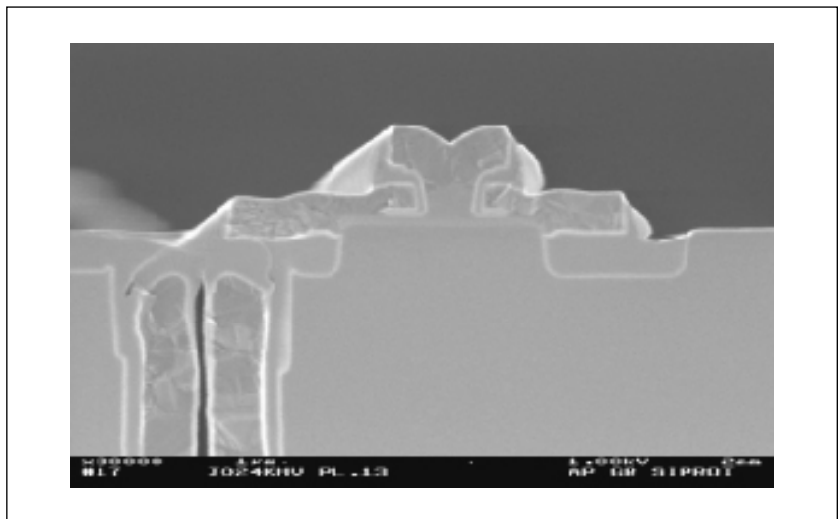


Photo 3. - Certains transistors servent à des calculs rapides, à faible consommation (Transistor BiCMOS SI-Ge).

Les évolutions technologiques à venir

Compte tenu des dimensions désormais atteintes pour le dispositif lui-même (des circuits en technologie 65 nm sont déjà disponibles sur le marché) l'appellation nanoélectronique est en train de se généraliser. Toutefois, cette appellation cache un phénomène nouveau, lié à la réduction des dimensions: des phénomènes quantiques de toutes sortes se multiplient, ainsi que les difficultés de fabrication, et vont

inciter progressivement à revisiter les bases et architectures mêmes du fonctionnement des transistors actuels. La nanoélectronique sera différente de la microélectronique.

C'est pourquoi les recherches se tournent dans trois directions:

- une amélioration des dispositifs existants, dans la lignée actuelle;
- une rupture architecturale (transistors verticaux...);
- une rupture fondamentale (nanotubes, spintronique...).

Dans les dix prochaines années, autrement dit pour les trois prochaines générations de circuits, jusqu'à des dimensions de 32 nm, il est généralement admis que ce processus de miniaturisation devrait se poursuivre sans rupture conceptuelle fondamentale, même si de nombreux et difficiles problèmes ne sont pas encore complètement résolus, et exigent d'importants changements d'architecture et de procédés. Jusque dans les années 90, le seul facteur limitatif était la technologie de photolithographie, que l'on pensait limitée à environ 1- μ m. Grâce aux progrès des lasers, des résines photosensibles, des optiques de la mécanique, des masques, des techniques d'illumination et de l'optique en immersion, on pense atteindre au moins les 32-nm. On sait aujourd'hui fabriquer individuellement des transistors bien plus petits (le record est à 8-nm) (Cf. photo 1), mais leurs performances ne sont pas satisfaisantes sur un plan pratique. Mais d'autres limites surgissent concernant les transistors (par exemple, les matériaux actuels pour l'isolant de la grille sont perméables par effet tunnel, et doivent être remplacés par des matériaux à haute permittivité), la dissipation thermique en fonctionnement (elle explose plus qu'exponentiellement avec la réduction des dimensions) ou les pertes énergétiques par fuites.

En 2010, les transistors auront des dimensions de 45 nanomètres et les mémoires Flash stockeront plus de 10-milliards d'octets: un livre sur un cheveu, c'est ce que la miniaturisation des mémoires permettra.

Un autre axe de développement très important concerne les fonctionnalités autres que les fonctions logiques, dont les performances sont directement liées à la miniaturisation. Ces progrès s'appuient sur les sciences et techniques de base développées pour les circuits intégrés, et s'enrichissent d'autres techniques et problématiques applicatives. Ces éléments se déclinent dans la direction de l'électronique très haute vitesse, comme la RF, pour obtenir des télécommunications sans fil, la photonique pour les capteurs d'image ou le photovoltaïque pour l'énergie, dans la microfluidique (têtes d'imprimantes), les microsystèmes (microac-

céléromètres), la biologie (laboratoires ADN), et bien d'autres encore à inventer (Cf. schéma-2). L'image globale si l'on compare ces potentiels à ceux de l'être humain, est qu'à côté du cerveau et de ses capacités calculatoires, on commence à savoir réaliser les organes des sens, ensemble de capteurs et d'actionneurs complétant la perception du monde externe par les objets.

Dans un futur à plus de 15 ans et pour la miniaturisation, la physique sur laquelle repose le fonctionnement du transistor actuel devra être revue en détail à cause des phénomènes quantiques prépondérants. En gardant le même principe global d'utilisation du silicium comme matériau de base, de nouvelles architectures de transistors sont à l'étude (transistors verticaux, nanotubes de carbone).

Mais d'autres innovations radicales donnent matière à recherche:-

--la spintronique, ou électronique utilisant les spins des électrons pour contrôler des courants très faibles dans les dispositifs;-

--l'électronique quantique, qui utilise les qubits (mélange quantique de 0 et 1) pour accélérer les calculs;-

--les semi-conducteurs organiques.

Ces dispositifs ne sont encore aujourd'hui que des objets de recherche. Les possibilités d'assemblage et les techniques de fabrication répétiti-

ves et fiables ne sont absolument pas maîtrisées. De façon comparative par rapport à l'ère du transistor, on n'a pas encore atteint l'année 1947. Pour ces nouvelles solutions, tout doit être, de surcroît, réinventé, en matière de conception, car il faudra revoir entièrement les méthodes de conception, d'assemblage, de simulation et redessiner les architectures. Pour les méthodes de fabrication, tous les rêves sont permis, depuis l'auto-assemblage à ADN jusqu'aux bactéries programmées.

Une des grandes orientations architecturales du futur est le multiprocesseur monopuce massif. La puce Cell d'IBM, qui équipe la prochaine génération PS3 de consoles Sony, inclut déjà 9 processeurs. L'avantage est bien sûr de fournir plus de calculs, mais aussi de les accélérer fortement, en minimisant les échanges externes hors de la puce. Il existe une marge de progression, sachant qu'un processeur 32-bits nécessite environ 100-000 transistors. L'augmentation de la puissance de calcul n'est pas qu'un gadget destiné à améliorer les ventes de microprocesseurs. L'expérience montre que chaque nouveau progrès permet l'émergence de nouvelles applications:- Internet a décollé avec l'introduction des processeurs 32-bits, le téléphone mobile a envahi nos poches dès qu'une puissance de 100-MIPS (millions d'instructions par seconde) a été disponible, le

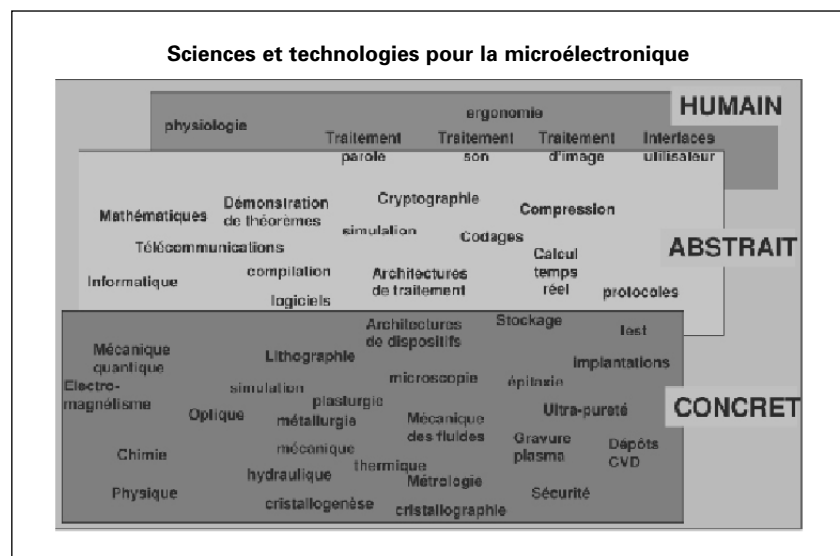


Schéma 2. - Le marché de la microélectronique comprend désormais un très grand nombre de segments, des applications les plus concrètes jusqu'à l'automatisation de certaines fonctions du cerveau.

haut-débit de l'ADSL et du VDSL repose sur une capacité toujours accrue de traitement du signal. La demande des applications reste importante: un décodeur de TVHD nécessite une puissance de traitement d'environ 50-milliards d'opérations par seconde (pour une puce à 30-dollars). Nos PC sont encore incapables de réaliser la compréhension de la parole ou la traduction de langues de façon satisfaisante; l'assemblage de nos vidéos de vacances représente toujours un travail de longue haleine; la simulation de programmes à l'échelle de la planète (météo, géologie...) bénéficie également directement de ces avancées.

Comment programmera-t-on ces systèmes sur puce capables d'incorporer des dizaines, voire des centaines, de millions de lignes de code? Quelles seront les garanties de bon fonctionnement et de résultats corrects? Comment ces systèmes résisteront-ils à une erreur matérielle ou logicielle, ou à de simples évolutions des standards de leur environnement? La solution pourrait résider dans des modules incorporant des programmes d'intelligence artificielle, dont les missions seraient d'étudier les incompatibilités diverses entre versions, de définir automatiquement des points de restauration, d'effectuer des modules de calcul redondants, de s'assurer de la cohérence entre données dans la puce et les interfaces avec le monde extérieur. A cette fin, un immense effort de recherche est nécessaire.

Un facteur limitatif dans le futur pourrait être simplement notre capacité à définir des objets «-hyper-complexes-» (de cent millions à plus d'un milliard d'éléments) et à valider leur fonctionnement lorsqu'ils seront fabriqués. La conception des éléments hyper-complexes repose sur un ensemble d'équations qui en modélisent l'architecture statique et le fonctionnement dynamique. Ce nombre d'équations croît exponentiellement (+40% par an) pour suivre le potentiel de la technologie, alors que la productivité des ingénieurs (en équations par jour) ne peut croître que très lentement (5% par an). Le développement d'un jeu de circuits pour téléphones mobiles mobilise déjà plusieurs centaines d'ingénieurs et un an de tests et validation. Avec cent fois

plus d'éléments, faudra-t-il une armée d'ingénieurs et cent ans de tests? Les systèmes hyper-complexes posent ainsi de nouveaux problèmes de coordination et de cohérence, dont la solution ne peut venir que des mathématiques et de l'informatique. De nombreux centres de recherche sont évidemment actifs dans ce domaine.

Quelles limites?

Une comparaison avec le cerveau humain montre qu'il est composé de beaucoup plus d'éléments que nous ne savons en assembler sur un circuit intégré, de l'ordre du téra-objet (1-000 milliards). Deuxièmement, le cerveau se développe en volume, tandis que les circuits intégrés sont essentiellement plats. Il existe donc une dimension à gagner correspondant à tout un nouveau champ de recherches. Enfin, le cerveau humain dispose de capacités d'apprentissage, de redondance et d'abstraction qui en font un système de traitement de l'information encore extraordinaire, avec une consommation de seulement 20-W. La nature nous montre qu'il existe donc une belle marge de progression, ainsi que des pistes de réflexion (Cf. schéma 2).

Le prix des usines de semi-conducteurs augmente de 15% par an, en raison de la complexité croissante des machines de fabrication et de métrologie. La barrière des-3-milliards de dollars (le double d'une usine automobile) est déjà dépassée et ce coût double tous les cinq ans. Les usines de nanoélectronique sont les plus chères du monde. Sans amélioration fondamentale de l'explosion du coût des procédés et usines, la limite de la nanoélectronique sera sans aucun doute financière avant d'être technologique.

Enjeux économiques et financiers

Comment financer ces importants investissements intellectuels et de production?

La progression du marché de l'électronique est liée à plusieurs facteurs :

--de plus en plus de secteurs ont besoin de ces nouvelles technologies: l'automobile intègre par exemple près de 20-% de systèmes électroniques dans son coût final de production (allumage, freinage, moteur, habitacle, sécurité, clés...). Cette proportion doublera dans les cinq prochaines années;

--de nouveaux secteurs sont régulièrement créés: ordinateurs, Internet, téléphonie mobile, appareils photo, imprimantes pour les photos numériques, etc. Les spécialistes qui fondent leurs estimations sur les expériences récentes considèrent que plus de la moitié des applications et des services constituant le cœur du marché dans dix ans n'ont pas encore été imaginés aujourd'hui;

--la part de l'électronique (matériel et logiciel) dans chaque secteur augmente (Cf. tableau 1).

Dès lors que des ordinateurs de toute taille et de toute nature remplacent et complètent les outils des peintres, des photographes et des musiciens, comme ceux des agriculteurs ou des industriels, et s'insèrent dans tous les outils simples et de grande utilisation comme dans les outils professionnels les plus complexes, il devient essentiel d'en maîtriser la technologie, qui sous-tend l'innovation et la compétitivité internationale.

Une source d'emplois

TABLEAU I
Progression de la part des composants semi-conducteurs et des logiciels dans la valeur (prix usine) des produits électroniques.

Année	1970	1980	1990	2000
Part du semiconducteur	5-%	10-%	15-%	20-%
Part du logiciel		5 %	10-%	15-%
Exemples de produits	TV couleur	Magnétoscope	PC	GSM
Taux de croissance annuel	5-%	10-%	15-%	30-%

de haut niveau

L'industrie électronique génère le type d'emplois de haut niveau essentiels pour le futur bien-être économique et social en Europe, avec une large diffusion dans pratiquement tous les secteurs. Les grandes entreprises de semi-conducteurs sont des employeurs importants: STMicroelectronics emploie près de 50-000 personnes, dont près de la moitié en Europe, Infineon, 35-000 et Philips semi-conducteurs, 32-000. Le fabricant d'équipements de lithographie ASML compte environ 5-000 employés. Ces chiffres se comparent favorablement à Intel (80-000 personnes), ou AMD (14-000, dont beaucoup en Europe). D'autres compagnies internationales, comme Atmel, IBM et Freescale (ex Motorola), avec leurs quartiers généraux hors d'Europe, ont également créé des dizaines de milliers d'emplois en Europe bénéficiant largement des aides associées, sans que l'inverse soit possible. Chez les systémiers, dont le chiffre d'affaires est généralement cinq fois plus élevé (les ventes de Samsung avoisinent 50 milliards de dollars), l'emploi suit en proportion.

La nanoélectronique et, plus généralement, les technologies de l'information offrent aux Européens l'opportunité majeure de devenir une source encore plus importante d'emplois de haute qualification. Plus largement, l'électronique et le secteur des services attachés emploient directement plus d'un million de personnes en Europe. Ce nombre devrait certainement augmenter, compte tenu de l'importance de ces secteurs pour la croissance économique. Cependant, force est de constater que sur ce secteur high-tech, l'Europe est importatrice nette de technologies (ordinateurs, matériel multimédia) et en supporte les conséquences en matière de croissance, d'emploi et de déficit commercial: le ratio production/électronique par habitant est quatre fois plus faible en Europe qu'au Japon ou en Corée, ce qui représente plusieurs millions d'emplois au final, et l'électronique est le second poste de déficit commercial après le pétrole.

La collaboration:-

un passage obligé

Les domaines de recherche sont très variés (Cf. schéma 2), et nécessitent une réelle collaboration pluridisciplinaire. Pour surmonter les immenses difficultés théoriques et pratiques auxquelles sont confrontés les industriels des circuits intégrés, de nombreuses collaborations de recherche sont organisées entre laboratoires et industriels. Plusieurs raisons expliquent cette proximité:-

--nécessité d'accélérer les transferts dans un contexte où les générations technologiques se succèdent à un rythme effréné (tous les deux ans en moyenne)-;

--nécessité de faire remonter les difficultés technologiques fondamentales vers les scientifiques pour aider à la programmation des recherches amont. Plus en aval et, de façon paradoxale, pour surmonter l'hyper-compétition du secteur, la coopération entre compétiteurs industriels est indispensable. L'association permet en effet simultanément, en additionnant les ressources intellectuelles et les moyens physiques, de disposer de l'ensemble des compétences, d'accélérer les projets et d'établir des standards *de facto* qui permettent d'ouvrir de nouveaux marchés. Les grands blocs/alliances sont le groupe «-européen-» (ST/Philips/ Motorola), le groupe «-américain-» (IBM, AMD, Infineon, Toshiba, Sony), le groupe japonais (NEC, Hitachi, Mitsubishi, Hitachi, Toshiba...), les très grandes entreprises comme Intel ou Samsung ayant une politique plus individualiste, permise par leur taille.

La compétition des pays

Les enjeux économiques et d'emplois sont très importants, qu'ils soient directs (production de matériels électroniques) ou indirects (services générés), avec de plus un fort potentiel de croissance. Aucun domaine ne peut plus se passer des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), pas plus que l'essor de la connaissance n'a pu se priver de l'imprimerie. Dans le commerce mondial, il faut cependant prendre conscience que l'échange ne peut être profitable que s'il existe des

offres compétitives de part et d'autre, et qu'une économie moderne ne peut pas se mettre durablement dans une situation où l'échange, voire l'acquisition des outils créés dans d'autres parties du monde, deviendrait impossible ou d'un coût exorbitant.

Dans ces conditions, il existe une véritable course entre pays, qui configurent leurs dispositifs de recherche de manière à soutenir leur industrie et un rythme d'innovation toujours accéléré. La recherche de l'excellence scientifique et technologique est ainsi encouragée, mais elle ne peut être utile qu'à la condition d'être efficace en matière d'innovation et développements, lorsque les liens entre recherche publique et privée fonctionnent efficacement et de façon bidirectionnelle.

La France tient un rôle particulier et globalement satisfaisant en Europe, puisque le centre de Crolles (Isère) accueille les cœurs de la recherche technologique de STMicroelectronics, Philips et Freescale (ex Motorola). Ce dispositif est complété par la collaboration de nombreux laboratoires (CEA, INRIA, CNRS) et entreprises dans les domaines de la conception et des logiciels. La nouvelle politique des pôles de compétitivité devrait permettre de renforcer ce pôle grenoblois, ainsi que le pôle parisien, principal centre complémentaire en matières de logiciels et conception. La politique des Réseaux de Recherche et Innovation Technologique, développée ces dernières années s'avère aussi un excellent outil pour le rapprochement des communautés de recherche publiques et privées. On peut cependant juger que le développement d'applications et de nouvelles architectures est relativement faible, et qu'il doit donc être renforcé (la création de l'ANR, regroupant les RRIT, comme les pôles de compétitivité, peuvent contribuer à ce renforcement). Il faut cependant relativiser ces configurations: par exemple l'équivalent taiwanais du CEA/LETI, l'ITRI, dispose d'environ 6 fois plus de personnel pour la recherche en électronique. La seule région de Tokyo regroupe 2 fois plus d'usines de semi-conducteurs (et leurs clients, à savoir les grands groupes) que toute l'Europe... Et la Chine est en train de se positionner!

Enjeux éthiques et culturels

L'omniprésence, la miniaturisation et les capacités de connexion des dispositifs nanoélectroniques posent de nouvelles questions culturelles et éthiques. Le respect des libertés individuelles tient un rôle central.

A titre d'exemple, la multiplication des moyens de stockage et la facilité accrue de retrouver des informations instantanément vont obliger les individus à évoluer dans un monde où la plupart des événements et actions, mêmes mineurs, seront «-tracés-» et mémorisés avec la plus extrême précision. Il suffit de songer au rôle joué, dans «-l'affaire de l'OM-», par les relevés de téléphone informatisés et de télé-péages autoroutiers. Plus récemment, les réseaux de caméras de surveillance de Londres ont permis de retrouver en un temps record les parcours des kamikazes auteurs d'attentats. Mais les mêmes dispositifs effectuent aussi des contrôles de vitesse pour un coût réduit, sur les routes en France. La question de la liberté fondamentale d'un individu est posée sous un angle complètement nouveau. Elle doit être examinée et discutée avec le plus grand soin.

De ce point de vue, la téléphonie mobile est une technologie ambiguë: pour des raisons de qualité de liaison, nous souhaitons être reliés partout et tout le temps au réseau. Il existe donc un échange permanent de notre GSM avec les stations de base, permettant à l'opérateur et donc à tout système de contrôle qui y est relié,

de savoir où se situe son propriétaire à tout moment. Dans le même temps, nous ne voulons pas a priori que nos déplacements soient suivis. Le résultat est bénéfique lorsque des promeneurs imprudents s'égarer en montagne ou qu'une personne souffrant de la maladie d'Alzheimer ne retrouve plus son chemin en ville. Le Parlement finlandais a récemment approuvé une loi pour autoriser un nouveau service de suivi des personnes: un signal est envoyé aux parents lorsque le téléphone de leur enfant sort d'un couloir de circulation préétabli. Le procédé se justifie lorsqu'il s'agit de s'assurer de la non-disparition des enfants à la sortie de l'école, mais discutable lorsqu'il se transforme en instrument de contrôle (comment aller chaparder des pommes ou faire l'école buissonnière?). Le suivi des enfants est-il autorisé avec leur propre consentement? Leurs droits fondamentaux sont-ils respectés?

Plusieurs européens se sont émus récemment des projets de la société américaine Google d'archiver l'ensemble des livres et données de la planète: quelle garantie les individus auront-ils que les informations qu'ils recherchent et les liens qu'ils récupèrent au moyen de cet outil ne seront pas biaisés à leur désavantage, ou que des pans entiers de la connaissance ne seront pas favorisés au détriment d'autres?

Les exemples de tentatives liberticides ne manquent pas: Microsoft propose maintenant un protocole d'usage conçu de telle manière que les logiciels ou fichiers musicaux implantés sur les ordinateurs doivent demander une autorisation à Redmond (siège de

Microsoft) pour fonctionner, de sorte que l'on sait exactement qui a écouté quelle musique et à quel instant (avec tous les avantages statistiques et commerciaux que cela peut aussi présenter). La facilité avec laquelle les « majors-» américaines ont pisté les utilisateurs européens de fichiers MP3 pour leur intenté des procès laisse imaginer l'effet de ces outils dans un contexte dictatorial ou même simplement malveillant.

Que ferons-nous demain des centaines d'objets personnalisés en notre possession, tous équipés de cartes à puces ou d'étiquettes intelligentes communiquant avec leur environnement?

La difficulté liée aux progrès technologiques permis par les nouveaux outils électroniques tient au fait que les législateurs et les pouvoirs publics ne prennent pas suffisamment conscience de leurs conséquences humaines et éthiques. Le principe de précaution ne peut pas s'appliquer dans ce cas, car ces outils ne génèrent pas de pollution nouvelle ni de danger massif pour la santé des individus. Il ne s'agit pas de bloquer le progrès technique, mais de l'orienter et d'en adapter les applications pour améliorer la qualité de la vie, tout en sauvegardant les principes fondamentaux garantissant la liberté des individus. ●