

Les nanotechnologies pour l'information et la communication

Alors que nous ne sommes qu'à l'aube des nanotechnologies, que de perspectives pour le traitement de l'information et la communication, mais aussi que de défis à relever ! Comment la microélectronique va-t-elle s'engager dans ce domaine ? A quelles évolutions du paysage industriel faut-il s'attendre ? Comment se préparer pour être acteur majeur de demain ?

par **J. Gautier**
CEA-LETI, Grenoble

Nanotechnologies, ce vocable apparaît couramment dans la littérature scientifique et a commencé à diffuser largement dans le grand public par le biais de la presse et d'ouvrages ou revues de vulgarisation (1) et même de science fiction. Au prime abord le préfixe nano marque l'entrée dans un monde dont les échelles sont nettement inférieures à la gamme précédente du micro. Entre ces deux plages, il y a certes un rapport de mille, mais il faut reconnaître que la frontière est relativement floue. Toutefois, lorsqu'il s'agit de dimensions géométriques, l'usage le plus commun est d'attribuer le préfixe nano à la gamme 0,1 nm – 100 nm au même titre que micro correspond à la gamme 0,1 μm – 100 μm . On pourrait tout aussi bien considérer que la frontière se situe à mi-chemin entre 1 μm et 1 nm sur une échelle logarithmique, ce qui ferait correspondre le domaine nano au sub-30 nm. Dans le cas de la microélectronique,

la dimension qui caractérise le mieux le degré d'avancement d'une technologie et la dynamique de progrès de ce domaine est la longueur de grille des transistors MOSFET. C'est en effet l'obtention de grilles avec une reproductibilité et un rendement suffisants qui impose une bonne part des énormes investissements qui permettent aujourd'hui de produire des composants comportant chacun des dizaines de millions de transistors. Cette longueur étant actuellement de l'ordre de 30-45 nm pour les technologies les plus avancées au niveau R&D, il est clair que l'industrie microélectronique est en train de pénétrer le domaine nanométrique et que parler de nanoélectronique prendra sous peu tout son sens.

La miniaturisation, une voie naturelle vers les nanotechnologies

Un autre aspect qui caractérise les nanotechnologies est l'apparition de propriétés physiques ou phénomènes nouveaux. Deux facteurs contribuent essentiellement à ce changement. Le premier est qu'aux échelles nanométriques les dimensions deviennent comparables à une longueur d'onde caractéristique d'effets quantiques dans le matériau considéré, notamment pour électrons, trous et magnons. Le deuxième est que dans les structures nanométriques le rapport surface sur volume devient très grand, ce qui renforce l'influence des surfaces d'échange. Les atomes n'étant jamais loin d'une interface, les forces interatomiques et les liaisons chimiques peuvent jouer un rôle important.

Ces deux facettes des nanotechnologies, la maîtrise de dimension se rapprochant

de celles de l'atome et l'existence de nouvelles propriétés, suscitent un fort intérêt de la communauté scientifique en raison du vaste champ d'investigation qui s'est ouvert. Au niveau sociétal les retombées des recherches menées sur ce thème, et des développements industriels qui ne manqueront de suivre, seront considérables. Mais peut-être est-il bon de rappeler au préalable les principaux traits caractéristiques de cette marche vers les nanotechnologies:

la miniaturisation des fonctions élémentaires, le développement de la capacité fonctionnelle des objets réalisés, la baisse des coûts de fabrication, la diversité des fonctions qui peuvent être intégrées et la réduction de la consommation énergétique.

Sur toute l'histoire de la microélectronique, la résolution des moyens lithographiques a été régulièrement améliorée. Ainsi, alors qu'en 1975 la production industrielle était caractérisée par des motifs élémentaires de 5 μm , les technologies d'aujourd'hui se définissent à partir de règles 90 nm, toujours au niveau production. Sur une période de 30 ans, on a donc développé les outils et procédés permettant de réaliser des structures élémentaires 55 fois plus petites par côté, ce qui correspond à une réduction dimensionnelle de 12 % tous les ans. Ceci, complété par des innovations technologiques, se traduit par une baisse drastique de la surface occupée par les fonctions élémentaires. Ainsi, la surface des cellules mémoires DRAM qui était de l'ordre de 1100 μm^2 en 1975 a-t-elle chuté vers 0,1 μm^2 aujourd'hui. Il en est de même pour les fonctions logiques et

(1) Jean-Louis. Pautrat, "Demain le nanomonde", Fayard, 2002.

analogiques, quoique le facteur de gain soit légèrement plus faible.

Cette réduction de la place occupée par chaque fonction a ouvert la possibilité d'en intégrer un nombre de plus en plus grand sur une surface donnée et, par voie de conséquence, d'accroître considérablement les capacités de calcul et de mémorisation des circuits réalisés. En fait, l'observation de la croissance du nombre de transistors dans les circuits a été effectuée pour la première fois par Gordon Moore, cofondateur de la société Intel. En 1965, il a publié une extrapolation de cette observation, indiquant que la croissance allait se poursuivre selon un rythme d'un facteur deux tous les ans. En 1975, il a corrigé cette valeur et allongé le temps pour un doublement à 18 mois. Depuis, ce rythme a été maintenu et l'observation initiale est devenue «loi de Moore». A ce jour les processeurs les plus complexes comportent plus de 100 millions de transistors et le milliard est attendu vers 2007 ! L'amélioration de la puissance de calcul, ou plus généralement de la puissance de traitement de l'information, résulte à la fois de l'augmentation du nombre de transistors dans les circuits mais aussi de la vitesse de fonctionnement de chacun d'eux. C'est un peu comme l'efficacité d'une ruche dont la production est directement liée au nombre d'individus et à la célérité de chacun d'eux. Or il se trouve que la miniaturisation des composants a aussi pour conséquence d'accroître leur agilité, ce qui renforce d'autant l'attrait pour celle-ci.

Un cercle vertueux

Une autre conséquence de la miniaturisation est la réduction de la quantité d'énergie qu'il faut consommer pour effectuer un traitement donné. A l'image d'un véhicule dont la consommation est directement liée à la masse et donc à la taille, la miniaturisation des composants électroniques se traduit aussi par une réduction de ce qui est équivalent, la capacité électrostatique, et au final l'énergie dissipée. Le gain correspondant peut être utilisé par exemple pour accroître l'autonomie d'un système portable ou encore pour effectuer un traitement plus complexe.

En ce qui concerne les coûts de fabrication, la réduction est également impressionnante. Ainsi, en partant de la production mondiale annuelle de circuits intégrés et des revenus correspondants des fabricants, le prix moyen du transistor s'élevait à environ 0,1 \$ en 1973 mais n'était plus que 1 µ\$ en 2000, soit une chute de cinq ordres de grandeur. Grosso modo, le prix du transistor élémentaire a donc été divisé par 1,53 tous les ans (figure 1). Dans la même période, le chiffre d'affaire mondial s'est malgré tout accru d'un facteur de l'ordre de 50, car le nombre de transistors produits et vendus a été multiplié par 5×10^6 . On perçoit là l'existence d'un cercle vertueux sur lequel nous reviendrons. De façon très schématique, de nouveaux produits sont permis par l'amélioration de performance des technologies et des circuits intégrés, ce qui ouvre de nouveaux marchés. Une partie des revenus étant réinjectée dans la R&D et dans l'outil de production, d'une part la productivité est améliorée, ce qui fait baisser les coûts, et d'autre part les performances sont accrues, ce qui rend les produits encore plus attractifs. Au final l'assise du marché s'élargit et l'industrie se développe.

Le nombre de transistors d'un circuit, leur agilité et leur ordonnancement mis en œuvre par un programme, sont des éléments essentiels de la puissance de traitement de l'information. Ce n'est cependant pas suffisant pour effectuer

des tâches complexes et de natures différentes. Comme une ruche n'est pas seulement constituée d'ouvrières, dans les applications de type système intégré, il est nécessaire d'inclure tous les éléments fonctionnels requis pour le bon fonctionnement de l'ensemble. Ceci peut se limiter à des blocs logiques et de la mémoire, mais peut aussi comporter des blocs analogiques et des composants passifs de type résistance ou condensateur, des moyens de communication avec le

monde extérieur, radiofréquence par exemple, des capteurs, etc. En outre il faut considérer que chacun de ces éléments se décline selon toute une

palette de constituants qui doivent être choisis à bon escient en fonction de leurs propriétés et de leur complémentarité. Dans le jargon des microélectroniciens, ces ensembles de composants, compatibles les uns avec les autres du point de vue de leur fabrication, sont connus sous le nom de plates-formes technologiques. Un fait remarquable de l'histoire de la microélectronique est l'enrichissement graduel des technologies par la mise au point de procédés toujours plus performants et l'arrivée de nouveaux composants dans ces plates-formes ; mémoires de type Logic, SRAM, Flash en 1998 ; E-DRAM en 1999 ; CMOS RF en 2000 ; FPGA et FRAM en 2001, MEMS et Chemical Sensors en 2003, électro-optiques en 2004, électro-biologiques en 2006 ?.

A ce jour les processeurs les plus complexes comportent plus de 100 millions de transistors et le milliard est attendu vers 2007 !

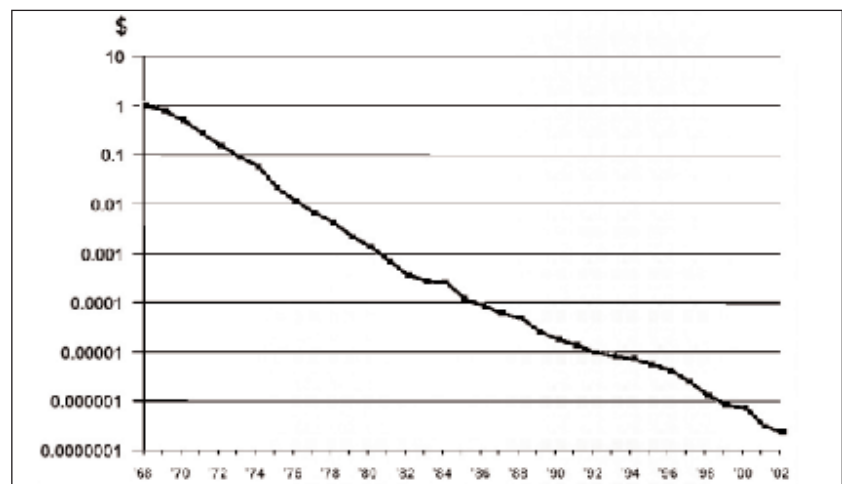


Figure 1. Evolution du prix moyen du transistor. Source Dataquest/Intel.

Ceci se traduit par une diversité plus grande de la gamme de matériaux mis en œuvre, ce qui n'est pas sans poser des difficultés techniques. Ainsi, alors qu'il existe déjà différents modèles de mémoire, il est envisagé d'en intégrer d'autres à base de matériaux magnétiques ou à changement de phase. La motivation est toujours d'aboutir à de meilleurs compromis entre vitesse de fonctionnement, densité d'intégration, consommation, durée de rétention de l'information, complexité de fabrication et coût. Il ne s'agit pas là d'un point de détail, mais d'une tendance lourde qui se poursuivra eu égard aux avantages qu'elle procure pour l'intégration des systèmes. De plus, pour la même raison, on peut être assuré qu'une bonne partie des innovations liées à l'émergence des nanotechnologies sera ainsi absorbée par l'industrie de la microélectronique. Nous reviendrons plus loin sur cet aspect essentiel.

La route de la microélectronique vers les échelles nanométriques est basée sur la réduction toujours plus poussée des éléments de structure constitutifs des dispositifs et circuits intégrés. On vient de voir que cette approche par miniaturisation est encouragée par les nombreux avantages qu'elle procure, puisque tout s'améliore. Ceci ne doit pas faire oublier les difficultés technologiques à surmonter, notamment pour obtenir une résolution lithographique toujours plus poussée, de faibles dispersions dimensionnelles et des rendements de fabrication suffisamment élevés pour rester compétitifs. Depuis 1994, les industriels de la microélectronique se sont regroupés, d'abord au niveau américain puis au niveau international, pour établir une feuille de route (2) qui comporte entre autres un calendrier prévisionnel du développement des générations technologiques futures. L'ensemble des défis à relever et les solutions probables sont identifiés. Ce document constitue un outil de travail indispensable pour les laboratoires et instituts de recherche, ainsi que pour tout le secteur industriel qui gravite autour de la microélectronique, équipementiers en premier lieu,

Ces ensembles de composants, compatibles les uns avec les autres, sont connus sous le nom de plates-formes technologiques

mais aussi fournisseurs de produits chimiques et consommables spécifiques, sans oublier les systémiers et utilisateurs finaux des circuits intégrés. Il offre en effet une visibilité sur une période de quinze ans glissants qui permet aux acteurs du domaine d'anticiper et de se préparer aux évolutions à venir.

Toutefois, cette présentation simplifiée ne doit pas masquer le niveau des challenges et des incertitudes. Outre le fait que les objectifs décrits dans la feuille de route de la microélectronique restent à atteindre techniquement, encore faut-il qu'ils le soient dans des conditions viables sur le plan économique. C'est là justement une des plus grandes inconnues, car de génération technologique à génération technologique la barre à franchir est de plus en plus haute et le coût des usines de fabrication des circuits intégrés croît de façon exponentielle. Cette envolée a été baptisée seconde loi

de Moore, afin de souligner la corrélation existant avec la première loi relative à la complexité des circuits. Elle indique que le coût de construction d'une nouvelle ligne de fabrication industrielle de circuits intégrés double tous les trois à quatre ans. Ainsi, le prix d'une ligne pour plaques de diamètre 300 mm s'élève actuellement à environ 2.5 milliards de \$! Selon la dernière édition de l'ITRS, celle de 2003, aux frontières du domaine de visibilité, c'est à dire pour une production démarrant en 2018, la génération technologique serait de type 18nm, les transistors ayant une grille de 7nm. Mais quel sera alors le prix des usines de fabrication ? Combien y en aura-t-il et où seront-elles situées sur la planète ?

de Moore, afin de souligner la corrélation existant avec la première loi relative à la complexité des circuits. Elle indique que le coût de construction d'une nouvelle ligne de fabrication industrielle de circuits intégrés double tous les trois à quatre ans. Ainsi, le prix d'une ligne pour plaques de diamètre 300 mm s'élève actuellement à environ 2.5 milliards de \$! Selon la dernière édition de l'ITRS, celle de 2003, aux frontières du domaine de visibilité, c'est à dire pour une production démarrant en 2018, la génération technologique serait de type 18nm, les transistors ayant une grille de 7nm. Mais quel sera alors le prix des usines de fabrication ? Combien y en aura-t-il et où seront-elles situées sur la planète ?

Les nanotechnologies par assemblages moléculaires ou atomistiques

Pour fabriquer des nanostructures, il existe une approche alternative à celle de la miniaturisation suivie actuellement par les industries de la microélectronique. Elle consiste à construire et organiser par assemblage d'éléments plus petits, tels qu'atomes ou molécules. Avec de telles

briques, ce sont des édifices *supra* moléculaires qui deviennent réalisables, dans la mesure où la manipulation des briques est effectivement maîtrisée. C'est la voie ascendante, « bottom-up », ainsi dénommée par opposition à l'approche « top-down » de la microélectronique consistant à « sculpter » des motifs de plus en plus petits dans un grand volume de matière. L'intérêt pour une électronique à l'échelle de la molécule remonte à une publication de deux chercheurs d'IBM, A. Aviram et M. Ratner (3), qui ont proposé en 1974 le concept de diode moléculaire. Depuis cette idée a fait son chemin et apparaît maintenant comme très réaliste, surtout depuis quelques découvertes essentielles pour l'observation et la manipulation à l'échelle de l'atome. Un pas décisif vers les nanotechnologies a été l'invention du microscope à effet tunnel en 1981 par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, deux chercheurs d'IBM à Zurich. Le principe est fort simple : lorsqu'une pointe métallique est suffisamment proche d'une surface conductrice, c'est à dire de l'ordre du nanomètre, des électrons peuvent franchir l'espace isolant qui les sépare et donner lieu à un courant. Ce dernier est tellement sensible à la distance, qu'il devient même possible de distinguer les atomes les uns à côté des autres lorsqu'on balaye la pointe sur la surface. La pointe doit bien entendu être parfaitement affûtée à son apex et des techniques ont été développées pour cela. Cette invention a donné des idées à d'autres chercheurs qui l'ont déclinée selon toute une panoplie d'outils permettant de faire une multitude d'expérimentations et de caractérisations à l'échelle de l'atome et du nanomètre, comme imager l'arrangement des atomes sur une surface, sonder leurs propriétés électroniques, distinguer les domaines selon leurs propriétés magnétiques, chimiques, etc. Les retombées de cette invention pour les nanosciences et les nanotechnologies sont telles qu'en récompense ses deux auteurs ont reçu le prix Nobel de physique en 1986. Autre tour de force, la manipulation d'atomes à l'unité. Il ne s'agit plus seulement d'observation, mais de la préhen-

(2) International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://public.itrs.net/>.

(3) A. Aviram, M. Ratner, "Molecular rectifiers", Chemical Physics Letters, Vol. 29(2), p. 277-283, 1974.

sion d'atomes un par un, de leur déplacement et de leur dépôt à des endroits précis pour écrire une véritable structure atomique. C'est la technique, à base de micro-pointe également, qui a été mise au point par Don Eigler et Erhard Schweizer en 1990. Peut-on imaginer construire ainsi des ensembles fonctionnels comportant des millions, voire des milliards, d'atomes ? Non, car même avec de nombreuses pointes agissant en parallèle, les temps d'écriture restent prohibitifs. Toutefois ces travaux ont eu un immense intérêt. Outre les aspects scientifiques directs, ils ont surtout démythifié l'accès à l'échelle atomique et ont entraîné dans leur sillage de nombreux chercheurs avides d'explorer cette Terra Incognita qu'était le nanomonde ainsi mis à notre portée. Depuis, on assiste à une explosion des recherches dans le domaine des nanotechnologies et les gouvernements mobilisent des budgets considérables, non pas en vue d'expéditions pour s'accaparer l'or des Incas, mais pour que les explorateurs de notre siècle ramènent les brevets qui seront à la base de la création des futures compagnies.

En parallèle à ces inventions, la découverte inattendue de nano-objets naturels a eu un impact aussi important dans la communauté scientifique et dans la prise de conscience de l'énorme potentiel industriel des nanotechnologies. Ce fut d'abord, en 1985, celle des molécules de C₆₀ dans les suies formées par un arc électrique. Il s'agit d'une sorte de ballon de football nanométrique constitué de 60 atomes de carbone placés aux points d'intersection des coutures du ballon. Cette découverte valut à Richard Smalley, Harry Kroto et Robert Curl de recevoir le prix Nobel de chimie en 1996. Ensuite il y a eu en 1991 la découverte des nanotubes de carbone, également dans la suie, par Sumio Iijima de la société NEC. Il s'agit d'une structure tubulaire ayant un diamètre de l'ordre du nanomètre et une longueur pouvant atteindre plusieurs dizaines de µm, constituée d'un enroulement d'un feuillet de graphite. Depuis, on s'est aperçu que ces nouveaux matériaux avaient des propriétés géométrique, mécanique, thermique et électronique exceptionnelles qui pouvaient trouver des applications dans quasiment tous les domaines, aussi bien pour le renfort des matériaux, l'énergie (piles à combus-

tibles), la chimie (catalyse) et la physique, que pour la pharmacie et la microélectronique. Les promesses sont telles que des dizaines de start-up ont été lancées de par le monde pour la production ou l'utilisation de ces nanotubes.

Pour ce qui concerne le traitement de l'information et la communication, les industriels du domaine ont vite compris tout l'intérêt que pouvaient avoir ces nanostructures et ont engagé des équipes dans l'exploration des possibilités d'utilisation en vue d'une exploitation ultérieure. C'est surtout le cas d'IBM qui a déjà réalisé des transistors et portes élémentaires à base de nanotubes de carbone. C'est également le cas d'autres tels NEC, Infineon, Motorola et Intel, même s'ils communiquent moins sur ce sujet.

L'élément ne constituant pas le tout, les nanostructures prises séparément ne sont d'aucune utilité pour la nanoélectronique si l'on ne sait construire

des ensembles fonctionnels tirant parti des propriétés de ces nouvelles briques. Comment les (auto-)positionner et les interconnecter à une échelle qui soit également nanométrique ? C'est une question essentielle qui est traitée par de nombreux laboratoires de recherche mais à laquelle il n'a pas encore été apporté de solution satisfaisante. Plusieurs approches de type physique, chimique et même biologique sont à l'étude : croissance localisée, report contrôlé par les propriétés de surface (hydrophile/hydrophobe), auto-assemblage par un vecteur de type ADN (4), etc. Le spectre est large et il n'y aura vraisemblablement pas de réponse unique. Si une approche 2D est initialement envisagée, le 3D ne serait-il pas possible à plus long terme ?

Tout ceci ne fait qu'illustrer l'énorme potentiel de progrès et d'innovation résident aux échelles nanométriques. De surcroît, il faudrait considérer les effets physiques nouveaux apparaissant à ces échelles et leur exploitation au niveau des dispositifs. L'étude de ceux-ci constitue en fait un véritable domaine d'investigation qui a été baptisé nanosciences.

L'apport des nanotechnologies au traitement de l'information et à la communication

L'explosion de la demande relative aux produits de communication et au sens large de traitement de l'information résulte d'une confluence entre une demande latente des populations, la création de besoins dans la société et des développements technologiques rendant la chose possible à prix abordable. Le cercle vertueux entre l'offre révélant la demande et la demande incitant à améliorer l'offre est source d'activité industrielle au bénéfice de l'économie et de l'emploi. Son existence future reste cependant tributaire

d'une demande croissante qui n'aura lieu que dans la mesure où les populations trouveront dans les nouveaux produits la satisfaction de

besoins réels. En quoi les nanotechnologies contribueront-elles au mieux être de celles-ci ? Actuellement, les domaines pour lesquels il y a de fortes attentes sociétales sont surtout ceux de la santé, de l'environnement, de l'emploi et de la sécurité. On peut rajouter également les conditions de travail et les loisirs qui sont aussi des éléments importants de la qualité de vie. Certes, le bonheur de l'homme ne se superpose pas avec les conditions matérielles de son existence car il a des aspirations profondes qui se situent sur d'autres plans, tels que le sens de l'esthétisme, le goût pour l'art, la réflexion métaphysique et le besoin de spiritualité, l'intensité des relations humaines... On peut toutefois remarquer que le développement des moyens mobiles de communication a été très bien accueilli par les populations et considéré comme un réel progrès, surtout par les jeunes, car il rapproche les êtres, rassure parfois (les parents), renforce l'efficacité, assouplit les relations de l'homme au temps et à l'espace. L'accès et la mise à disposition d'informations à travers la toile de l'Internet constitue un deuxième exemple

Deux chercheurs d'IBM ont proposé en 1974 le concept de diode moléculaire. Depuis cette idée a fait son chemin

(4) P. Fairley, "Germs that build circuits", IEEE Spectrum, pp. 37-41, Novembre 2003.

proband de l'apport des technologies de la microélectronique et des télécommunications, même s'il en existe des utilisations déviantes. Essayons maintenant de nous projeter dans l'avenir.

Communication et information sont des fondamentaux qui jouent et joueront encore davantage un rôle essentiel dans le fonctionnement, voire même l'organisation, de la société. Ceci est vrai pour les secteurs bancaires et de la finance (transactions, paiements ...), du commerce (commerce en ligne), des transports (billettiques, contrôle des trafics, localisation, sécurité ...), de l'enseignement et de la recherche (accès aux bases de données, forums ...), de la santé (surveillance épidémiologique, télé médecine...), de la sûreté nationale (surveillance du territoire, fichiers divers...), de l'emploi (base de données...) etc. On ne saurait être exhaustif, car de nouveaux services apparaissent en permanence. L'imagination humaine est sans limite, mais ne verront effectivement le jour que ceux qui auront une réelle valeur ajoutée. Ainsi le concept d'intelligence ambiante (5) qui fera largement appel aux nanotechnologies, pour le transport de l'information et pour accroître la puissance de calcul des objets qui seront disséminés de façon évanescence dans notre environnement, devra-t-il être passé au crible des usages. Ne seront acceptés que les objets matériels ou virtuels qui rendront un service effectif.

Dans ce domaine du traitement de l'information et de la communication, l'immense attrait pour les nanotechnologies vient du fait que non seulement celles-ci héritent des atouts de la microélectronique, qui ont été brièvement rappelés au début de cet article, mais aussi qu'elles apportent une diversité de matériaux nouveaux, de procédés et d'effets physiques qui permettront de concevoir des fonctionnalités non envisageables jusqu'à présent. Les nanotechnologies sont donc génératrices d'innovations. En outre, elles permettront d'assurer des fonctions complexes avec une efficacité bien supérieure aux solutions actuelles. Sans vouloir en limiter la portée, afin de concrétiser leur apport, on peut tenter de donner quelques pistes applicatives :

La préhension d'atomes un par un a surtout démythifié l'accès à l'échelle atomique

- une des grandes fonctions qui bénéficiera pleinement de l'apport des nanotechnologies sera le stockage de l'information, que ce soit sous la forme de mémoire de masse ou sous celle de mémoires intégrées. Pour ce faire, il existe déjà de nombreuses possibilités : charge électronique, moment magnétique, polarisation, état physique ou cristallin, indentation mécanique ou déplacement de matière, degré d'oxydation d'une espèce chimique, conformation moléculaire ... Peu importe les solutions techniques qui sont retenues, ce qui compte c'est la direction prise vers des capacités toujours plus élevées, dans des volumes de matière encore plus réduits et à des prix en baisse.

- La puissance de traitement de l'information devrait aussi s'améliorer de façon considérable. A court et moyen termes le progrès se fera par la voie de la miniaturisation, mais avec une intégration progressive des nano-objets de la voie ascendante lorsque les dispositifs conventionnels de la microélectronique s'approcheront de leurs limites

physiques. A long terme des ruptures sont envisageables, aussi bien sur le plan architectural que sur celui du matériel. Outre le calcul quantique bien identifié, d'autres voies, par exemple de type neuromorphique, ne pourraient-elles venir compléter les possibilités de l'approche von Neumann actuelle ? Le fabricant de circuits intégrés Infineon collabore déjà avec l'Institut Max Planck sur l'étude de neurones en fonctionnement. De telles fertilisations croisées de disciplines ne sont-elles pas pleines de promesses ?

- Le passage récent du 32 bits au 64 bits, pour les processeurs d'Intel et AMD, ne doit pas masquer l'intérêt pour des fonctions plus simples de traitement de l'information, et surtout très économes en consommation d'énergie et bon marché. L'intégration de telles fonctions dans les objets de la vie de tous les jours est déjà en marche dans les laboratoires à travers le concept d'objets communicants. Elle devrait s'amplifier car les applications sont multiples et les nanotechnologies

rendront ces fonctions de plus en plus discrètes voire même évanescences.

- Une autre fonction essentielle, déjà évoquée précédemment, est celle de communication. Là aussi, l'avancée vers les nanotechnologies permet d'effectuer de véritables prouesses technologiques, notamment par le biais de l'accroissement des performances en fréquence des technologies qui rend de nouvelles plages spectrales utilisables à bas coût. La technique d'ultra large bande (UWB) est particulièrement bien adaptée à cette fonction pour les communications locales sans fil, y compris pour des objets nomades.

- Afin d'illustrer l'intérêt d'une électronique plus ou moins évanescence, communicante (active ou passive), faible consommation et bas coût, on peut penser aux quelques exemples suivants : *des réseaux de capteurs* pour la surveillance des risques majeurs, naturels, industriels ou liés au terrorisme. Pour imaginer le concept de puces minuscules pouvant transmettre des informations de proche en proche, le vocable de « smart dust » est utilisé dans la littérature anglo-américaine.

Les étiquettes électroniques pour le commerce, la gestion des stocks, le suivi des flux de marchandises et leur traçabilité (aliments notamment), la production industrielle. *L'identification des billets de banque* par une puce électronique avec antenne intégrée glissée dans l'épaisseur du papier est déjà possible. En permettant une traçabilité et l'annulation de la valeur monétaire, ceci pourrait être un moyen efficace de lutte contre les trafics de toutes sortes (blanchiment, attaque des transports de fonds...).

Le suivi médical à distance. *Des prothèses « intelligentes »* (organes sensoriels, contrôle loco-moteur ...).

En fait, il faut noter que ces exemples ne sont pas l'apanage exclusif des nanotechnologies. Ainsi les microtechnologies

Des dizaines de start-up ont été lancées pour la production ou l'utilisation de ces nanotubes

(5) ISTAG, "Scenarios for Ambient Intelligence in 2010", www.cordis.lu/ist/istag.htm.

(6) J. Carmona, M. Lebedev, R. Crist, J. O'Doherty, D. Santucci, D. Dimitrov, P. Patil, C. Henriquez, M. Nicolelis, "Learning to Control a Brain-Machine Interface for Reaching and Grasping by Primates", *PLoS biology*, Vol.1, issue 2, November 2003

(7) "Les visions du Professeur Warwick", <http://www.automatesintelligents.com/lab0/2003/nov/warwick.html>.

sont bien adaptées à la réalisation de nombreux types de capteurs. Par leur apport, les nanotechnologies viendront enrichir et élargir le champ du possible. L'interface homme-machine est encore assez pauvre, mais il devrait devenir plus naturel et intuitif, s'enrichir de nouvelles interfaces sensorielles, de la généralisation de l'utilisation du langage et de la commande par le geste. Jusqu'où irons-nous dans la commande par le cerveau (6) (7) ?

Un point essentiel est que tous les nouveaux moyens logiciels et matériels devront avoir l'homme pour finalité première, faute de quoi une réaction de rejet risque de se développer dans les populations. Ils devront donc être conçus et réalisés en fonction d'un réel service rendu.

Le paysage industriel à l'ère des nanotechnologies

Quel sera le paysage industriel lorsque les nanotechnologies auront atteint un degré de maturité significatif ? Cette interrogation n'est pas dénuée d'intérêt car il y a une latence d'une dizaine d'années entre les premiers niveaux de recherche et le démarrage d'une exploitation commerciale. Il est donc essentiel de se préparer suffisamment tôt aux évolutions ou ruptures pour être acteur du domaine en émergence. Quelques observations relatives aux caractéristiques de l'industrie microélectronique s'imposent au préalable :

- la microélectronique est une industrie fondamentalement conservatrice, non pas par manque de dynamisme, mais parce que le premier souci industriel est le maintien des rendements de fabrication à un haut niveau, gage de compétitivité dans un milieu très concurrentiel. L'introduction de nouveaux matériaux qui risquent de déstabiliser une filière se fait donc avec beaucoup de prudence et seulement lorsque cela est justifié, mais cela se fait.

- La microélectronique est une industrie dite lourde, car il faut réinvestir annuellement une fraction élevée du chiffre d'affaire, pour maintenir l'outil de production à niveau et préparer les générations suivantes.

- La microélectronique est caractérisée par une forte dynamique au niveau de

l'outil de production, des procédés technologiques, des produits.

- La microélectronique est structurée pour une production de masse d'objets de très grande complexité. Pour cela elle a capitalisé du savoir-faire sur l'ultra-propreté, l'environnement des salles blanches, la maîtrise de la contamination particulière. Elle a également établi des relations fortes de partenariat avec les industries chimiques (produits et gaz ultra purs, traitement des effluents) et les équipementiers (moyens de production).

- La microélectronique (cas des produits différenciés) a développé des relations de partenariat avec les équipementiers, ce qui lui donne une bonne visibilité sur l'évolution des besoins du marché.

Ce sont là des fondamentaux qui font que cette industrie a des atouts incomparables pour entrer dans le domaine des nanotechnologies, ce qu'elle a d'ailleurs déjà commencé à faire, comme cela a été indiqué en début de cet article. Toutefois, n'y a-t-il pas une voie alternative rendue possible par l'approche *bottom-up* ? Ne peut-on en effet imaginer la production de circuits nano-électroniques réalisés principalement par auto-assemblage de nano-objets (molécules, nano-fils, nanotubes de carbone...) et qui seraient tolérants à un certain nombre de défauts de fabrication, par exemple par redondance et reconfiguration ? C'est la piste qui est explorée par le groupe de recherche de S.

Williams à HP Palo Alto, avec comme motivation une réduction drastique du coût des unités de production. De

ce point de vue, c'est une piste séduisante, mais n'est-elle pas utopique ? Il y a en effet de nombreux défis à relever sur le plan technologique et des incertitudes au niveau système. De plus beaucoup de circuits intégrés actuels sont déjà de véritables systèmes embarquant une grande variété de composants et fonctions que l'on ne saurait remplacer simplement. S'il est indispensable de mener des recherches sur l'électronique moléculaire, avec

Les nanotechnologies permettront d'assurer des fonctions complexes avec une efficacité bien supérieure aux solutions actuelles

L'identification des billets de banque par une puce électronique avec antenne intégrée est déjà possible

la visibilité actuelle il serait suicidaire de penser qu'elle se substituerait à l'approche technologique conventionnelle et de ne plus investir dans cette dernière. Quels sont donc les scénarii les plus probables ?

- la micro-nanoélectronique par l'association du *top-down* et du *bottom-up*. Cette orientation s'appuie sur les observations suivantes :
l'industrie de la microélectronique évolue déjà vers l'intégration d'une plus grande diversité de composants, matériaux et fonctions, afin de mieux répondre aux besoins du marché. Il y a une tendance vers l'hétérogène sur la puce, notamment par le biais du concept «above I.C.».

Des nanostructures obtenues par la voie *bottom-up* sont déjà intégrés. C'est le concept du *nano-inside* illustré par les travaux du LETI et de Motorola sur la réalisation de mémoires non volatiles à base de nanocristaux de silicium obtenus par auto-assemblage. Cela devrait s'accroître avec l'incorporation de composants obtenus par voie chimique.

Les grands industriels de la microélectronique se préparent déjà aux ruptures. Ainsi, plusieurs (Intel, IBM, Infineon...) ont déjà engagé des équipes pour évaluer les avantages que pourrait présenter une intégration de nanotubes de carbone, soit comme composant actif, soit pour les interconnexions. Le LETI également, via les actions de Recherche Technologiques

de Base lancées par le ministère délégué à la Recherche et aux nouvelles technologies, a démarré un projet exploratoire sur ce

sujet, en partenariat avec des équipes de recherche amont.

- Une nanoélectronique majoritairement *bottom-up*.

L'objectif serait ici de valoriser les caractères propres des nanotechnologies pour des applications pouvant se dispenser

(8) S. Moller, C. Perlov, W. Jackson, C. Taussig, S. Forrest, "A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory", Nature 426, 166 - 169 (13 November 2003)

des composants plus conventionnels et éventuellement du substrat silicium. Pour des marchés dont le volume ne serait pas suffisamment attractif pour les grands industriels du premier scénario, la production se ferait dans un cadre de start-up ou petites sociétés et de niches applicatives. Toutefois, pour les marchés de masse, des transferts vers les grands industriels pourraient s'effectuer par rachat de société. Les électroniques «bas coût» et/ou fabriquées sur substrats flexibles (8) (plastiques, feuilles métalliques ...) pourraient être les grandes bénéficiaires des progrès de l'approche *bottom-up*.

Fusions et alliances sont nécessaires

En ce qui concerne les grands industriels de la micro et nanoélectronique, il faut s'attendre à ce que la consolidation du secteur continue de se poursuivre. La raison essentielle est que l'avancée vers des technologies plus agressives implique de pouvoir effectuer des investissements de plus en plus élevés. Deux niveaux de changement sont à considérer pour le passage d'une génération technologique à l'autre, suivant que le diamètre des plaques reste constant ou qu'il augmente. Dans le premier cas, il suffit de remplacer seulement une partie du parc d'équipement, tandis que dans le deuxième, il faut construire une nouvelle ligne de production. En pratique, pour disposer des fonds pour une telle construction, il faut avoir provisionné annuellement de l'ordre de 20 % du chiffre d'affaire pendant plusieurs années ou pouvoir recapitaliser. Ceci vient d'ailleurs en sus du réinvestissement dans la recherche. A titre indicatif, l'investissement dans une ligne de 300 mm exige en pratique un chiffre d'affaire dépassant 6 milliards de \$. Il en résulte que seuls les plus grands industriels du domaine, et qui plus est ceux qui sont en bonne santé, peuvent se permettre un changement de diamètre. Les autres doivent se focaliser sur des marchés niches ou entamer une spirale descendante ! Une voie alternative pour relever ce défi financier est de se regrouper avec un autre industriel du domaine, soit dans le cadre d'une fusion, soit par une stratégie d'alliance, soit par le biais

d'accords. Cette approche a aussi le mérite de conduire à de substantielles économies d'échelle en R&D. A titre d'exemple, on peut citer la création en avril 2003 de Renesas Technology par fusion des activités semi-conducteurs

hors DRAM de Hitachi et de Mitsubishi, devenu la même année troisième fournisseur mondial de semi-conducteurs. On

peut également rappeler l'alliance signée en 2002 entre Motorola, ST et Philips pour la préparation des générations CMOS sub-100 nm.

Des changements de diamètre des plaques de silicium et de génération technologique, il découle une augmentation de productivité qui permet de satisfaire une demande croissante du marché. Toutefois si celle-ci n'est pas en phase avec la capacité de production, la loi de l'offre et de la demande conduit à l'existence d'oscillations sur les prix et le marché lui-même, ce qui accélère la consolidation du secteur.

De l'analyse précédente, on peut conclure que le secteur de la micro-nanoélectronique est très concurrentiel, qu'il évolue avec une grande dynamique, et surtout qu'en terme de parts de marché rien n'est jamais définitivement acquis. Cette analyse met aussi en évidence le lien fait en France entre nano-électronique et nanotechnologies. Concrètement, ce lien se manifeste par la création à Grenoble du pôle MINATEC qui est un centre de compétence en micro-nanotechnologies mais demeure fortement imprégné d'électronique. Dans sa mouvance, bien sûr, d'autres voies sont explorées, qu'elles soient alternatives au CMOS telles que l'électronique moléculaire, la spinttronique, les nanostructures pour les NEMS, ou alors complémentaires telles que la nanobiologie appliquée à l'électronique. Par contre, à la différence de ce qui est observé dans les grands pays promoteurs de nanotechnologies (Allemagne, Japon, USA, Suisse,...) l'engagement des grandes sociétés chimiques ou pharmaceutiques est moindre en France. Ceci constitue probablement un handicap car, de ce fait, la chimie et les nouveaux matériaux sont moins présents au niveau de la recherche, ce qui peut limiter l'émergen-

Tous les nouveaux moyens logiciels et matériels devront donc être conçus et réalisés en fonction d'un réel service rendu

ce de ruptures technologiques ou d'applications issues de recherches pluridisciplinaires.

Conclusions

et recommandations

L'entrée de la microélectronique dans l'ère des nanotechnologies

est en train de s'opérer, dans un premier temps, par le biais d'une continuation de la miniaturisation, qui en constitue une voie naturelle. C'est l'approche *top-down* qui donne lieu à une amélioration continue des performances des produits obtenus de la sorte, ainsi qu'à une baisse de leur prix. Une autre caractéristique du domaine est la croissance du niveau de complexité des technologies qui permet d'ores et déjà de réaliser de véritables systèmes sur la puce, SoC, et qui continuera d'évoluer vers des systèmes hétérogènes.

Pour faire face à certains des défis technologiques qui vont se poser avec de plus en plus d'acuité, les grands industriels du secteur ont déjà commencé à envisager une intégration de nano-structures obtenues par la voie dite *bottom-up*. Cette approche est prometteuse car elle associe le meilleur des deux techniques. Les leaders d'aujourd'hui en microélectronique risquent bien d'être les *leaders* de demain en nanoélectronique.

La microélectronique est déjà omniprésente dans la vie quotidienne mais avec l'arrivée des nanotechnologies, ce sont de nouveaux produits et services qui vont voir le jour. Il est difficile de lister l'ensemble des fonctions qui vont surgir de l'imagination humaine, tant les potentialités technologiques sont fortes. De façon générique, elles résulteront de plus grandes capacités à communiquer, à stocker et à manipuler de l'information. Tous les secteurs de la vie seront concernés : professionnel, loisirs, santé, environnement, éducation, défense ...

L'existence d'une industrie nationale forte dans le domaine de la micro-nano-

(9) Claude Saunier, Sénateur, rapport sur "l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies". 22 janvier 2003

électronique est essentielle, eu égard aux implications qui en découlent, notamment pour ce qui concerne l'irrigation du tissu industriel. Ce secteur est très concurrentiel, il évolue avec une grande dynamique et surtout il faut bien prendre conscience que rien n'est jamais définitivement acquis au niveau des prises de part de marché.

L'histoire a montré que le paysage industriel correspondant peut être rapidement bouleversé. C'est pourquoi des

recommandations ont été formulées récemment pour un soutien de cette filière de haute technologie en France (9). Sans revenir sur la nécessité d'une politique volontariste, on peut insister sur les quelques points suivants :

- pour se préparer efficacement aux ruptures technologiques, il faut une conti-

nuité de l'amont à l'aval et des interactions fortes entre les différents maillons de cette chaîne (enseignement, recherche, développement industriel), car tous ont un rôle essentiel à jouer.

- les innovations et ruptures peuvent venir tout aussi bien de la physique des solides (effets quantiques) que de la chimie (électronique moléculaire), de la biologie (techniques d'auto-assemblage) ou de l'informatique (nouveaux paradigmes de calcul).

Il faut donc établir des interactions transversales entre ces diverses disciplines (notamment via des mobilités thématiques de thésards, post-docs, et chercheurs, ou par des projets communs). Un effort important pour développer la nanochimie doit être entrepris rapidement, en raison de la différence

de culture scientifique entre chimistes, physiciens et technologues (la nanochimie est la maîtrise à l'échelle individuelle ou collective de la chimie des objets de dimensions nanométriques, et des applications de ces nano-objets, en particulier à l'électronique).

- il faut aussi préparer les développements technologiques qui associent les nano-objets de l'approche *bottom-up* avec ceux de l'approche *top-down*. La phase pré-industrielle est à notre porte, mais saurons-nous réellement engager des recherches pluridisciplinaires s'appuyant sur des professionnels dont la formation de base présente une diversité suffisante ?

- le thème des nanotechnologies a besoin de jeunes chercheurs inventifs et talentueux. Il leur offre des perspectives scientifiques passionnantes leur permettant d'exprimer leur créativité, mais encore faut-il pouvoir disposer des postes ou bourses d'étude pour les accueillir.

L'initiative du Ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies sur les Recherches Technologiques de Base et comportant un volet relatif aux thésards et post-docs va dans le bon sens. Il faudra toutefois la pérenniser et faire en sorte que la reprise économique prévisible aux USA ne happe pas trop nos étudiants et post-docs en leur offrant un cadre plus attractif et beaucoup plus souple que le nôtre.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie M. R. Baptist, directeur de recherche au CEA, pour ses suggestions et conseils.