

LES 5 SECTEURS-CLÉS... L'ÉLECTRONIQUE

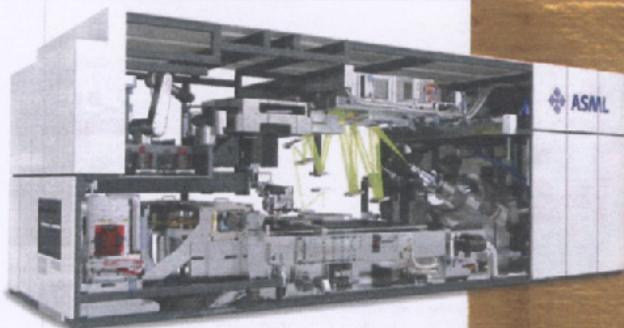
Des limites sans cesse repoussées

Gage de performances et de profits croissants, la miniaturisation est inhérente à l'électronique. Pas étonnant qu'elle ait été la première à pénétrer le nanomonde. Le défi, aujourd'hui ? Tirer parti des contraintes imposées par cette échelle réduite.

S'il est un domaine où la manipulation de la matière à l'échelle nanométrique est devenue une réalité bien tangible, c'est bien celui de l'électronique. Qu'on en juge : dans les années 1970, un transistor, soit le composant de base de tout microprocesseur, mesurait 12 micromètres, le standard actuel est environ de 32 nanomètres. Et les prédictions de l'ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) font état de composants de 10 nanomètres à l'horizon 2020. Ainsi, comme le résume Simon Deleconibus, directeur scientifique au CEA-Leti, « cela fait longtemps que l'électronique a franchi la frontière du nanomonde ».

Et pour cause. Depuis 1965, la miniaturisation est un peu l'alpha et l'oméga de l'électronique. Cette année-là, Gordon Moore, cofondateur du géant du processeur Intel, prévoit en effet que le nombre de transistors que l'on peut ajouter sur une puce électronique devrait doubler tous les deux ans. Depuis, cette prévision, connue sous le nom de loi de Moore, n'a jamais été

▲ En quarante ans, la dimension standard des transistors est passée de 12 micromètres à 32 nanomètres.



A> De nouvelles techniques cherchent à réduire encore davantage la taille des transistors (ci-contre) placés sur les puces. Ci-dessus, un graveur utilisant la lithographie extrême UV qui permet de descendre jusqu'à 16 nm.

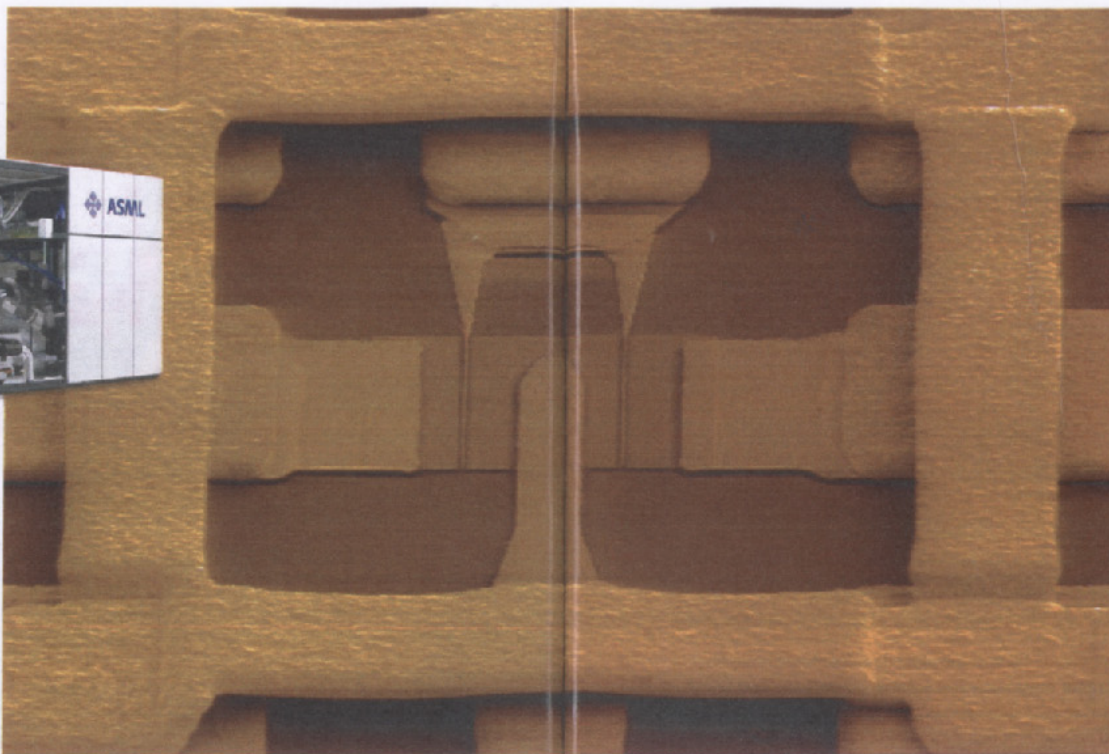
démontie. La raison en est limpide : des transistors plus petits impliquent des processeurs plus rapides (plus ils sont petits, plus deux transistors sont proches l'un de l'autre), moins chers (le silicium coûte cher) et moins gourmands en énergie. Bref, la miniaturisation est un gage de performances technologiques toujours renouvelées et de profits croissants.

Cela dit, depuis qu'elle a accédé au nanomonde – la barre des 100 nanomètres a été franchie en 2002 – l'électronique se heurte de plein fouet aux lois physiques fondamentales. Ainsi, depuis une dizaine d'années, les spécialistes doivent rivaliser d'ingéniosité pour concilier impératifs industriels et contraintes inhérentes à l'échelle nanométrique. Ce faisant, alors même que la taille des transistors s'approche de celle de l'atome, c'est une toute nouvelle électronique qui est actuellement en gestation dans les laboratoires.

Concrètement, comme l'indique Marc Bescond, à l'Institut matériaux, microélectronique, nanosciences de Provence (IM2NP), à Marseille, « avec des transistors de quelques dizaines de nanomètres, on commence à entrevoir la nature quantique des composants ». Un exemple ? Considérons la « porte »,

FAITS & CHIFFRES

Le premier processeur commercialisé en 1971 par Intel, baptisé 4004, contenait 2300 transistors. En 2010, le Xeon 5600 d'Intel en contient 1,17 milliard sur une surface de 248 mm². Quant à l'Opteron 6000 d'AMD, gravé en 45 nanomètres, il contient 1,8 milliard de transistors sur une surface de 346 mm²!



ou grille, d'un transistor, soit une couche de matériau isolant placée au sommet du composant qui en contrôle l'activation. Désormais, son épaisseur ne dépasse plus guère celle de quelques atomes. Les électrons qui s'y trouvent n'obéissent donc plus aux lois de la physique macroscopique, mais à celles de la physique quantique. A cette échelle, les particules microscopiques, en raison de leur nature ondulatoire, échappent au matériau dans lequel elles étaient auparavant confinées.

Autrement dit, plus ils pénètrent le nanomonde, plus les transistors voient leurs caractéristiques dévier de celles qu'on leur connaissait jusqu'alors. Ce qui oblige à des adaptations drastiques à chaque nouvelle génération. Ainsi, pour colmater les fuites de particules, dont l'une des conséquences néfastes est d'augmenter la consommation d'énergie des transistors, même lorsqu'ils sont inactifs, de nouveaux matériaux plus isolants sont apparus. Par ailleurs, afin de limiter la consommation, de nouvelles architectures des microcircuits permettent de couper l'alimentation de zones inactives. Autre option, décliner, au sein d'un même processeur, les transistors en une gamme variée, tous les circuits au sein d'une puce n'ayant pas besoin des performances maximales. Enfin, pour récupérer de la vitesse de calcul, l'une des solutions, mise en œuvre

ASML - A. CAPPICINI / PHOTOGRAPHIE

dès la génération des transistors de 90 nanomètres, a consisté à placer de minuscules pinces de chaque côté d'un transistor afin de serrer ou de détendre le silicium, selon les cas. Ces nanocontraintes mécaniques ont en effet la faculté d'augmenter la mobilité des électrons de 20 à 50 % au sein du composant, donc

Alors que la taille des transistors s'approche de celle de l'atome, c'est une toute nouvelle électronique qui est en gestation

d'accroître sa vitesse de basculement entre les deux états ouvert et fermé. Bref, comme le résume Simon Deleoneibus, « sans parler des solutions consistant à emplier des transistors dans les trois dimensions pour augmenter leur densité, les concepteurs essaient toutes les solutions possibles afin de pallier les limites inhérentes au nanomonde ».

Pour autant, le scientifique ajoute : « Les développements récents dans les laboratoires montrent que l'on pourra descendre jusqu'à 3 nanomètres pour un transistor dont on aura modifié l'actuelle technologie du silicium par une technologie en couches ultraminces dénommée "silicium sur isolant". Cette nouvelle approche, en extrapolant les documents de l'ITRS, devrait nous conduire jusqu'en 2030. » Autrement dit, pour cause de limites physiques

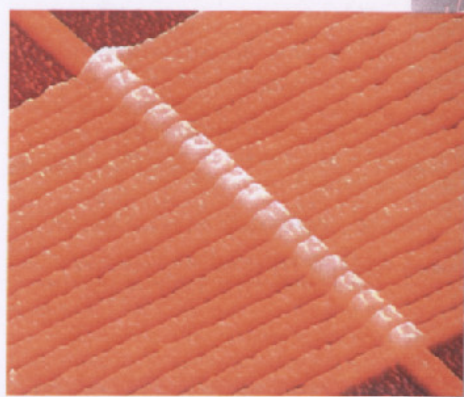
fondamentales, il sera difficile d'aller au-delà, c'est-à-dire de faire qu'un transistor se comporte comme un... transistor. Raison pour laquelle tous les laboratoires spécialisés planchent sur des solutions alternatives, avec lesquelles les lois du nanomonde ne seraient plus des contraintes à contourner par tous les moyens, mais au contraire de nouvelles opportunités dont on pourrait tirer profit.

DES COMPOSANTS D'UN GENRE NOUVEAU

Illustration avec le memristor, un composant d'un genre nouveau, de quelques nanomètres seulement, qui, eu égard à sa taille minuscule, présente une caractéristique électrique qu'aucun composant électronique n'avait exhibée avant lui. Elaboré en 2008 par des chercheurs des laboratoires Hewlett-Packard, il s'agit en effet d'une résistance électrique dont la valeur, contrairement à celle d'une résistance classique, change en fonction de la valeur du courant qui la traverse. L'intérêt ? De quoi en faire un nouvel élément de base d'un microprocesseur, bien plus compact qu'un transistor. De fait, comme l'explique Damien Querlioz, à l'institut d'Électronique fondamentale, à Orsay, « le memristor permettrait de concevoir des mémoires très compactes, mais que l'on pourrait aussi utiliser pour des opérations de calculs. Alors qu'aujourd'hui, ces deux fonctions sont spatialement séparées dans un processeur ». Au point qu'en août dernier, HP a conclu un partenariat avec le fabricant coréen Hynix, en vue de la commercialisation, d'ici à 2013, des premières puces-mémoires de type memristor.

Et c'est bien la tendance du futur : tirer parti de pro-

priétés nouvelles des composants fondamentaux, qui étaient jusqu'alors absentes chez les transistors traditionnels. Le transistor monoélectronique, encore cantonné dans les laboratoires de recherche fondamentale, s'annonce prometteur. Comme le détaille Marc Sanquer, à l'institut des Nanosciences et cryogénie, à Grenoble, « dans un transistor classique, des milliers d'électrons circulent librement à chaque nanoseconde entre la source (son entrée) et le drain (sa sortie), ce nombre fluctuant au cours du temps autour d'une valeur moyenne. Désormais, en modifiant légèrement la structure d'un transistor d'environ 20 nm, on peut contrôler à l'unité près le nombre d'électrons dans le transistor et les faire transiter un par un entre la source et le drain. Ou vice versa, ce qui est impossible dans un transistor classique. »



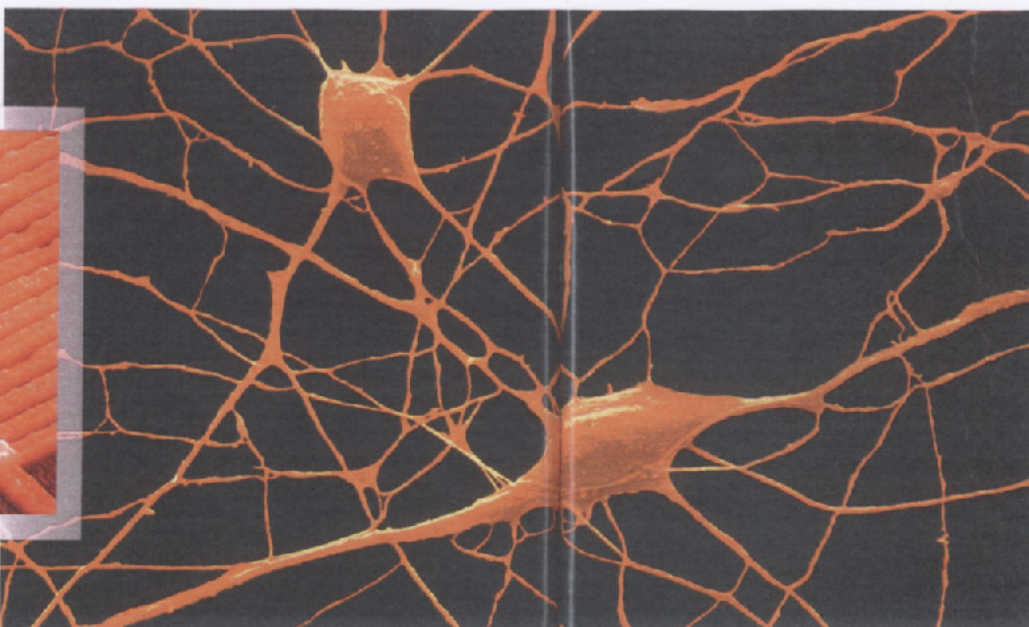
À Bijou nanométrique, le « memristor » réunit deux fonctions jusqu'ici séparées : mémoire et opérations de calcul.
> Confrontés à l'hétérogénéité des composants inhérente à la miniaturisation, les chercheurs s'inspirent de l'architecture cérébrale pour créer des neurones électroniques.

Ainsi, du fait d'une précision diabolique et de caractéristiques électriques inédites, les spécialistes imaginent intégrer, à terme, directement sur une plaque de silicium, des fonctions aussi diverses que des détecteurs capables de mesurer d'infimes déformations mécaniques ou de déceler des molécules présentes à l'état de trace dans un milieu. En sus des fonctions traditionnelles de calcul et de stockage de l'information d'une puce électronique. « Ce sont des développements à long terme, précise Mireille Mouis, à l'institut de Microélectronique, électromagnétisme et phototonique. Mais l'idée est bien d'intégrer à l'électronique des fonctionnalités

Les nanocomposants vont permettre de se rapprocher du graal de l'informatique : l'ordinateur quantique

qui lui sont actuellement étrangères. » Si bien qu'un microprocesseur ne serait plus une simple machine à calculer, mais intégrerait des fonctionnalités « physiques » comme mesurer, nanomanipuler, etc.

Plus radicale encore, la possibilité d'utiliser ces nanocomposants d'un nouveau genre afin de réaliser le graal de l'informatique : l'ordinateur quantique. Ainsi, alors que, dans un ordinateur ordinaire, les informations sont stockées sous la forme de bits prenant les valeurs 0 ou 1, des bits quantiques (ou qubits) pourraient simultanément prendre les valeurs 0 et 1. L'intérêt ? La possibilité de stocker, en principe, sur la même mémoire, des informations représentant un grand nombre de solutions potentielles d'un



problème. Et, en appliquant des algorithmes adaptés, traiter toutes ces solutions de concert. De quoi renvoyer instantanément les plus puissants calculateurs d'aujourd'hui à la préhistoire de l'informatique. En effet, comme l'explique Marc Sanquer, « une fois que l'on sait manipuler les électrons un par un dans deux transistors monoélectroniques intimement couplés, on peut, tel que le prévoient les lois quantiques, faire en sorte qu'un électron soit dans les deux transistors simultanément, réalisant ainsi un qubit ».

À dire vrai, l'ordinateur quantique, y compris pour des raisons fondamentales qui empêchent actuellement le contrôle d'un grand nombre de qubits sur

des temps nécessaires à la réalisation d'un calcul, est encore une chimère. Pour autant, il est fort possible que les ordinateurs de demain, du fait des progrès de la nanoélectronique, fonctionnent tout à fait différemment de nos bons vieux PC. En effet, un autre écueil majeur lié à l'extrême miniaturisation des transistors est le risque que deux transistors, pourtant fabriqués de la même manière, possèdent des caractéristiques différentes. « Il suffit pour cela d'une très faible fluctuation du nombre ou de la position des atomes dans un des matériaux utilisés », précise Marc Bescond. De quoi rendre chaotique une puce dont le fonctionnement normal est fondé sur la parfaite homogénéité de ses composants de

base. A moins, justement, de tirer parti de cette hétérogénéité consubstantielle à l'échelle nano. Comment ? En s'inspirant du fonctionnement du cerveau. Comme l'explique Damien Querlioz, « le cerveau est riche en fonctionnalités et consomme peu d'énergie. Pourtant, ses composants de base, les synapses et les neurones, sont très différents de l'un à l'autre ». Pourquoi alors ne pas essayer de reproduire son architecture ? Ainsi, le projet Synapse, financé par la Darpa (Defense Advanced Research Project Agency), l'Agence des Etats-Unis pour les projets de recherche avancée de défense, se donne une dizaine d'années pour réaliser un processeur comprenant un milliard de neurones électroniques et mimant l'architecture cérébrale.

L'objectif est ambitieux. Mais avec certains composants nanométriques possédant des caractéristiques plus subtiles qu'un transistor, certaines fonctions de base ont été réalisées qui pourraient être implémentées dans un cerveau artificiel. « Ainsi, on peut imaginer par ce biais accéder à des fonctions qui sont actuellement mal remplies avec les ordinateurs actuels, mais que le cerveau réalise instantanément, poursuit le chercheur. Par exemple la reconnaissance de visages ou de timbres vocaux. Ou le traitement d'images. » Bref, même si les transistors ont depuis longtemps franchi les portes du nanomonde, les électroniciens n'en sont encore qu'à l'orée de l'exploitation de ses lois. ●

MATHIEU GROUSSON

LES PROMESSES DU GRAPHÈNE

Un matériau semble irrémédiablement lié à l'électronique : le silicium. Mais à l'heure où la miniaturisation des composants atteint l'échelle atomique, sera-t-il demain l'élément phare de la nanoélectronique ? A observer la montée en puissance du graphène, rien n'est moins sûr. Depuis sa découverte, en 2004, ce matériau bidimensionnel composé d'une unique couche d'atome de carbone formant un réseau en nid d'abeille est la star des congrès de nanotechnologie. Et pour cause. Alors qu'à faible épaisseur, la plupart des matériaux cessent de conduire le courant électrique, le graphène, le seul matériau bidimensionnel connu, est aussi bon conducteur que le cuivre. Ainsi, la mobilité des électrons y est près de 50 à 500 fois plus élevée que dans le silicium. Raison pour laquelle ce matériau nano par excellence intéresse beaucoup les spécialistes de la microélectronique pour fabriquer de minuscules composants affichant des performances indécentes. Ainsi, en 2007, le premier transistor en graphène a été mis au point par Andre Geim et Konstantin Novoselov, tous deux à l'Université de Manchester, au Royaume-Uni. Ils ont d'ailleurs décroché le prix Nobel de physique 2010 pour leur découverte de ce matériau. En 2008, ces chercheurs ont élaboré le plus petit transistor jamais conçu. Soit un composant d'une épaisseur d'un atome et de 10 atomes de long ! Depuis, des équipes leur ont emboîté le pas, montrant tout l'intérêt du graphène pour la nanoélectronique, notamment hautes fréquences. Alors, « has-been », le silicium ? Si l'électronique à base de graphène parvient à passer de la phase prototype à l'intégration de milliards de transistors sur une même puce, l'hypothèse est crédible.

Les premiers transistors en graphène ont été mis au point par les chercheurs Andre Geim et Konstantin Novoselov, prix Nobel de physique 2010.



J. J. WANG/HP LABS - D. MCCARTHY/SPUR/COSMOS - J. SUPERMANT/SPR