

# Les apports des nanotechnologies à l'électronique du futur

A la fin des années 1950, Richard Feynman tint une conférence visionnaire, restée inaperçue pendant plusieurs décennies, mais célèbre aujourd'hui (1). En effet, cette conférence a jeté les bases des nanotechnologies (2) en imaginant, bien avant l'avènement du microscope à force atomique, la manipulation d'objets au niveau de l'atome (3). Cette perspective permet aujourd'hui de repenser l'électronique comme assemblage de composants nanométriques (4). Ce court article n'a pas la prétention de couvrir l'ensemble de ce vaste domaine, mais, par quelques exemples, de donner au lecteur une idée de l'apport des nanotechnologies à une approche renouvelée du traitement de l'information.

par **Michel BRILLOUËT\***

\* Adjoint au Directeur du CEA-LETI

(1) Richard Feynman prononça ce discours « *There's plenty of room at the bottom* » le 29 décembre 1959 au congrès annuel de l'American Physical Society au Caltech. On peut trouver ce texte sur la toile à l'adresse : <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

(2) La *National Nanotechnology Initiative*, aux Etats-Unis, a essayé de préciser le concept de nanotechnologie dès le début des années 2000 : « *Les nanotechnologies sont [définies comme des techniques permettant] le contrôle et la structuration de la matière à des dimensions d'environ 1 à 100 nanomètres (de la taille d'un atome à la taille d'une centaine de molécules), où de nouveaux phénomènes permettent de nouvelles applications* » (voir le site de la NNI à l'adresse <http://www.nano.gov/html/facts/whatsNano.html> – on y retrouve les concepts forts de modification volontaire et contrôlée de la matière en vue de réaliser des fonctions nouvelles).

(3) « *Les Principes de la Physique, autant que je puisse le voir, ne s'opposent pas à la possibilité de manipuler des objets atome par atome. Ce n'est pas une tentative de violer quelque loi que ce soit, c'est quelque chose qui, en principe, peut être réalisé, mais qui, en pratique, n'a pas été fait, car nous sommes trop grands.* » R. Feynman, *op. cit.*

(4) Un nanomètre (abréviation : nm) correspond à un milliardième de mètre, soit environ un dix-millième du diamètre d'un cheveu.

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE  
ET ÉLECTRONIQUE DU FUTUR :  
DES RUPTURES TECHNOLOGIQUES  
EN PERSPECTIVE

## A COURT TERME...

...les connaissances accumulées dans l'exploration du nano-monde vont contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des composants électroniques à l'échelle nanométrique, et ainsi à l'amélioration des performances des circuits intégrés.

La microélectronique est entrée dans le monde des nanotechnologies à l'aube de ce millénaire au moment où les dimensions minimales des motifs imprimés sur les circuits intégrés sont passées au-dessous de la barre des 100 nanomètres.

Le composant électronique élémentaire est le transistor à effet de champ (5). L'amélioration continue des performances des circuits électroniques est obtenue essentiellement grâce à la miniaturisation des transistors et à l'optimisation concomitante de leur structure de base. Toutefois, lorsque l'on réduit les dimensions de ce composant, l'on est confronté à des phénomènes nouveaux, qui ne se manifestent qu'à l'échelle nanométrique (6) : la nécessité de mesurer, de modéliser et de comprendre le comportement de la matière à l'échelle nanométrique est donc une préoccupation que la microélectronique partage avec les autres domaines d'application des nanotechnologies.

## Comment mesurer à l'échelle atomique ?

Les progrès accomplis en matière de technique de mesure ont été stupéfiants : qui aurait imaginé, il y a seulement quelques décennies, que visualiser l'arrangement d'atomes en trois dimensions ne surprendrait plus personne ? Nous allons illustrer ces progrès, tirés par les nanotechnologies et quotidiennement utilisés en microélectronique, au moyen de deux exemples : la microscopie électronique et les techniques de champ proche.

L'utilisation d'un faisceau d'électrons pour cartographier la matière n'est pas une technique nouvelle. Toutefois, il est maintenant courant d'obtenir des images de la forme des objets, de leur composition chimique ou d'autres propriétés et ce, avec une résolution de l'ordre de l'angström (7) (voir la figure 1). On a ainsi pu visualiser le déplacement de rangées d'atomes, dans

(5) Plus précisément, la technologie dominante est le CMOS (pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*), qui combine deux transistors complémentaires, l'un permettant le passage du courant électrique en réponse à un signal ou une commande, tandis que l'autre bloque les fuites de courant et réduit ainsi la consommation électrique du circuit.

(6) On parle de phénomènes quantiques en référence à la physique quantique, élaborée au début du XX<sup>e</sup> siècle, qui offre le cadre théorique approprié pour décrire les comportements observés à l'échelle atomique.

(7) 1 Å (angström) = 0,1 nm.

(8) On parle de bi-stabilité ou de comportement bistable quand un système n'est stable que dans l'un ou l'autre de deux états clairement distincts.

certaines composés ferroélectriques [1], qui explique le comportement bistable (8) de ce type de matériau utilisé dans la fabrication de mémoires de nouvelle génération.

La conception du microscope à effet tunnel a valu le Prix Nobel 1986 à ses inventeurs Gerd Binnig et Heinrich Rohrer (des laboratoires d'IBM Zürich), qui ont ouvert un champ nouveau – la microscopie à champ proche – permettant de mesurer de nombreuses propriétés physiques d'objets nanométriques situés en surface (voir la figure 2). Ces mesures s'appuient sur des phénomènes qui ne se produisent qu'à très courte distance, comme l'effet tunnel (9), et dont l'efficacité décroît exponentiellement avec la distance. En balayant la surface de l'échantillon au moyen d'une pointe ultrafine maintenue à une distance contrôlée (typiquement de seulement quelques angströms), l'on obtient une image très précise des propriétés dudit échantillon.

Mais l'électronique devrait à son tour stimuler le développement des mesures à l'échelle nanométrique. En effet, un circuit intégré de quelques cm<sup>2</sup> de surface est constitué de centaines de millions de transistors commutant à la fréquence de quelques GHz (10). Pour caractériser efficacement le fonctionnement de ce circuit, il faudrait développer des techniques capables d'observer des phénomènes extrêmement brefs sur des objets uniques, de taille nanométrique, localisés sur une surface de plusieurs cm<sup>2</sup> : inutile de dire que nous sommes très loin d'avoir des instruments de mesure suffisamment rapides et sensibles, même si des progrès considérables ont été accomplis dans ce sens.

## A MOYEN TERME...

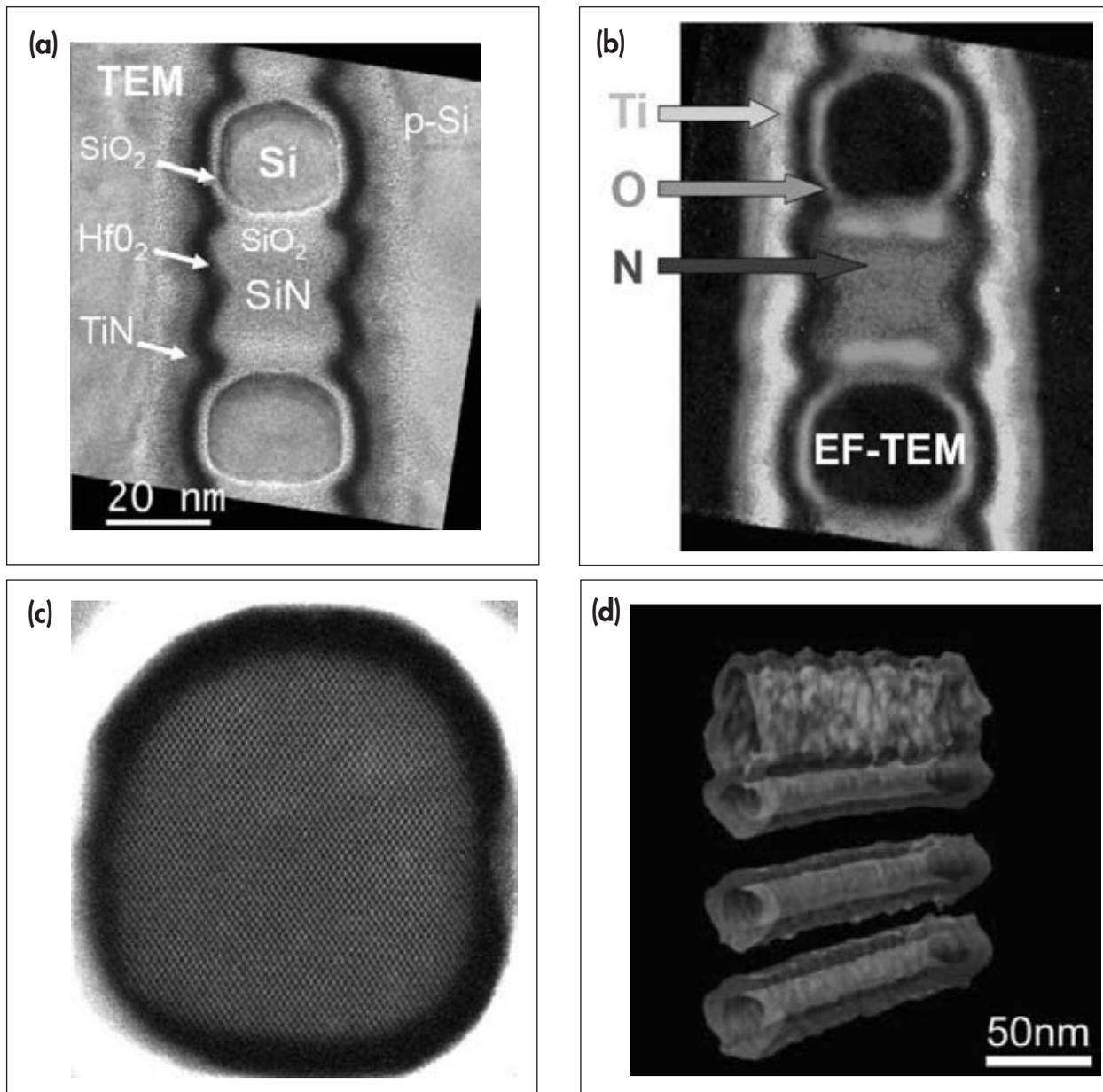
...les propriétés uniques de structures nanométriques pourraient permettre de réaliser des composants aux fonctions plus performantes.

Le succès que connaît actuellement la microélectronique repose sur quelques concepts tellement évidents que l'on a, parfois, tendance à les oublier :

- la miniaturisation des composants électroniques permet d'en réduire le coût par fonction, d'en améliorer les performances (vitesse, consommation...) et d'en augmenter la fiabilité : toute solution alternative au transistor à effet de champ devra être capable d'afficher une telle perspective de progrès continu sur le long terme ;
- le traitement de l'information est effectué essentiellement sous forme numérique, ce qui offre tout à la fois robustesse (on régénère facilement un signal en un « 0 »

(9) L'effet tunnel est un phénomène purement quantique (cf. note 6), qui explique comment une particule peut traverser une couche réputée infranchissable dans une description classique et intuitive de la matière. Ce phénomène est significatif quand l'épaisseur de la couche n'excède pas environ 1nm.

(10) 1 GHz (gigahertz) = 1 milliard de transitions par seconde.



**Figure 1** : Images obtenues par microscopie électronique en transmission (d'après [2]) :  
 (a) coupe d'une structure de transistor avancé (il s'agit de tiges de silicium (Si) empilées, appelées nano-fils, qui apparaissent comme des formes rondes sur cette image) ;  
 (b) composition chimique de cette structure : titane (Ti), oxygène (O) et azote (N) ;  
 (c) image haute résolution d'un nano-fil : chaque point brillant de l'assemblage régulier correspond à une colonne d'atomes ;  
 (d) visualisation en trois dimensions par tomographie d'une des couches enrobant les nano-fils.

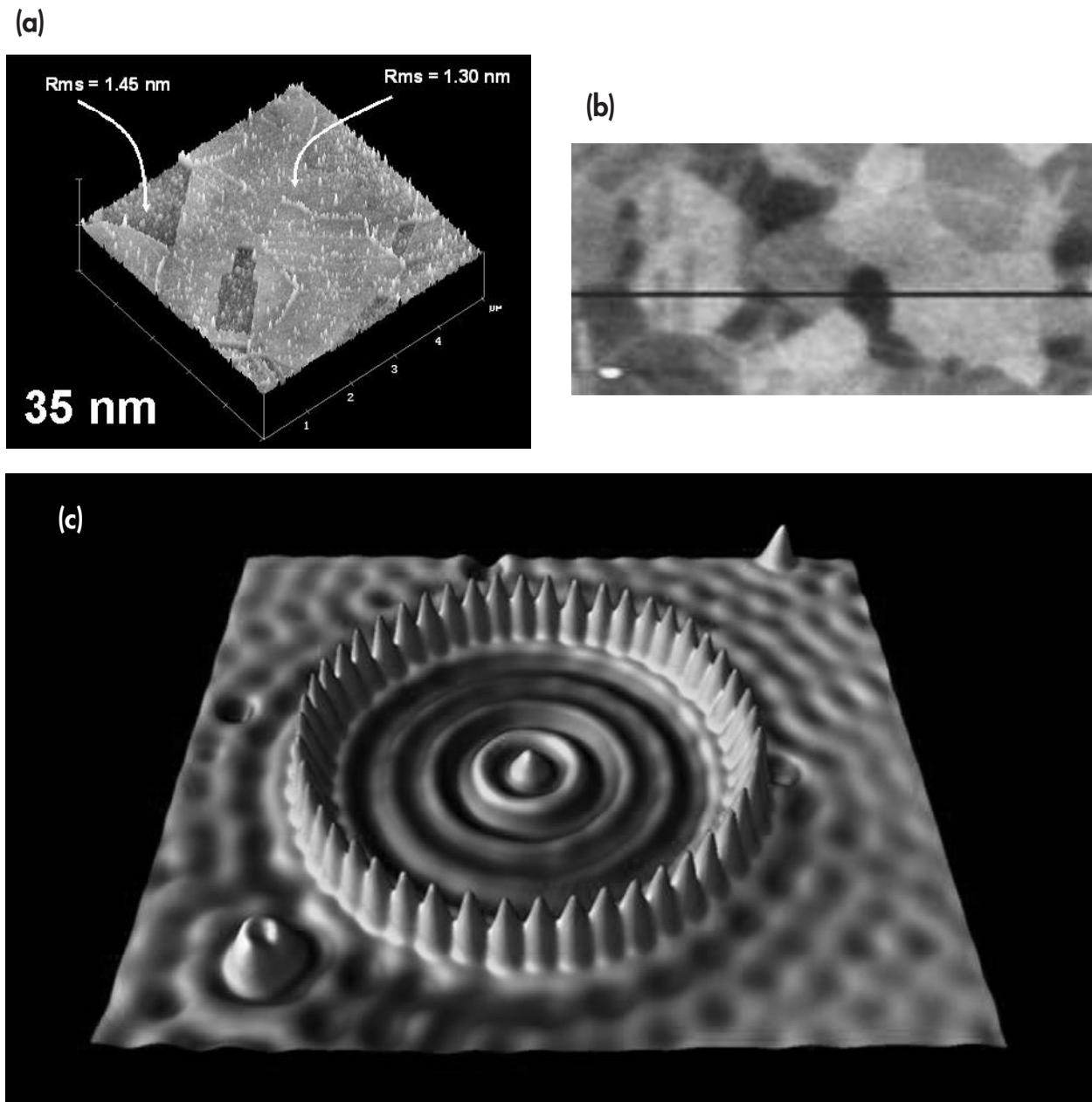
ou un « 1 »), simplicité (on peut ramener toute fonction logique à une combinaison de quelques fonctions logiques) et versatilité (les systèmes numériques peuvent être programmés) ;

- enfin, l'information numérique est représentée par la charge de l'électron, une particule qu'il est aisé de manipuler au moyen d'un champ électrique assez faible.

La conclusion que l'on peut tirer aujourd'hui de plusieurs décennies de recherches est qu'on n'a pas encore trouvé d'alternative à l'électron, ni à la logique CMOS

(Complementary Metal Oxide Semiconductor) (5), qui cumule toutes les qualités requises..., ce qui ne signifie pas nécessairement qu'il n'existe aucune autre perspective.

Devant l'ampleur du défi, la *Nanoelectronics Research Initiative* américaine a formalisé certains grands axes de recherche, que la microélectronique devra aborder dans les décennies à venir si l'on veut poursuivre la courbe des progrès accomplis en calcul numérique. Le potentiel des nanotechnologies sera largement sollicité pour répondre à cinq grandes questions :



**Figure 2** : Images obtenues par microscopie en champ proche :

- (a) mesure par microscopie à force atomique de la rugosité d'une couche de protection déposée sur une surface de cuivre : on aperçoit l'empreinte des grains de cuivre, en surface ;  
 (b) mesure par microscopie à sonde de Kelvin de l'énergie nécessaire pour qu'un grain de cuivre émette un électron dans le vide : la valeur de cette énergie, visualisée en niveaux de gris, dépend de l'orientation cristalline de chaque grain ;  
 (c) image en microscopie à effet tunnel haute résolution montrant la diffusion des électrons, à la surface de la couche de cuivre, par un atome d'impureté adsorbé (image créée originellement par IBM Corporation).

- 1/ trouver un système de codage de l'information qui soit plus performant que la charge de l'électron ;
- 2/ être capable de transmettre des informations plus efficacement que par des procédés électroniques (11) ;
- 3/ effectuer des calculs en utilisant des systèmes hors équilibre ;
- 4/ gérer le dégagement de chaleur produit par des nanostructures (12) ;
- 5/ recourir à l'auto-assemblage dirigé comme nouvelle méthode de fabrication des composants.

Dans ce qui suit, nous nous attacherons à donner deux exemples de composants futurs qui, s'inscrivant sur le

(11) Tout au moins à très courte distance, le transfert d'information par la lumière (photon) étant plus efficace à très grande distance, comme nous le rappelons tous les jours les réseaux de télécommunication en fibres optiques.

(12) Il s'agit plus précisément d'ingénierie des phonons, le phonon étant une manière de décrire en physique quantique l'agitation thermique des atomes dans des (nano-) structures, sous l'effet de la chaleur.

premier axe décrit plus haut, reposent sur des phénomènes purement quantiques (6) : l'effet tunnel (9), déjà mentionné, et la polarisation magnétique intrinsèque de l'électron (appelée « *spin* »).

#### Un nouveau commutateur basé sur l'effet tunnel

Dans le monde classique, un électron d'un matériau conducteur ne peut traverser un isolant en l'absence d'un apport d'énergie lui permettant de « sauter » par-dessus la barrière d'énergie que cet isolant constitue. Dans une description quantique de la matière, cette traversée de la barrière isolante est possible sans apport d'énergie, pour peu que la distance à parcourir soit suffisamment faible (de l'ordre du nanomètre, au plus) : c'est l'effet tunnel (voir la figure 3 ci-après). Tout l'enjeu, pour certains composants informatiques de nouvelle génération, va être de contrôler suffisamment la transparence de la barrière, afin de créer deux états clairement différenciés entre eux (c'est-à-dire un « 0 » et un « 1 »).

On peut, par exemple, faire varier la largeur de la barrière par un champ électrique exercé par une électrode de commande : c'est le T-FET (*Tunneling Field Effect Transistor*), qui reste conceptuellement assez proche du transistor à effet de champ classique et permet de réduire fortement la consommation d'énergie au repos. Mais l'imagination des physiciens n'a pas de limite : elle peut générer des composants beaucoup plus élaborés, tel le BiSFET (*Bilayer PseudoSpin Field-Effect Transistor*), qui utilise l'interaction de deux films monoatomiques de carbone.

Les nanotechnologies nous font découvrir des matériaux – souvent artificiels – aux propriétés insoupçonnées. Actuellement, le plus emblématique pour l'électronique est le carbone, non pas sous forme massive (graphite), mais comme feuillet d'épaisseur monoatomique, appelé graphène. Les recherches menées depuis

quelques années lui découvrent des propriétés plus qu'attractives : non seulement une capacité supérieure à conduire le courant électrique (13), qui laisse imaginer des transistors ultra-rapides, mais aussi la possibilité d'utiliser ce matériau comme électrode semi-transparente dans les écrans plats et les panneaux solaires... Dans certaines conditions, les électrons d'un feuillet de graphène peuvent se coupler avec les charges d'un deuxième feuillet de graphène extrêmement proche et le système résultant se comporte comme si la barrière isolante présente entre ces deux feuillets n'existait plus (14). Toutefois, en augmentant la tension électrique entre les deux feuillets, le courant d'électrons va détruire ce couplage, rendant ainsi la barrière opaque aux électrons : nous sommes dès lors en présence d'un commutateur (qui fait que le courant passe ou non), commandé par de très faibles tensions, rapide et consommant extrêmement peu d'énergie.

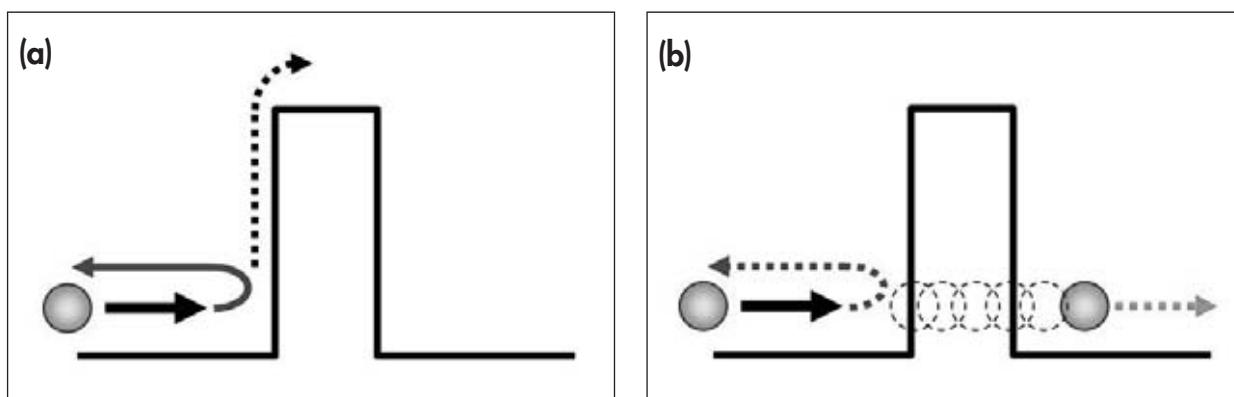
Même si l'applicabilité de ce composant à des systèmes complexes reste à démontrer, l'on voit, grâce à cet exemple, toutes les potentialités qu'offrent les possibilités de combiner des objets de taille nanométrique à des phénomènes propres à la physique quantique pour obtenir des dispositifs innovants.

#### Stocker des informations grâce au *spin* des électrons

Nul ne s'étonne plus de la capacité phénoménale de stockage de données qu'ont nos systèmes électroniques. Les maîtres-mots du progrès des circuits mémoire sont la capacité à stocker de plus en plus d'informations, la vitesse de lecture et d'écriture sans trop consommer

(13) On a ainsi pu mesurer, dans le graphène, une mobilité des électrons très supérieure à celle constatées dans les matériaux semi-conducteurs massifs.

(14) Ce phénomène est semblable à la supraconductivité, état dans lequel deux électrons se couplent *via* les vibrations de la structure cristalline, entraînant l'annihilation de la résistance électrique du matériau.



**Figure 3** : L'effet tunnel :

(a) en physique classique un électron ne peut pas traverser une barrière isolante, sauf à recevoir une énergie suffisante pour lui permettre de « sauter par-dessus » ;

(b) dans le nano-monde, l'électron a une probabilité non nulle de traverser cette même barrière isolante sans aucun apport d'énergie supplémentaire : c'est l'effet tunnel.

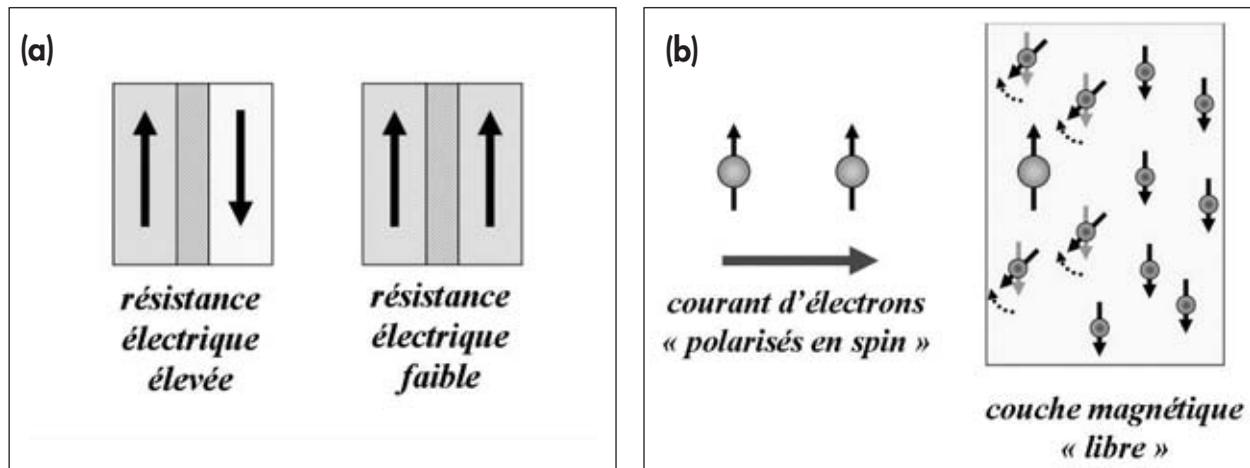


Figure 4.

(a) selon les orientations magnétiques relatives de deux couches magnétiques, on observe une résistance électrique qui peut varier significativement : deux couches d'orientations magnétiques opposées génèrent (entre elles) une résistance électrique élevée, contrairement à deux couches d'orientation magnétique identique.

(b) un courant d'électrons à l'orientation magnétique (« spin ») définie peut forcer une couche magnétique à changer d'orientation : on peut donc écrire un « 0 » (orientation magnétique « vers le haut ») ou un « 1 » (orientation « vers le bas »), selon le passage ou non du courant d'électrons « polarisés en spin ».

d'énergie et la possibilité de conserver de l'information en l'absence d'alimentation électrique du système (non-volatilité). Malheureusement, aucune mémoire à état solide ne combine toutes ces qualités au même niveau de performance et d'aucuns rêvent d'une hypothétique mémoire universelle.

Avec un composant appelé STTRAM (15), les mémoires magnétiques (ou MRAM (15)) offrent cette perspective sur le long terme : elles s'appuient sur le fait que l'électron est porteur d'un moment magnétique, le *spin* (une propriété purement quantique), et qu'il se comporte donc comme un petit aimant.

Pour lire l'information contenue dans la mémoire (voir la figure 4a), on utilise la variation de résistance électrique observée quand un courant traverse deux couches magnétiques : lorsque ces deux couches ont la même orientation magnétique, la résistance est plus faible que lorsqu'elles sont d'orientations magnétiques opposées. Dans certains cas, la variation de résistance peut être significative : on parle alors de Magnétorésistance Géante, dont la découverte valut le Prix Nobel 2007 à Albert Fert et Peter Grünberg.

Pour écrire un point mémoire (appelé aussi cellule mémoire) (voir la figure 4b), l'on injecte des électrons ayant tous la même orientation magnétique (en les faisant passer, par exemple, à travers une couche d'orientation magnétique définie). Le couple exercé par le moment magnétique de ces électrons va forcer les électrons de la couche magnétique traversée à aligner leur *spin* suivant l'orientation privilégiée et, le cas échéant, cela va entraîner un retournement de l'aimantation de la couche.

On obtient ainsi des mémoires non volatiles (car l'aimantation ne disparaît pas), rapides et consommant peu d'électricité. Toutefois, les difficultés technologiques liées à la complexité des matériaux magnétiques risquent de différer l'adoption de cette approche.

## A LONG TERME...

... l'exploration du nano-monde pourrait générer une approche totalement nouvelle du traitement de l'information.

Cette approche ne fait que souligner le fait que la performance d'un système est liée, non pas uniquement aux propriétés de ses composants élémentaires (le transistor, en électronique), mais aussi à la qualité de l'architecture du système et des logiciels ou des protocoles qui en assurent le fonctionnement. En exprimant l'espoir que les nouvelles fonctionnalités apportées par les nanotechnologies pourront effectivement révolutionner les techniques de traitement de l'information, nous abordons ici un domaine qui reste encore en grande partie à explorer.

Plusieurs pistes se dessinent, parmi lesquelles nous mentionnerons l'intégration de phénomènes aléatoires comme parties constitutives du système, l'exploitation de fonctionnalités non numériques (qui font parfois appel à la nature comme source d'inspiration) ou encore l'utilisation des phénomènes quantiques parmi les plus paradoxaux.

Une propriété essentielle du nano-monde est que plus les composants sont petits, plus on doit s'attendre à des fluctuations dans leurs propriétés, en raison de leurs propriétés intrinsèques (comme, par exemple, une variation de dimensions) ou de leur environnement

(15) Il s'agit d'acronymes anglais, MRAM signifiant *Magnetic Random Access Memory* et STTRAM *Spin Torque Transfer Random Access Memory*.

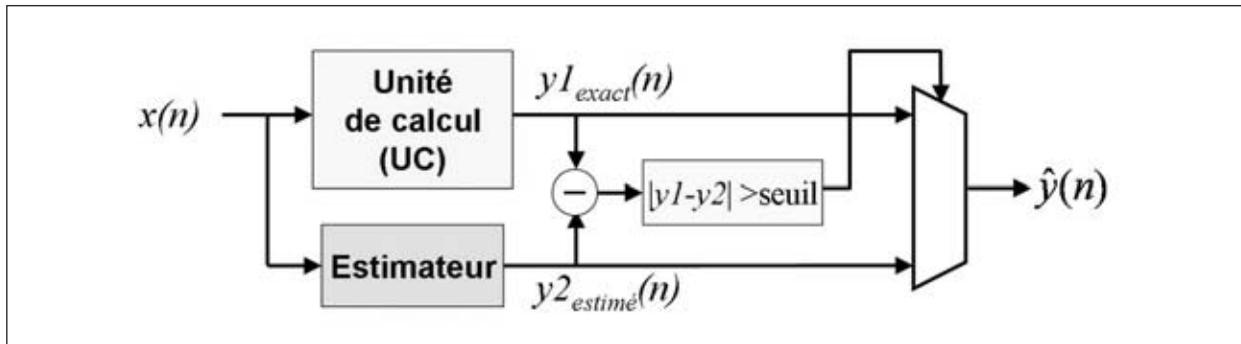


Figure 5 : Pour tenir compte du taux d'erreur élevé des composants nanométriques, on envisage de doubler l'unité de calcul par un circuit moins complexe, mais plus résistant aux erreurs, qui évaluera la vraisemblance du résultat calculé (d'après [4]).

(charges électriques ou composés chimiques altérant leurs propriétés). Habitué comme nous le sommes à des calculateurs qui fournissent un résultat (presque toujours) exact, il pourrait sembler que nous n'allions pas, avec ces innovations, réellement dans le sens du progrès... Mais, de fait, cet aspect aléatoire a été intégré dès leur conception dans les systèmes de télécommunications ou dans les stockages de données, qui recourent à des méthodes de correction d'erreurs plus ou moins sophistiquées. L'étape suivante est d'optimiser le taux d'erreur en fonction de l'application : les algorithmes de compression de l'image tiennent d'ores et déjà compte des imperfections de notre vue pour ne restituer qu'une information d'une fidélité approximative.

Dans les technologies numériques futures, l'on envisage désormais que l'unité centrale de calcul (UC) puisse faire des erreurs ; on lui adjoindrait un processeur moins performant, mais plus robuste aux erreurs, qui procéderait à une estimation du résultat. Si les résultats de l'UC et ceux de l'estimateur coïncident, on considère que le résultat de l'UC est exact ; sinon, on demande à l'UC de recommencer le calcul (voir la figure 5). L'on espère grâce à ce mécanisme diminuer le taux d'erreur des processeurs numériques.

Des techniques moins intuitives verront peut-être aussi le jour, comme la résonance stochastique [5], qui permet d'améliorer le rapport signal / bruit en injectant du bruit dans le système.

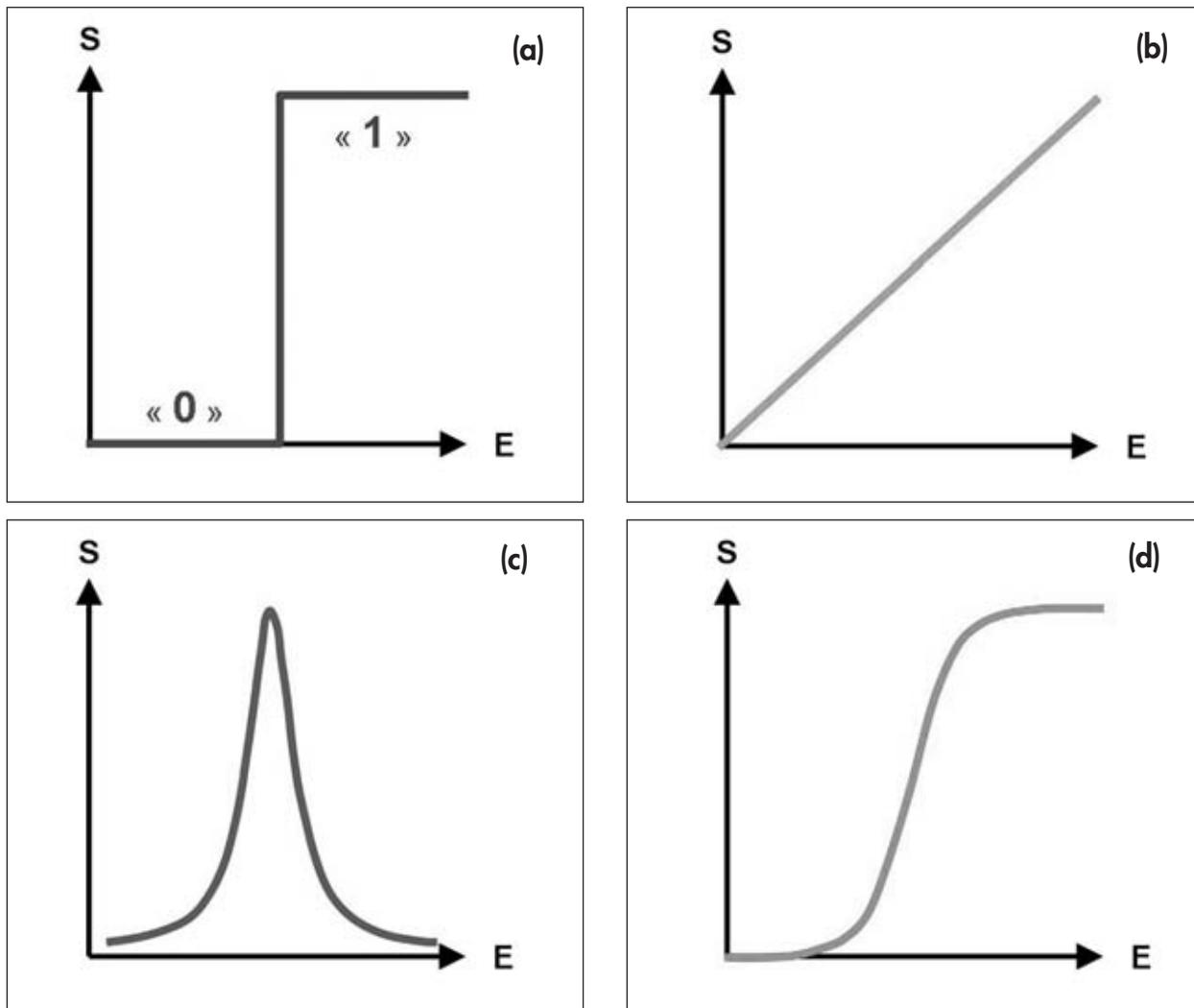
Au-delà de la prise en compte du manque de contrôle inhérent à la taille des nano-objets, c'est l'exploitation de la grande diversité des fonctions obtenues avec des composants nanométriques qui offre de riches perspectives. En effet, le traitement de l'information, même s'il fait largement appel aux techniques numériques, peut souvent être réalisé plus efficacement à l'aide d'autres techniques, dans un certain nombre d'applications (voir la figure 6, ci-après).

La fonction seuil (du type « tout ou rien ») est bien adaptée au traitement logique et numérique où l'information est représentée avec des « 0 » et des « 1 ». Il est toutefois prouvé que, pour des fonctions relativement peu complexes, le traitement analogique de l'information est plus économe en énergie et qu'une fonction de

transfert linéaire est idéale, pour ce genre de calcul. Pour sélectionner un signal parmi beaucoup d'autres, l'utilisation d'un filtre est très efficace : on ne transmet que le signal qui correspond à une valeur d'entrée donnée, d'où la forme très « piquée » de la courbe de transfert. Enfin, d'autres fonctions trouvent des applications dans des domaines spécialisés, comme la fonction sigmoïde, qui matérialise le seuil d'activation d'un neurone dans les réseaux artificiels de neurones.

Le Graal auquel les chercheurs aspirent est l'invention d'approches qui représentent réellement une rupture dans le traitement de l'information ; le cerveau continue à représenter une énigme qui interpelle beaucoup d'entre eux. Alors que l'unité élémentaire de traitement de l'information de notre cerveau, le neurone, est un bien mauvais « composant », volumineux et lent (en regard des transistors actuels), le cerveau arrive à réaliser des tâches comme la reconnaissance d'images avec une grande efficacité énergétique (quelques dizaines de watts) et ce, dans un volume réduit (de l'ordre du  $\text{dm}^3$ ), là où les ordinateurs actuels les plus puissants échouent. Dois-je rappeler, que malgré des progrès significatifs obtenus dans les neurosciences, nous sommes encore loin de comprendre la manière dont notre cerveau fonctionne ?

Le monde quantique, lequel s'exprime à l'échelle atomique, ouvre de nouvelles perspectives – révolutionnaires – dans le domaine du traitement de l'information. On a prouvé théoriquement qu'en utilisant certaines de ses propriétés qui n'ont pas d'équivalent dans le macro-monde (l'« intrication »), on pourrait résoudre des problèmes encore insolubles pour nos calculateurs les plus puissants (optimisation de flux d'approvisionnement, déchiffrement de messages cryptés...). Toutefois, les démonstrations expérimentales, souvent très lourdes, ne permettent guère de dépasser le stade de résultats triviaux (du style  $15 = 3 \times 5$ ) et certains s'interrogent quant à la capacité du calcul quantique à aborder des problèmes réellement complexes, notamment à cause d'un taux d'erreur élevé. Il ne faut toutefois pas « jeter le bébé avec l'eau du bain » : en s'appuyant sur les mêmes concepts, on a montré expérimentalement qu'il était possible d'acheminer des messages sans possibilité d'intrusion et de falsification, et



**Figure 6** : Fonctions couramment utilisées en traitement de l'information (sur chacune de ces quatre figures,  $E$  représente la valeur du signal d'entrée et  $S$  celle du signal de sortie) :

- (a) fonction seuil, utilisée en traitement numérique de l'information ;
- (b) fonction linéaire, pour le traitement analogique du signal ;
- (c) fonction lorentzienne, utilisée en filtrage ;
- (d) fonction sigmoïde, utilisée dans les réseaux artificiels de neurones.

certaines chercheurs commencent à réfléchir à la possible exploitation commerciale de tels systèmes de transmission sécurisés.

## EN CONCLUSION

Bien que parfois fort différentes dans leurs applications, on observe une synergie croissante entre les nanotechnologies et la microélectronique (rebaptisée nanoélectronique dans les années 2000, pour mettre exergue la taille minuscule du transistor élémentaire). S'agissant, dans les deux cas, d'objets nanométriques, il y a certainement une convergence d'intérêts entre ces deux technologies : il s'agit en effet, dans les deux cas, de mesurer et de modéliser ces objets afin de mieux les comprendre et d'en améliorer les performances. Mais

au-delà de cette alliance ponctuelle, c'est bien la richesse des fonctionnalités que permet l'échelle nanométrique qui pourrait déboucher sur la découverte de composants (ou de systèmes) plus performants que ceux auxquels le traitement numérique de l'information nous a habitués en utilisant des circuits intégrés composés de générations de transistors d'une taille de plus en plus réduite.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. W. Urban, *Studying Atomic Structures by Aberration-Corrected Transmission Electron Microscopy*, Science, vol. 321, no. 5888, pp. 506 – 510 (2008).
- [2] A. Chabli, *Characterization of Integrated Nano-Materials*, dans 2009 International Conference on

Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics. (La présentation est accessible sur la toile à l'adresse [http://www.eeel.nist.gov/812/conference/2009\\_presentations/Chabli.pdf](http://www.eeel.nist.gov/812/conference/2009_presentations/Chabli.pdf)).

[3] J. J. Welser, G. I. Bourianoff, V. V. Zhirnov, and R. Keary Cavin III, *The quest for the next information pro-*

*cessing technology*, J. Nanopart. Res., vol. 10, pp. 1–10 (2008).

[4] J. Rabaey, *Curing the ailments of nanometer CMOS through self-healing and resiliency*, dans IEEE International SoC Conference (2006).

[5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stochastic\\_resonance](http://en.wikipedia.org/wiki/Stochastic_resonance)