

fonction logique simple. Des éléments de stockage de l'information ont également été obtenus. Dans notre interrupteur à torsion, notamment, nous avons changé l'unité électriquement active (le noyau benzénique central avec ses groupes nitro  $-\text{NO}_2$  et amine  $-\text{NH}_2$  opposés) en conservant seulement le groupe nitro, qui «aspire» les électrons. Ainsi les orbitales moléculaires pouvaient se modifier : elles s'étaient ou se localisaient selon l'état de charge du groupe central. Autrement dit, l'absence ou la présence de charge dans le groupe central modifie la conduction de la molécule. En chargeant le groupe nitro, nous blo-

quons la conduction, ce qui correspond à un «0» binaire. En revanche, quand aucune charge n'est stockée dans le groupe nitro, la conduction est forte, ce qui correspond à un «1» binaire.

Cette mémoire moléculaire conserve l'information pendant près de dix minutes, ce qui est bien supérieur à la durée de stockage dans les composants de mémoire vive (ou DRAM, pour *dynamic random access memory*) en silicium : ces derniers ne conservent l'information que pendant quelques millisecondes, de sorte qu'ils doivent être régulièrement «rafraîchis» par un circuit externe. La construction de l'élément de mémoire, qui n'a nécessité

qu'une modification simple de l'interrupteur à torsion, démontre la flexibilité et la facilité de transformation des mécanismes à l'échelle moléculaire.

## Avis de recherche

Pourquoi les ingénieurs de recherche n'ont-ils pas encore abandonné l'étude des semi-conducteurs pour se consacrer aux systèmes moléculaires ? Parce que des problèmes fondamentaux subsistent.

D'une part, personne n'a encore construit de transistor moléculaire. Un transistor a trois bornes : l'une d'entre elles commande la circulation du cou-

## L'électronique des molécules isolées

Les équipes qui s'intéressent à l'électronique moléculaire suivent généralement deux voies : certaines réalisent des composants moléculaires constitués de monocouches de molécules identiques ; d'autres s'intéressent aux propriétés mécaniques ou électroniques de molécules isolées. Au Centre d'élaboration de matériaux et études structurales, à Toulouse, nous nous consacrons exclusivement à la seconde voie, réunissant des compétences pour synthétiser des composants moléculaires, étudier les techniques d'interconnexion électriques, mécaniques ou optiques de ces composants, et élaborer la théorie de ces nouveaux systèmes.

Grâce à ces analyses théoriques et aux expériences qui les guident, nous optimisons notamment la composition chimique de fils moléculaires, afin de réduire l'affaiblissement des signaux électroniques sur la longueur des fils. Nous synthétisons des composés moléculaires modèles «à valence mixte», où la partie organique guide les électrons au cours du transfert entre deux atomes métalliques. Nous étudions ainsi des prototypes de commutateurs moléculaires, en expliquant leur fonctionnement par des mouvements électroniques précis, dans les molécules.

Nous explorons également des composants moléculaires où la connexion entre la molécule et des nano-électrodes métalliques est définie et reproductible. À cette fin, nous utilisons des microscopes à effet tunnel, en collaboration avec le Groupe *Nanoscale Sciences* des Laboratoire de recherche d'IBM à Zurich), et des nano-jonctions planes entre un métal, un isolant et un métal (MIM). En 1995, nous avons réalisé la première connexion électrique sur une seule molécule. Cette expérience faisait suite à la réalisation du premier commutateur avec un seul atome dans les laboratoires de recherches d'IBM à San José. Elle a été suivie, en 1996, par la réalisation d'un contact électrique sur un et deux atomes par la même équipe (dans l'expérience de P. Weiss citée par M. Reed et J. Tour, le microscope à effet tunnel n'a pas de contact avec les composants moléculaires ; il sert seulement à former une image).

Puis, à Toulouse, en 1997, nous avons inventé le premier amplificateur moléculaire utilisant une seule molécule : le fullérène  $\text{C}_{60}$ , composé de 60 atomes de carbone. Enfin, nous avons réalisé la première caractérisation électrique d'un fil moléculaire en 1999 : sur la surface en gradins d'un métal, nous avons placé ce fil, qui est comme une longue planche conductrice pourvue de «pattes» isolantes (voir *Pour la Science*, décembre 1999, page 76) ; en plaçant la pointe du microscope à diverses distances du bord métallique sur lequel repose un de ces fils, on mesure le passage du courant tunnel en fonction de la distance traversée.

En 1998, un très beau travail effectué à l'Université de Delft a permis de dépasser le cadre des expériences de laboratoires avec un microscope à effet tunnel, en réalisant le premier transistor moléculaire plan dont le canal source-drain est constitué par un seul nanotube de carbone de 1,4 nanomètre de diamètre. Notre maîtrise de la fabrication de nano-jonctions MIM entre électrodes distantes de moins de cinq nanomètres permet la réalisation des mêmes transistors avec une grille intégrée à la surface du dispositif. En outre, nos techniques de «peignage moléculaire» permettent la fabrication en parallèle de ces transistors à la surface de silicium monocristallin.

Une autre approche est utilisée par une équipe du CEA, à Saclay, qui a réussi la synthèse chimique et l'auto-assemblage de jolis fils moléculaires sur des nano-jonctions. L'auto-assemblage est clairement une méthode prometteuse.

L'Europe a toujours été et reste à la pointe dans le domaine de l'électronique moléculaire. L'Union européenne finance de nombreux projets de recherche en nano-électronique (moléculaire ou pas) dans le cadre du programme *Information Science and Technology* (« sciences et techniques de l'information ») et les États membres sont également très intéressés par les nanosciences. Non seulement la voie est tracée, mais la discipline progresse rapidement.

Christian JOACHIM et Jean-Pierre LAUNAY  
Groupe électronique moléculaire, CEMES-CNRS, Toulouse