



2. CETTE LONGUE MOLÉCULE pourrait relier les composants moléculaires. Elle a été synthétisée par l'un des auteurs (J. Tour), qui a mis au point une nouvelle stratégie de synthèse. On caractérise aujourd'hui ses propriétés de conduction du courant électrique.

thétisé une molécule dont la conductivité électrique change quand on lui communique des électrons, et qui servirait ainsi de mémoire.

Pour obtenir notre interrupteur réversible, tout d'abord, nous avons introduit dans les molécules des groupes d'atomes qui piègent les électrons, mais seulement quand les molécules sont soumises à des différences de potentiel ; ainsi, les molécules laissent plus ou moins circuler les électrons selon la différence de potentiel qu'on leur applique. En faisant varier cette différence de potentiel, nous avons fait passer plusieurs fois de suite les molécules d'un état conducteur à un état isolant, ce qui est la caractéristique des interrupteurs électriques. Notre dispositif était constitué d'une couche de molécules de nitrosamine benzénethiol (environ un millier de molécules, au total), en sandwich entre des contacts métalliques.

Cet interrupteur fut le point de départ du travail qui a conduit à la molécule mémoire : nous avons voulu transformer la molécule interrupteur, afin qu'elle retienne les électrons, au lieu de les piéger temporairement. Quand nous avons ainsi modifié la partie de la molécule qui piège les électrons, afin que sa conductivité puisse être modifiée plusieurs fois, nous avons obtenu une «ventouse à électrons» qui retient les électrons pendant près de dix minutes, ce qui est très satisfaisant, puisque les mémoires dynamiques classiques, construites sur du silicium, ne retiennent les électrons que quelques millisecondes.

Ces résultats sont encourageants, mais des difficultés considérables subsistent. Si la création de dispositifs monomoléculaires est un premier pas essentiel, les chimistes devront apprendre à déposer des millions, voire des milliards de molécules actives de types différents sur un support et à les relier afin qu'elles forment un circuit prédéterminé.

Audace contrainte

Pourquoi ces résultats récents ont-ils fait couler tant d'encre, alors que les difficultés sont loin d'être résolues ? Sans doute parce que la société moderne s'inquiète des limites de la microélectronique actuelle. Fondée sur l'usage de semi-conducteurs tel que le silicium, la microélectronique vérifie la loi de Moore : le nombre de transistors des circuits intégrés (et la vitesse de calcul de tels circuits) double tous les 18 à 24 mois. Après quatre décennies de progrès, les ingénieurs mettent environ 100 millions de transistors sur de minces tranches de silicium de quelques centimètres carrés seulement ; le diamètre des éléments actifs a été réduit à 0,18 micromètre de diamètre.

Ces transistors sont bien plus gros que les dispositifs moléculaires : un transistor à semi-conducteurs est à une page de ce magazine ce qu'un mécanisme moléculaire est au point qui termine cette phrase. D'ici à 12 ans, la taille des transistors à semi-conducteurs sera réduite à 120 nanomètres environ, mais la surface occupée sera encore 60 000 fois supérieure à celle des composants électroniques moléculaires.

En outre, personne ne croit vraiment que la loi de Moore sera toujours vérifiée. Un moment viendra où, pour des raisons économiques, les ingénieurs ne pourront plus miniaturiser les circuits. De surcroît, dans des circuits trop petits, les signaux interféreront, on dissipera difficilement la chaleur dégagée par les composants... et l'on fabriquera difficilement ces derniers.

Déjà, la fabrication et l'interconnexion des plus petits transistors en silicium deviennent difficiles, bien que les limites fondamentales soient encore lointaines. De nombreux ingénieurs pensent que les difficultés s'aggraveront beaucoup quand la taille des transistors sera réduite au dixième de micromètre. En outre, la miniaturisation des circuits intégrés et l'augmentation de leur vitesse de calcul imposent la construction d'usines dont le coût augmente exponentiellement ; à terme, la miniaturisation se heurtera à des coûts de production excessifs. Les spécialistes pensent que cette limite sera atteinte vers 2015 (peut-être même

avant), quand les unités de production coûteront mille milliards de francs.

À ce stade, les puces n'auront pas encore la puissance et la vitesse nécessaires pour exécuter les programmes qui donneraient aux robots des capacités intellectuelles et cognitives égales à celles de l'homme.

Des manipulations d'électrons

Les mécanismes moléculaires sont minuscules, évidemment, mais ils ont bien d'autres avantages. Pour comprendre lesquels, examinons comment le confinement d'électrons dans des régions limitées à quelques atomes confère des fonctions logiques à des molécules.

Alors qu'un électron libre peut avoir n'importe quelle énergie, les électrons des atomes ou des molécules ont des énergies quantifiées : ils ne peuvent avoir que certaines énergies, qui caractérisent des états que l'on représente comme des barreaux d'échelle diversement espacés. Cette quantification de l'énergie s'observe dans tout système où les électrons sont confinés. Dans les molécules, notamment, les électrons établissent des liaisons entre les atomes, en se disposant principalement autour d'eux, formant des «nuages» que l'on nomme des orbitales. La forme d'une orbitale est déterminée par le type d'atomes qui interagissent. À chaque orbitale correspond une énergie particulière des électrons.

Même les plus petits des microtransistors à semi-conducteurs sont beaucoup trop gros pour que le comportement quantique des électrons se manifeste (les électrons n'y sont pas assez confinés). Dans ces systèmes, le mouvement des électrons est encore déterminé par les énergies permises, qui se répartissent en bandes : la variation d'énergie est continue dans les gammes d'énergie correspondant aux bandes, qui sont très larges par rapport aux niveaux d'énergie des atomes isolés ou des molécules. De ce fait, les électrons ont souvent assez d'énergie pour passer d'un composant à un autre, et quand les circuits classiques ont une taille de l'ordre de quelques centaines de nanomètres, on bloque difficilement