



en tissant des textiles (c) ou en assurant le service téléphonique du voisinage (d) – rehausse son statut au sein de son foyer, l'aide à contrôler les naissances, et lui permet de mieux s'occuper de ses enfants, comme l'atteste la mesure de paramètres qui reflè-

tent l'état nutritionnel (diagramme). Les femmes sont aussi plus consciencieuses dans leur remboursement des crédits. Pour ces raisons, les programmes de microcrédit s'adressent plus spécifiquement aux femmes.

aux États-Unis, à Chicago par exemple. Malheureusement, comme le coût de la vie est bien supérieur aux États-Unis que dans les pays en développement, où de nombreux diplômés sans emploi peuvent faire fonction de directeur ou de comptable, ces opérations sont bien plus chères. Dans les pays industrialisés, les programmes de microcrédit doivent être lourdement subventionnés.

À travers le monde, 22 millions de personnes ont maintenant accès à des petits crédits. *Microcredit Summit*, un institut installé à Washington, centralise les ressources et les redistribue aux instituts régionaux. En 1999, au cours de la conférence sur le microcrédit, les participants se sont engagés à fournir des crédits aux femmes de 100 millions de familles les plus pauvres du monde, d'ici l'an 2005. Cette énorme campagne est relayée par plus de 2 000 organisations aussi diverses que des banques, des institutions religieuses, des organisations non gouvernementales et des agences des Nations unies.

Selon le scénario classique, le développement économique d'un pays pauvre passe par l'investissement, qui permet l'industrialisation. De ce point de vue, le seul moyen d'en finir avec la pauvreté est la création d'emplois. Cependant, pour la plupart des pays en développement, l'augmentation de l'emploi industriel engendre la désertification des cam-

pagnes au profit des villes et crée des emplois sous-payés dans des conditions déplorables.

Je crois plutôt que l'éradication de la pauvreté commence quand les individus maîtrisent leur destinée. On n'aide pas les pauvres en créant des emplois, mais en leur donnant l'occasion de mettre en œuvre leurs idées. Année après année, je constate que les pauvres sont pauvres non pas parce qu'ils seraient paresseux, incompetents ou illettrés, mais parce qu'ils ne peuvent pas garder le fruit de leur travail. Créer leur propre emploi est sans doute la seule solution pour ces exclus de notre économie, qui ne bénéficient ni de prêts ni des impôts. En fondant la banque *Grameen*, nous avons supposé que chaque personne est un entrepreneur potentiel. Le démarrage de ces petits moteurs économiques, habituellement rejetés par la société, est un grand changement économique.

En appliquant cette idée, la banque *Grameen* a déjà permis la création de plus de 12 entreprises, souvent en partenariat avec d'autres entrepreneurs. En aidant les petits emprunteurs et les petits épargnants à acquérir de grosses entreprises, nous accélérons l'éradication de la pauvreté. Par exemple, la compagnie de téléphone cellulaire *Grameen Phone* a pour objectif de desservir les zones rurales et urbaines du Bangladesh. Après une étude pilote sur 65 villages, cette

société a emprunté afin de s'étendre à tous les villages où la banque était active. Environ 50 000 femmes, dont la plupart n'ont jamais vu un téléphone ni une lampe électrique, assureront le service téléphonique dans leurs villages. Par la suite, elles deviendront propriétaires de la compagnie en rachetant ses actions. Grâce à notre dernière innovation, la *Grameen Investment*, des particuliers peuvent investir dans des compagnies comme la *Grameen Phone* et percevoir des intérêts. C'est une étape capitale pour trouver les fonds nécessaires et en finir avec la pauvreté.

Tout pays civilisé doit garantir à chacun une vie décente et lui permettre de réaliser ses objectifs. La pauvreté est créée non par les pauvres, mais par les institutions et les lois que nous avons établies. Par l'abandon de vieux concepts au profit d'idées radicalement nouvelles, nous résoudrons ce problème.

Muhammad YUNUS, fondateur de la banque *Grameen*, est né au Bangladesh. Après une thèse d'économie à l'Université Vanderbilt, il est retourné dans son pays natal en 1970.

M. YUNUS, *Vers un monde sans pauvreté*, J.-C. Lattès, 1997.

S. R. KHANDKER, *Fighting Poverty with Microcredit : Experience in Bangladesh*, Oxford University Press, 1998.

Les ordinateurs moléculaires

MARK REED • JAMES TOUR

Les chimistes synthétisent des molécules qui stockent ou qui modifient l'information. Ils cherchent aujourd'hui à assembler ces molécules pour construire des ordinateurs moléculaires

Quelles sont les limites de l'informatique? De combien augmentera-t-on encore la puissance ou la rapidité des ordinateurs? Créera-t-on, un jour, des «cerveaux» artificiels aux capacités intellectuelles comparables (ou supérieures) à celles des êtres humains? Pour répondre à ces questions, on doit d'abord chercher quelles sont les possibilités de miniaturisation des circuits électroniques.

Peu d'ingénieurs croient encore que la microélectronique actuelle – avec des circuits créés à partir de semi-conducteurs – permettra la construction de circuits assez complexes et denses pour donner aux ordinateurs de réelles compétences cognitives. Encore récemment, aucune technique n'était assez fiable ni intéressante pour supplanter la microélectronique classique. Toutefois, ces dernières années, les chimistes ont obtenu des résultats qui pourraient bouleverser l'informatique. Bien qu'ils aient encore beaucoup à faire, la découverte d'une voie qui conduirait à la fabrication de machines intelligentes est déjà un succès.

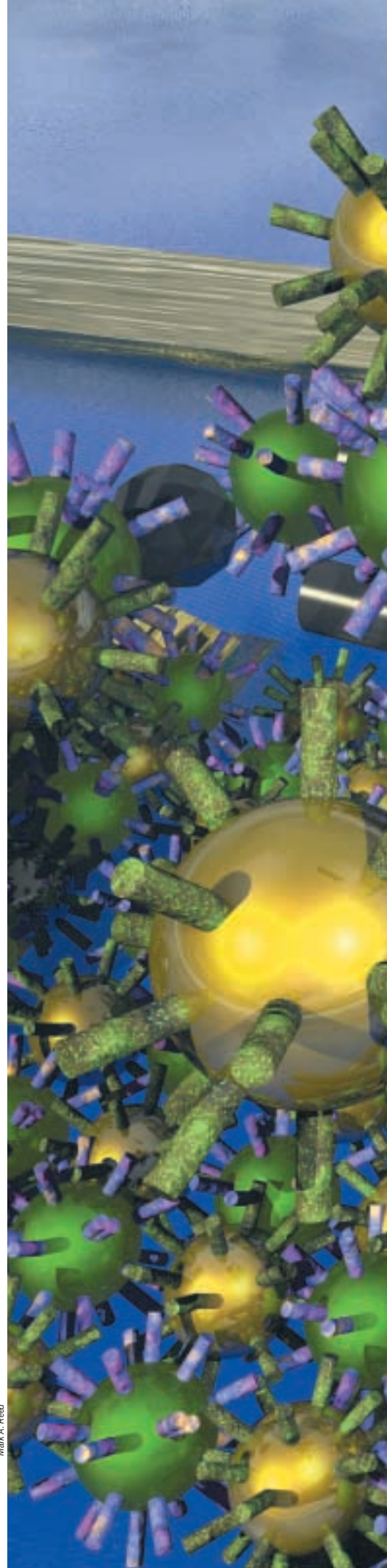
Les récentes avancées sont celles de l'«électronique moléculaire»: les chimistes de cette discipline synthétisent

des molécules qui auraient des fonctions identiques ou analogues à celles des transistors, des diodes, des conducteurs ou des autres composants qui constituent les microcircuits actuels. Après une période d'optimisme, avec peu de résultats, plusieurs équipes ont obtenu des éléments logiques ultraminiaturisés: des molécules individuelles peuvent conduire ou bloquer un courant électrique, et stocker de l'information.

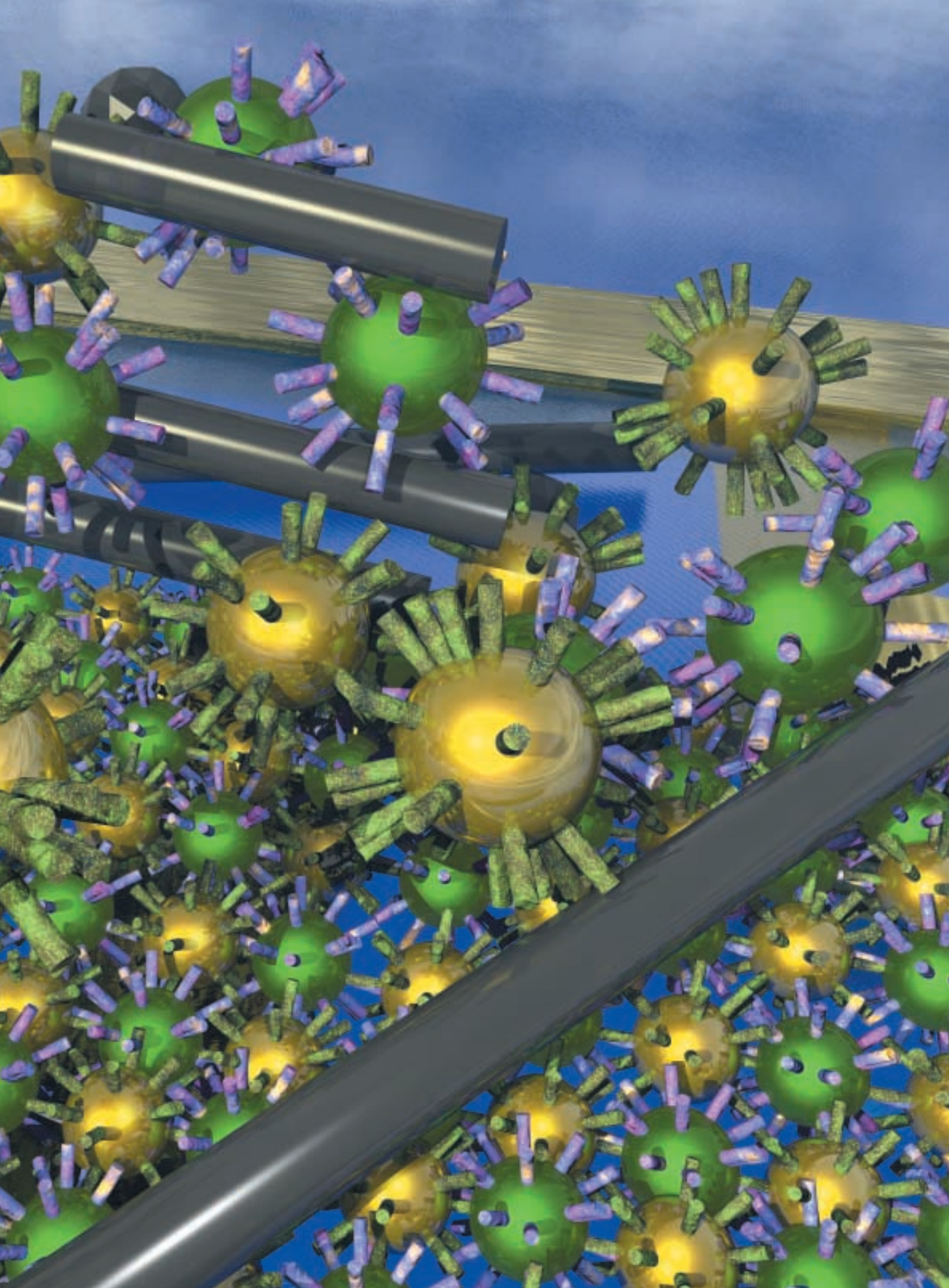
Ainsi, en juillet 1999, des équipes de la Société *Hewlett-Packard* et de l'Université de Los Angeles ont construit des interrupteurs électroniques en assemblant plusieurs millions de molécules de «rotaxane» en une couche d'une seule molécule d'épaisseur. En reliant certains de ces interrupteurs, ils ont obtenu une porte AND, c'est-à-dire un dispositif qui laisse passer le courant quand les deux entrées le laissent simultanément passer. Composés chacun d'un million de molécules environ, ces interrupteurs sont beaucoup plus gros qu'on ne le voudrait; en outre, ils ne fonctionnent qu'une seule fois.

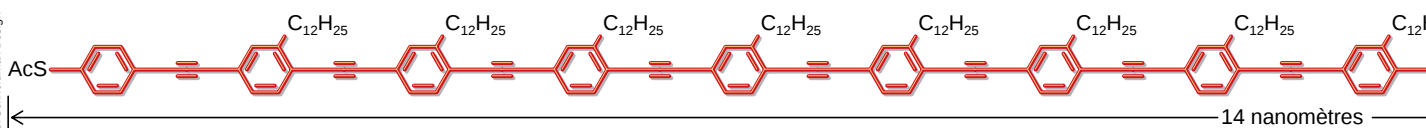
Quelques mois plus tard, nos collègues et nous-mêmes avons montré que des molécules d'une autre classe se comportent comme des interrupteurs réversibles; puis nous avons syn-

1. UN CIRCUIT ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE serait constitué de molécules qui assureraient chacune une fonction électronique, reliées par des molécules qui serviraient de connecteurs. Sur cette représentation imaginée par l'un des auteurs, les composants moléculaires sont les minuscules éléments cylindriques liés aux sphères; ces dernières seraient soit des particules semi-conductrices assurant le stockage des données (en vert), soit des particules d'or servant de connecteurs électriques. Ces groupes d'objets seraient reliés par des nanotubes de carbone (tiges noires plus épaisses). Les blocs noirs rectangulaires sont des connecteurs qui servent à relier ce microcircuit aux circuits extérieurs plus classiques.



Mark A. Reed





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.

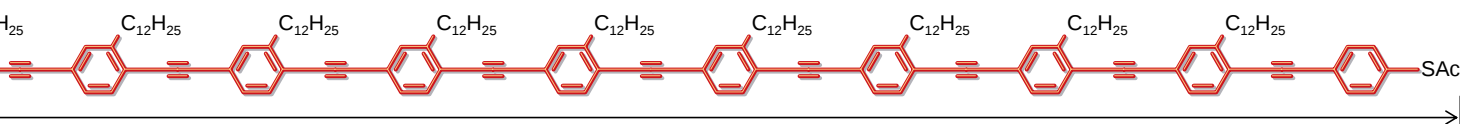
À ce stade, les puces n'auront pas encore la puissance et la vitesse nécessaires pour exécuter les programmes qui donneraient aux robots des capacités intellectuelles et cognitives égales à celles de l'homme.

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



les infimes courants qui constituent l'information : ceux-ci passent d'un composant à son voisin, de sorte que les ingénieurs doivent équiper les mémoires de systèmes supplémentaires qui régénèrent l'information.

Les techniques de la pharmacie

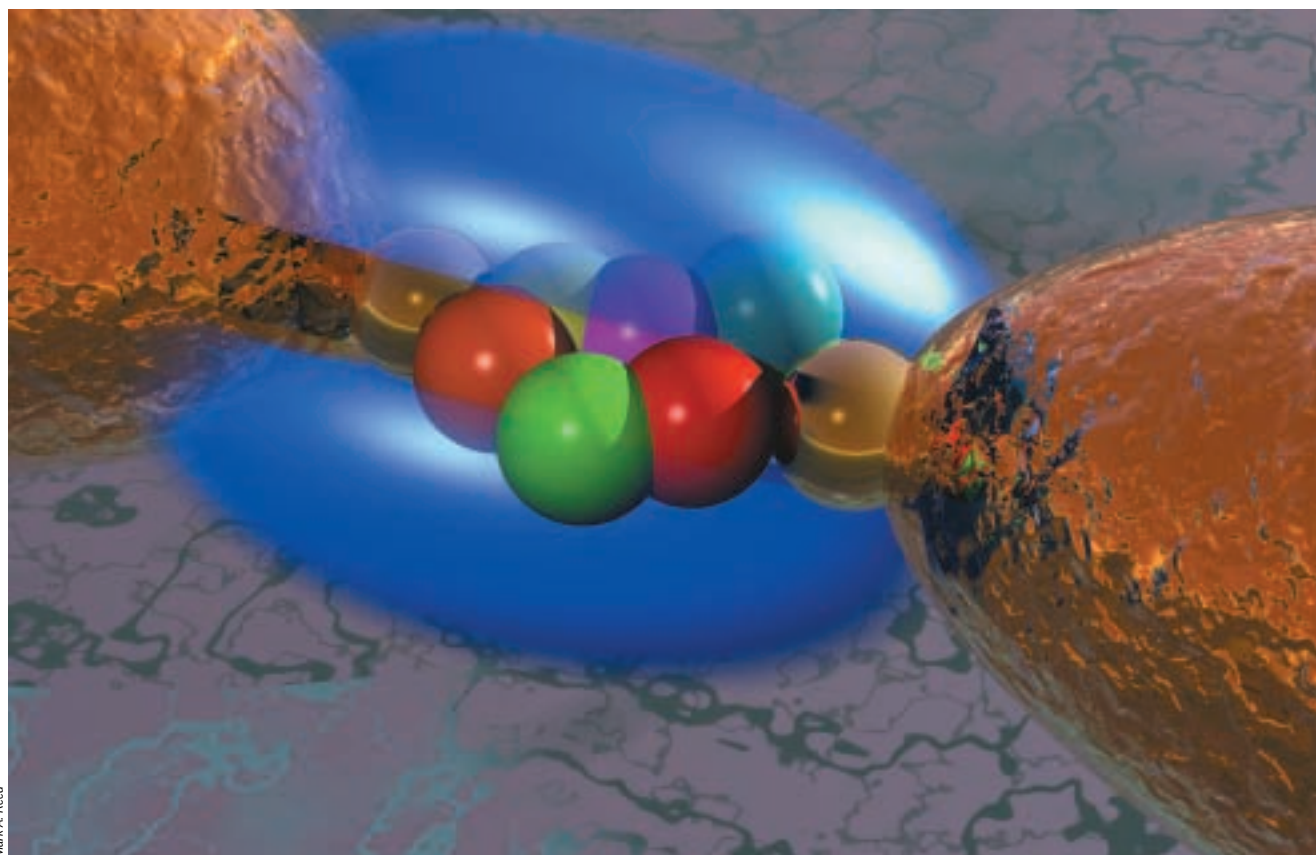
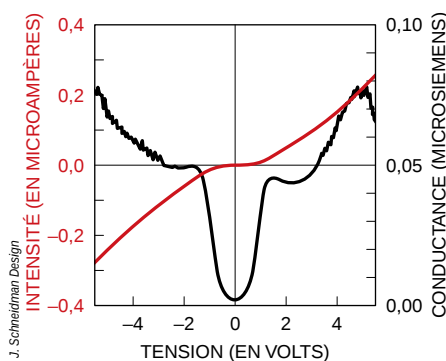
En utilisant habilement les phénomènes quantiques, on peut aussi donner à des molécules des fonctions inédites. Par exemple, pour obtenir un connecteur moléculaire, on doit utiliser une molécule allongée où les électrons circulent facilement. Dans toute structure, les électrons passent des états d'énergie élevée vers des états d'énergie inférieure ; aussi, pour canaliser les électrons, on doit utiliser une molécule dont l'orbitale vide et de faible énergie s'étend d'un bout à l'autre de la molécule. Les « orbitales pi » sont précisément de ces orbitales vides de faible énergie ; et la

configuration où les nuages d'électrons se chevauchent entre groupes d'atomes voisins est « conjuguée ». Au total, notre connecteur moléculaire est un système à liaisons pi conjuguées.

Un composant actif, tel un transistor, ne se limite pas à une conduction des électrons ; il en règle la circulation. Pour l'obtenir, les concepteurs de composants moléculaires organisent les niveaux d'énergie ; ils cherchent à créer des molécules dont

les caractéristiques orbitales remplissent la fonction électronique visée. Par exemple, avec un recouvrement d'orbitales bien conçu, les électrons circulent dans la molécule. Cependant, quand le recouvrement est perturbé (en raison d'une torsion de la molécule, par exemple), l'écoulement est bloqué. Autrement dit, on modifie la conduction électrique en perturbant le recouvrement d'orbitales dans une molécule.

Par des méthodes classiques de synthèse chimique, les chimistes fabriquent déjà des molécules ayant des atomes, des structures et des agencements d'orbitales spécifiques. La synthèse procure des quantités considérables de ces molécules, toutes identiques et sans défaut. Une telle uniformité est quasi inaccessible par les autres procédés de fabrication, telle la technique de photolithographie que l'industrie microélectronique utilise pour produire les millions de transistors d'un circuit inté-



3. LE BENZÈNEDITHIOL est un conducteur moléculaire que l'on a placé entre deux pointes d'or afin d'enregistrer ses caractéristiques électriques (la relation entre l'intensité du courant et la différence de poten-

tiel appliquée, indiquée sur la courbe). Ces dernières sont conformes aux prévisions théoriques. La capacité de conduire des courants intenses sera un atout pour la réalisation de composants moléculaires.

gré (on dépose une couche photosensible sur du silicium, puis on expose certaines parties de la surface à l'aide de rayonnements à qui l'on fait traverser un cache où est dessiné le motif à réaliser ; enfin on attaque chimiquement la couche exposée, et on dépose ensuite d'autres couches que l'on continue ainsi d'attaquer de façon spécifique).

Les méthodes de synthèse des dispositifs moléculaires sont les mêmes que celles de l'industrie pharmaceutique. Les chimistes partent d'un composé et le transforment progressivement, en ajoutant les réactifs appropriés, qui se lient en des sites précis. La synthèse nécessite parfois de nombreuses étapes, mais, progressivement, les morceaux s'assemblent pour former le dispositif moléculaire qui a les orbitales voulues. Quand les molécules visées sont obtenues, on utilise des techniques analytiques, telles la spectroscopie infrarouge, la résonance magnétique nucléaire ou la spectroscopie de masse, pour déterminer ou confirmer la structure des molécules synthétisées. Ces diverses analyses apportent des informations différentes sur les molécules, notamment leur masse moléculaire, les angles entre les liaisons chimiques adjacentes, etc. En combinant ces informations, on détermine la structure de la molécule à chaque étape de sa synthèse.

Un de nos premiers dispositifs actifs était construit autour d'un groupe de trois noyaux benzéniques (avec, pour chacun, six atomes de carbone liés selon un cycle hexagonal), dont les orbitales se chevauchaient (elles étaient «conjuguées»). Nous avons affaibli les connexions entre les noyaux benzéniques, afin que de légères torsions ou ondulations affaiblissent ou bien renforcent la conjugaison des orbitales. Il ne manquait alors plus qu'une commande de cette torsion pour que l'on règle la circulation du courant dans la molécule.

De part et d'autre du noyau benzénique central de la molécule, nous avons ajouté des groupes nitro ($-\text{NO}_2$) et amine ($-\text{NH}_2$). Le nuage d'électrons est alors asymétrique, ce qui rend la molécule sensible aux champs électriques : un champ électrique appliqué à la molécule fait tourner le groupe benzène central. Nous avons ainsi un dispositif actif : chaque fois que nous appliquons une différence de potentiel entre les extrémités de la molécule, le champ électrique engendré déforme la molécule et interrompt la circulation du courant.

Quand on supprime la différence de potentiel, la molécule retrouve immédiatement sa forme initiale, et le courant circule à nouveau. La vitesse de commutation de la molécule est supérieure à celle de n'importe quel interrupteur à semi-conducteur.

Si la synthèse des dispositifs moléculaires est difficile, ce sont surtout les caractérisations électroniques qui ont ralenti la recherche. La difficulté essentielle était la mise au point de dispositifs de mesure de courants à des échelles moléculaires. Les progrès ont été favorisés par l'invention du microscope à effet tunnel, dans les années 1980, puis des microscopes à force atomiques qui en sont dérivés. Ces microscopes montrent les atomes et les molécules, et les déplacent même, sur des surfaces : une pointe métallique extrêmement fine, déplacée avec précision au-dessus d'une surface, enregistre la topographie de la surface et ses caractéristiques chimiques grâce à d'infimes courants électriques dus aux électrons qui s'échangent par effet tunnel entre la surface et la pointe (purement quantique, l'effet tunnel correspond à une probabilité non nulle de franchissement des barrières d'énergie par des particules). En balayant la surface avec la pointe, on obtient une image de la surface.

On assemble les composants moléculaires et on teste les associations par la microscopie à effet tunnel, mais, pour construire un ordinateur moléculaire, on devra regrouper un très grand nombre de composants moléculaires sur un support, et on devra organiser leurs interactions. Des méthodes d'auto-assemblage moléculaire semblent utiles pour ce but : en donnant aux molécules à regrouper des structures chimiques appropriées, on obtient leur organisation spontanée, sans intervention extérieure, tout comme des atomes s'ordonnent en cristaux, dans les solides.

La colle moléculaire

Dans nos recherches, nous utilisons l'auto-assemblage pour fixer un très grand nombre de molécules à une surface, généralement métallique (voir la figure 4). Une fois fixées, les molécules (de forme souvent allongée) se détachent en relief de la surface, comme une immense forêt d'arbres tous identiques et disposés de manière parfaitement régulière.

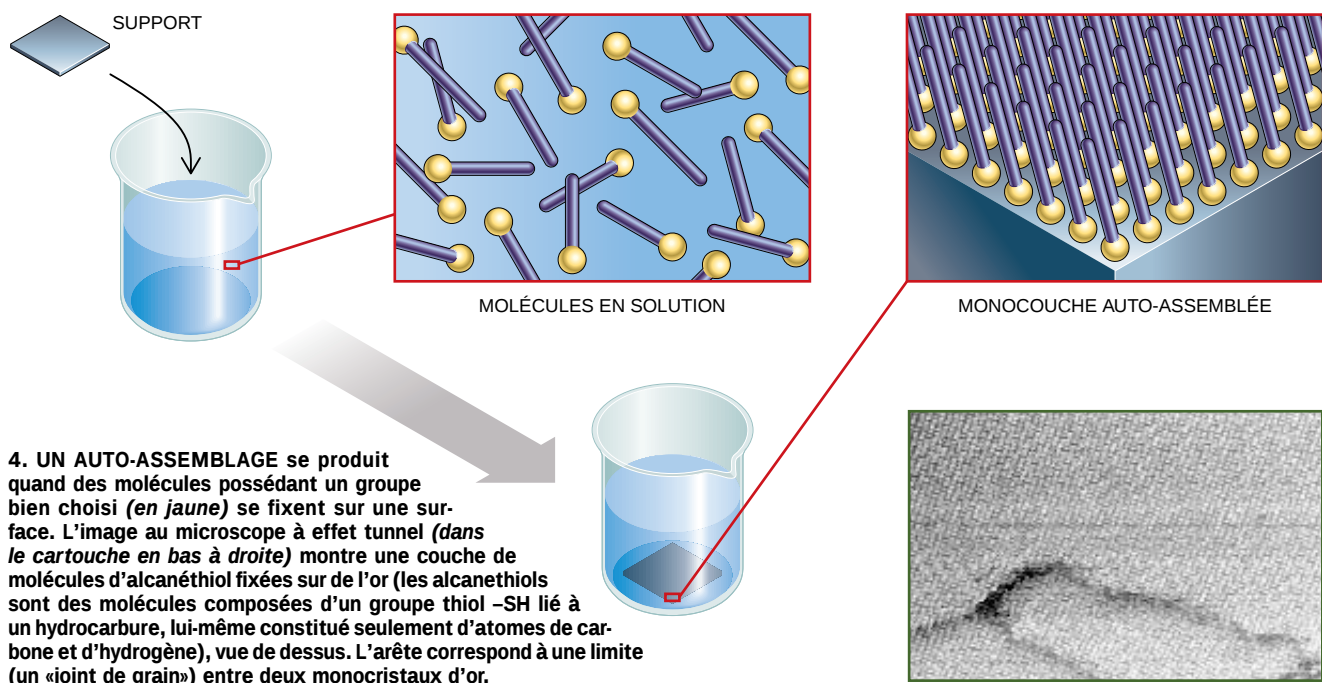
Les chimistes ont déjà étudié des systèmes d'auto-assemblage variés.

Dans nos travaux, nous fixons souvent des ensembles moléculaires à une surface métallique (en général, de l'or). L'affinité du groupe thiol $-\text{SH}$ (composé d'un atome de soufre et d'un atome d'hydrogène) pour l'or assure la fixation des molécules sur les surfaces ou sur la pointe. Pour déclencher l'auto-assemblage, nous plongeons une surface en or dans une solution des composants moléculaires, tous équipés de groupes terminaux thiol aux extrémités. Spontanément, les composants s'accrochent à la surface du métal.

Cet auto-assemblage est simple, mais il ne produit pas encore des circuits moléculaires. Pour obtenir ces derniers, on combine l'auto-assemblage avec d'autres techniques de fabrication, telle la photolithographie. Dans nos études, nous avons déjà utilisé cette technique pour former des couches d'interconnexion, ainsi que des trous dans le matériau isolant déposé. Dans ces trous, nous créons des contacts électriques et des zones où les composés moléculaires s'assemblent. Le système est finalement constitué de régions de molécules auto-assemblées, reliées par un réseau d'interconnexion.

Une démonstration convaincante de l'auto-assemblage appliqué à l'électronique moléculaire a été donnée en 1996 : Paul Weiss et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie ont testé des molécules auto-assemblées que l'un de nous (J. Tour) avait synthétisées. Au cours de leur expérience, P. Weiss et ses collègues mélangèrent en solution des molécules conçues pour avoir des propriétés conductrices, ainsi que des molécules isolantes ; ils obtinrent une couche auto-assemblée où quelques molécules conductrices étaient dispersées parmi les molécules isolantes. En plaçant la pointe d'un microscope à effet tunnel au-dessus d'une des molécules conductrices, ils ont mesuré la conductivité qui, comme prévu, était bien supérieure à celle des molécules environnantes.

Simultanément, à l'Université Yale, l'un de nous (M. Reed) a mesuré les caractéristiques électriques d'une molécule isolée. Plus précisément, M. Reed et ses collègues ont mesuré la quantité de courant qui circulait à travers une molécule isolée. L'élément central du dispositif expérimental était un microscope à effet tunnel modifié, de sorte que l'on puisse placer deux pointes l'une en face de l'autre avec assez de précision et de stabilité mécanique pour «pin-



cer» une molécule (voir la figure 3). La molécule testée était très simple : c'était le benzédithiol, composé d'un noyau benzénique et de deux groupes thiol, de part et d'autre, qui établissent le contact avec les deux pointes du microscope. La résistance de la molécule est de l'ordre de quelques dizaines de millions d'ohms.

On a ainsi déterminé que la molécule supporte un courant de 0,2 microampère sous une différence de potentiel égale à cinq volts : chaque seconde, un million de millions (10^{12}) d'électrons traverse la molécule sans qu'elle se dissocie. Ce courant limite est impressionnant, car les électrons ne traversent la molécule qu'en file indienne ; or on avait prévu qu'un courant intense dégagerait tant d'énergie que la molécule serait dégradée. Les mesures ont fait conclure que les électrons se déplacent dans la molécule sans dégager de chaleur.

Ces observations initiales de la conduction électrique dans les molécules ont été rapidement suivies par la mise au point de composants électroniques. Le plus simple est la diode, qui ne laisse passer les électrons que dans un seul sens. En 1997, Robert Metzger et ses collègues de l'Université de l'Alabama ont synthétisé une molécule où l'arrangement des orbitales dépend de la différence de potentiel appliquée. Dans leur système, l'agencement des orbitales est analogue aux barreaux d'une échelle. En appliquant la différence de potentiel dans un sens, on obtient une échelle dressée contre un

mur, et il faut beaucoup d'énergie pour grimper à l'échelle. Quand la tension a la polarité opposée, l'agencement des orbitales est comparable aux barreaux de l'échelle couchée sur le sol : on passe alors du premier au dernier barreau sans effort.

À Yale, d'autre part, Chong-Wu Zhou a adopté une démarche légèrement différente. Avec sa diode moléculaire, les différences d'alignement des niveaux d'énergie proviennent des contacts de la molécule avec la surface d'un métal. Cette approche donne également de bons résultats et a servi de point de départ pour la conception de composants et de circuits moléculaires plus intéressants et plus utilisables.

Mieux que le transistor

La recherche de tels circuits a commencé par l'étude d'une structure initialement construite par Kristin Ralls et Robert Buhrman, à l'Université Cornell. Cette structure comportait un trou minuscule, appelé nanopore, où l'on créait une «région active» par auto-assemblage d'un nombre relativement faible de composants moléculaires en une seule couche : dans un nanopore de 30 nanomètres de diamètre seulement, on obtient l'auto-assemblage d'un millier de composants moléculaires. Puis on déposait un contact électrique sur la monocouche auto-assemblée en évaporant du métal sous vide.

Après avoir utilisé cette méthode pour produire et tester des diodes molé-

culaires, l'équipe de Yale a rapidement étudié des mécanismes plus complexes : des commutateurs. Ces systèmes sont la base des ordinateurs ; quand ils amplifient aussi le courant, on peut les assembler pour former des circuits logiques complexes. Les transistors des circuits intégrés à base de silicium sont utiles parce qu'ils ont les deux fonctions de commutation et d'amplification.

L'équivalent moléculaire du transistor reste à inventer, mais les chimistes sont sur la bonne voie : l'interrupteur à torsion que nous avons décrit précédemment assure la première des deux fonctions. Ses performances sont remarquables : par exemple, la différence de conductivité entre l'état passant et l'état bloqué est supérieure à 1 000 (pour la diode microélectronique à base de semi-conducteurs, la «diode résonante à effet tunnel», la différence est seulement de l'ordre de 100).

À l'Université de technologie de Los Angeles, d'autre part, des expériences ont également montré que des couches de rotaxanes peuvent servir de diodes : les rotaxanes sont des molécules qui ressemblent à des haltères, où coulisse un anneau ; l'application d'une tension à une jonction contenant les molécules fait coulisser l'anneau d'une position à une autre, ce qui modifie l'alignement des orbitales et bloque la circulation du courant à travers les molécules. En combinant plusieurs jonctions, les chimistes de Los Angeles ont construit un mécanisme capable de remplir une

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 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

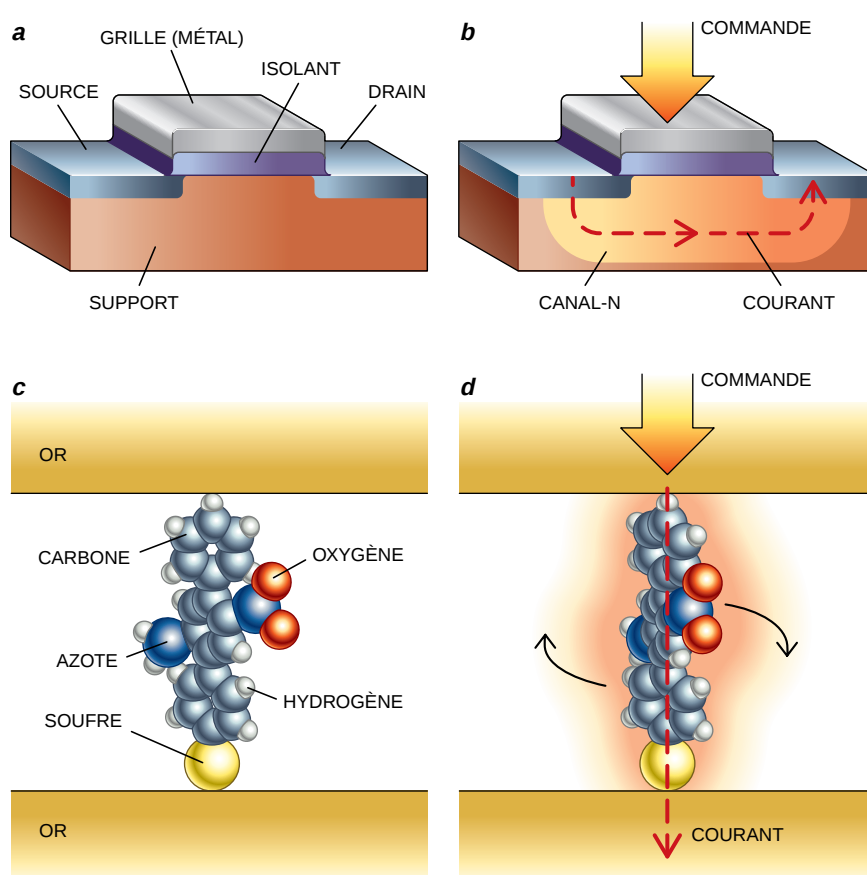
rant entre les deux autres. Notre interrupteur à torsion n'avait que deux bornes, et le courant électrique était réglé par un champ électrique. Dans les transistors à effet de champ des circuits intégrés, le courant est également commandé par un champ électrique, mais le champ est établi par l'application d'une tension à la troisième borne (voir la figure 5).

Un composant moléculaire à trois bornes permettra la réalisation de circuits complexes. Toutefois, avant qu'il soit mis au point, l'industrie microélectronique intégrera sans doute des composants moléculaires dans des circuits électroniques classiques, chaque fois que les avantages de l'auto-assemblage s'imposeront. Ce regroupement de deux mondes donnera du travail aux ingénieurs. Les puces actuelles ont trois échelles caractéristiques. D'abord, ce sont de petits objets que nous pouvons voir et tenir entre les doigts. Les connexions principales sont 1 000 fois plus petites : les connexions les plus larges sont déjà plus fines qu'un cheveu. Enfin les plus petites connexions et les constituants des transistors sont encore 1 000 fois plus petits. Si l'on intégrait des composants moléculaires aux puces, on devrait gérer des structures à des tailles encore 1 000 fois inférieures.

Les problèmes thermiques seront également rédhitoires si les ingénieurs ne trouvent pas de configurations nouvelles. Aujourd'hui un microprocesseur performant, avec dix millions de transistors et un cycle d'horloge d'un demi-gigahertz (un demi-milliard de cycles par seconde), dégage quelque 100 watts.

La connaissance de la quantité de chaleur minimale émise par un composant moléculaire aide à calculer le nombre maximal de composants moléculaires que l'on pourrait déposer sur une puce ou sur tout autre support. Nous avons évalué cette quantité de chaleur pour un fonctionnement à la température ambiante : 50 picowatts environ (50 millièmes de milli-watt) par molécule. Autrement dit, si la seule limitation était la chaleur dégagée au cours des calculs, on pourrait disposer 100 000 fois plus de composants moléculaires qu'on ne dispose de transistors en silicium sur une puce. C'est considérable, mais bien moins que si les dégagements de chaleur étaient évités.

Pour faire notre estimation, nous avons supposé que chaque élément de circuit devrait être «adressable» : n'im-



5. UN MICROTRANSISTOR CLASSIQUE (a) est un interrupteur à trois bornes, nommées respectivement la source, la grille et le drain. L'application d'une tension positive à la grille attire les électrons vers la zone isolante (b), ce qui laisse le courant circuler de la source au drain. Une molécule construite à partir de trois noyaux benzéniques (c) a également été utilisée comme interrupteur électrique. Le noyau central étant asymétrique, on tord la molécule en appliquant un champ électrique (d). Cette torsion favorise le passage du courant.

porte quel élément peut être choisi parmi ses millions d'homologues, par l'intermédiaire des interconnexions. Ce mode d'adressage (que l'on nomme accès direct ou aléatoire) serait nécessaire, par exemple, pour la lecture d'une information dans une mémoire donnée.

Aujourd'hui, on ignore comment on obtiendrait une mémoire faite de composants moléculaires. Les techniques employées par la microélectronique classique ne sont pas transposables à la microélectronique moléculaire. Comment adressera-t-on les mémoires à base de composants moléculaires ? À quoi les circuits à base

de composants moléculaires ressembleront-ils à l'échelle macroscopique ? Connectera-t-on les composants moléculaires à l'aide de nanotubes, des tubes composés uniquement d'atomes de carbone, dont le diamètre est de un à deux nanomètres et la longueur de moins de un micromètre ?

Nous n'avons qu'une très vague idée des changements qui seront nécessaires pour faire progresser l'informatique. Les progrès nécessiteront beaucoup d'inventivité : c'est à cette condition que l'électronique continuera de progresser à son rythme actuel pendant une bonne partie du XXI^e siècle.

Mark REED est président du Département d'électrotechnique de l'Université Yale. James TOUR travaille au département de chimie et au Centre des nanosciences de l'Université Rice.

M.A REED, C. ZHOU, C.J. MULLER, T.P. BURGIN et J.M. TOUR, *Conductance of a Molecular Junction*, in *Science*, vol. 278, pp. 252-254, 10 octobre 1997.

J.R. HEATH, P.J. KUEKES, G.S. SNIDER et R.S. WILLIAMS, *A Defect-Tolerant Computer Architecture : Opportunities for Nanotechnology*, in *Science*, vol. 280, pp. 1716-1721, 12 juin 1998.

Molecular Electronics : Science and Technology, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, sous la direction de A. Aviram et M. Ratner, vol. 852, 1998.



Paradoxes perdus et retrouvés

IAN STEWART

Une analyse logique attentive élimine bien des paradoxes. Ceux qui subsistent révèlent les mécanismes de la pensée.

Les paradoxes logiques sont parmi les problèmes mathématiques les plus troublants. Les plus difficiles d'entre eux sont les énoncés auto-contradictaires, dont le plus connu est : « Cette phrase est fausse ». Pour les analyser, le logicien doit chercher le sens précis des mots. Certains paradoxes qui résistent à un examen sévère montrent les limites de la pensée logique ; d'autres cèdent facilement.

Dans cet article, je vous propose d'examiner quelques paradoxes de ces

deux catégories, avec une appréciation toute personnelle de leur intérêt.

Protagoras, philosophe grec, qui enseignait le droit au ^ve siècle avant notre ère, accepta qu'un de ses élèves ne paie ses leçons qu'après sa première plaidoirie gagnée. Or celui-ci n'eut aucun client et Protagoras menaça de le poursuivre, pensant gagner le procès dans tous les cas : l'élève devait payer si la cour donnait raison à Protagoras, et il devait également payer si elle lui donnait tort, car le jeune homme

aurait alors gagné son premier procès. Cependant, l'élève fit le raisonnement opposé : si Protagoras gagne, l'accord passé stipule qu'aucune somme n'est due, aucun procès n'ayant été gagné par l'élève ; et si Protagoras perd, c'est la cour qui décide qu'aucun argent ne doit lui être versé.

Ces raisonnements amusants sont incohérents : ils soutiennent que l'accord de Protagoras et de son élève est valide pendant une moitié de leur raisonnement, mais ils admettent que la cour est une instance supérieure, au cours de l'autre moitié du raisonnement.

La véritable question est : pourquoi la cour est-elle sollicitée ? Parce qu'elle doit lever les ambiguïtés du contrat et, éventuellement, se substituer à lui : si la cour donne raison à Protagoras, l'élève doit payer parce que la cour en a décidé ainsi ; et, si la cour donne raison à l'élève, celui n'est pas tenu de payer, parce que la cour l'a décidé. Laminé par la logique, le paradoxe s'évanouit : c'est un exemple de « paradoxe perdu ».

Analysons maintenant un paradoxe autrement intéressant, qui fut présenté par le logicien français Jules-Antoine Richard. En français, seules certaines phrases définissent des nombres entiers positifs : « L'année de la Révolution française » définit l'entier 1789, tandis que « La Déclaration des droits de l'homme a une grande importance historique » ne définit aucun nombre. Considérons l'expression : « Le plus petit entier positif que l'on ne peut pas définir par une phrase en français de moins de 23 mots ». Quel que soit ce nombre indéfinissable en moins de 23 mots, nous venons précisément de le définir en 22 mots : paradoxe !

Analysons le problème. On éviterait le paradoxe si la proposition considérée ne définissait pas de nombre entier : elle ne serait alors pas autocontradictoire, et le paradoxe disparaîtrait. Étu-

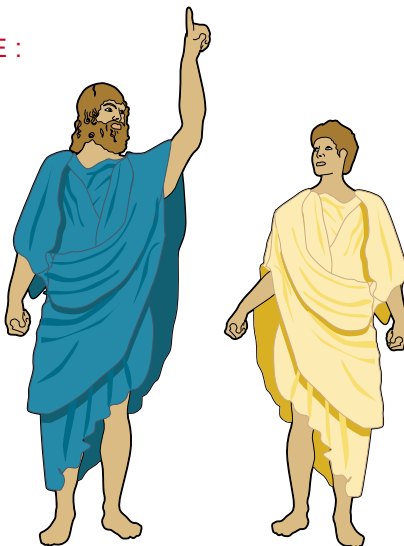
LE PARADOXE DE PROTAGORAS

LE PROBLÈME :

Le philosophe grec Protagoras donna des leçons de droit à un élève et accepta que celui-ci ne le paie qu'après son premier procès gagné. Cependant, l'élève n'eut aucun client et Protagoras lui intenta un procès.

LE PARADOXE :

Protagoras pensait qu'il gagnerait dans tous les cas, car :
 ¥ Si la cour lui donne raison, son élève sera tenu de le payer.
 ¥ Si la cour donne raison son élève, celui-ci devra le payer, car il aura gagné son premier procès.



L'élève était certain de gagner dans tous les cas, car :
 ¥ Si la cour lui donne raison, il n'aura rien à payer.
 ¥ Si elle donne raison Protagoras, il ne sera pas tenu de le payer, n'ayant pas encore gagné un seul procès.

LA SOLUTION :

La cour doit invalider le contrat si nécessaire. Il s'ensuit que les deux secondes parties des raisonnements, de Protagoras comme de son élève, sont incorrectes.

