



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.

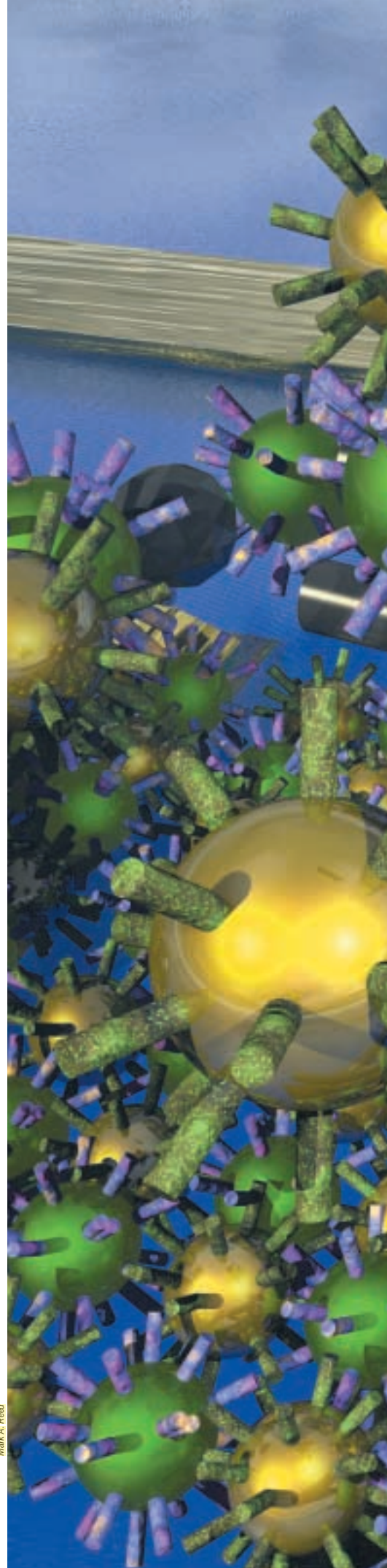
Les récentes avancées sont celles de l'«électronique moléculaire»: les chimistes de cette discipline synthétisent

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.

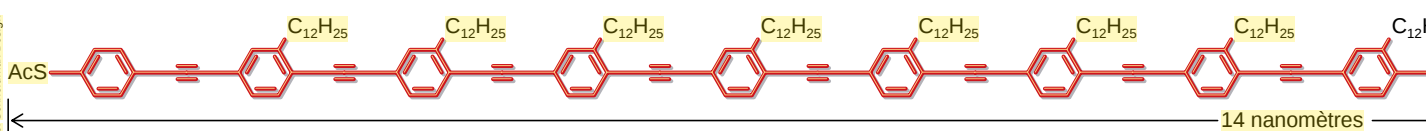
Ainsi, en juillet 1999, des équipes de la Société *Hewlett-Packard* et de l'Université de Los Angeles ont construit des interrupteurs électroniques en assemblant plusieurs millions de molécules de «rotaxane» en une couche d'une seule molécule d'épaisseur. En reliant certains de ces interrupteurs, ils 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