

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

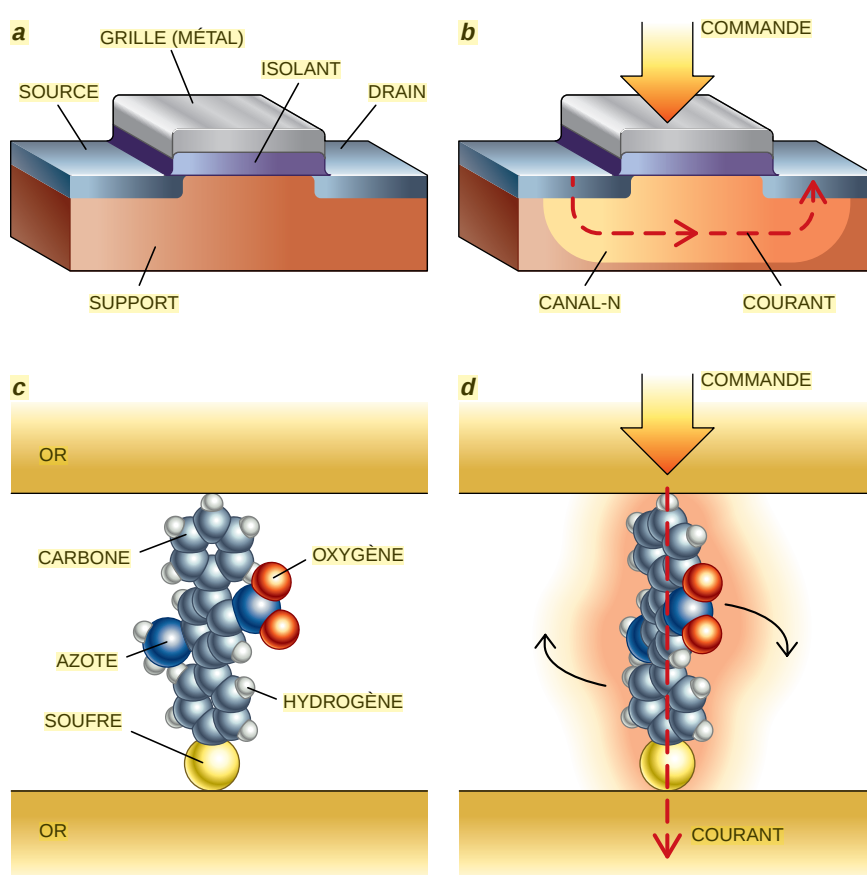
rant entre les deux autres. Notre interrupteur à torsion n'avait que deux bornes, et le courant électrique était réglé par un champ électrique. Dans les transistors à effet de champ des circuits intégrés, le courant est également commandé par un champ électrique, mais le champ est établi par l'application 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-

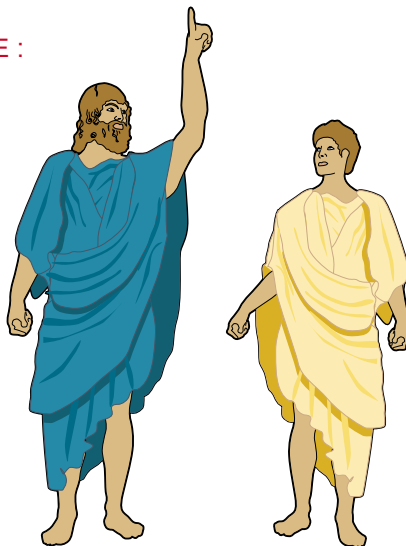
LE PARADOXE DE PROTAGORAS

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 à 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.

