

forme à partir d'ions positifs qui sont extraits d'une des électrodes. Quand la chaîne métallique relie les deux électrodes, le courant d'électrons peut facilement circuler et la résistance est faible. Le bit d'information vaut alors 1. En inversant le champ électrique, les atomes redeviennent des ions et migrent vers l'électrode : la chaîne se brise, la résistance augmente et le bit d'information passe de 1 à 0. Le processus est réversible.

Les progrès sont si rapides dans ce domaine qu'il est difficile de donner les caractéristiques de ces mémoires. Le temps d'écriture varie de la nanoseconde à la milliseconde suivant les dispositifs. Par ailleurs, les techniques de fabrication, surtout pour les mémoires à oxydes, sont relativement courantes, et leur coût de production est très compétitif. En revanche, les phénomènes microscopiques mis en jeu restent à mieux comprendre.

Tous les dispositifs présentés n'en sont pas au même point de maturité et leur présence sur le marché peut prendre

encore quelques années. Si les disques durs commencent déjà à disparaître dans les appareils nomades, les mémoires dynamiques pourraient n'être remplacées que d'ici trois à cinq ans.

Un horizon encore flou

La demande de mémoires toujours plus efficaces va continuer de croître. Cela encouragera les universités, les centres de recherche et les constructeurs à explorer les pistes évoquées, ainsi que de nombreuses autres. La concurrence étant forte et favorable à l'inventivité, l'évolution peut être rapide, et il est difficile de voir clairement quels composants s'imposeront dans cinq, dix ou vingt ans. La tendance qui se dégage est l'abandon de l'idée d'une technologie prédominante et universelle qui remplacera toutes les mémoires existantes. La solution optimale est de faire cohabiter plusieurs techniques et d'améliorer les performances de chacune. Jusqu'où ? On l'ignore. ■

BIBLIOGRAPHIE

H.-S. Wong *et al.*, Metal oxide RRAM, *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n° 6, pp. 1951-1979, 2012.

T. Kawahara *et al.*, Spin-transfer torque RAM technology : Review and prospects, *Microelectronics Reliability*, vol. 52, pp. 613-627, 2012.

M. Hilbert et P. Lopez, The world's technological capacity to store, communicate and compute information, *Science*, vol. 332, pp. 60-65, 2011.

G. W. Burr *et al.*, Phase-change memory technology, *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 28, n° 2, pp. 223-262, 2010.

france culture

LA MARCHE DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélien Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2013 France Culture

Stocker de l'information dans l'ADN

Christophe Dessimoz

Grâce à l'avancée des techniques de la génomique, il devient possible d'utiliser l'ADN comme support numérique pour archiver des données sur le long terme.

Deux piscines olympiques: tel est le volume qu'il faudrait pour contenir l'ensemble des données produites dans le monde en 2012 (environ 3×10^{21} octets), si on les stockait dans les toutes récentes clefs USB de un téraoctet (10^{12} octets). Au fil des ans, ce volume croît de façon exponentielle et, avec lui, le besoin de supports numériques fiables pour archiver l'ensemble des informations sur le long terme. De plus, la durée de vie des supports actuels étant limitée (pas plus de quelques dizaines d'années), la pérennisation des données nécessite une maintenance constante et lourde, fondée sur des copies multiples et régulières sur divers supports (voir l'article de Francis Daumas et Marion Massol dans ce numéro).

Pourtant, il existe depuis plus de trois milliards d'années un support numérique universel, compact et stable: l'ADN, la molécule porteuse de l'information génétique des organismes vivants. Codé sous la forme d'une succession de quatre molécules – les nucléotides A, T, G, C –, le programme de la vie est numérique: les nucléotides codent de l'information, au même titre que les bits (0 ou 1) de l'informatique. L'ADN est de plus très stable – on a retrouvé, dans des carottes de glace, des gènes datant de 450 000 à 800 000 ans – et dense: si l'on codait sur de l'ADN toute l'information produite en 2012, elle tiendrait dans le coffre d'une voiture...

En outre, le fait que l'ADN soit universel limite les risques d'obsolescence. Tant

L'AUTEUR



Christophe DESSIMOZ est professeur de bio-informatique au Collège universitaire

de Londres. Il est aussi affilié à l'Institut européen de bio-informatique (EMBL-EBI). Article écrit en collaboration avec Marie-Neige Cordonnier.

BIBLIOGRAPHIE

N. Goldman et al., Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA, *Nature*, vol. 494, pp. 77-80, 2013.

G. M. Church et al., Next-generation digital information storage in DNA, *Science*, vol. 337, pp. 1628-1629, 2012.

Entretien avec Ch. Dessimoz à écouter sur: bit.ly/pls_433_dessimoz

qu'il y aura de la vie sur Terre et un intérêt pour la comprendre, la technique pour lire l'ADN existera. Aussi les progrès récents de la génomique nous ont-ils conduits, à l'Institut européen de bio-informatique, à étudier la possibilité d'utiliser l'ADN comme support d'archives numériques.

Tous les sonnets de Shakespeare sur ADN

Peu après la caractérisation de l'ADN, publiée en 1953 par James Watson et Francis Crick, l'idée d'utiliser cette molécule comme support d'information a été envisagée. En 1964, un physicien et officier radio russe, Mikhail Neiman, voit dans les systèmes et processus d'information biophysiques un moyen de miniaturiser les dispositifs de stockage et de traitement de l'information. L'idée a été mise en œuvre à la fin des années 1990, avec le développement du génie génétique. Plusieurs équipes ont su encoder de l'information sur l'ADN, mais les informations étaient courtes (un message secret annonçant le débarquement du 6 juin 1945, une comptine anglaise avec paroles, musique et petite image, la Déclaration des droits de l'homme...). Surtout, les manipulations génétiques étaient laborieuses et *ad hoc*.

Ces dernières années, cependant, les progrès des techniques de séquençage ont entraîné un tournant important. En 2010, le biologiste américain Craig Venter, de