

se font suivant des opérations logiques d'une rigueur implacable. Cette précision, assurément cruciale pour de nombreuses applications comme envoyer une fusée dans l'espace, ne l'est pas pour d'autres, comme reconnaître un visage familial. Or le fait d'imposer à un circuit électronique un comportement parfait où l'aléa n'est pas toléré a un coût élevé en énergie, car il faut éliminer tous les bruits parasites et corriger toutes les erreurs.

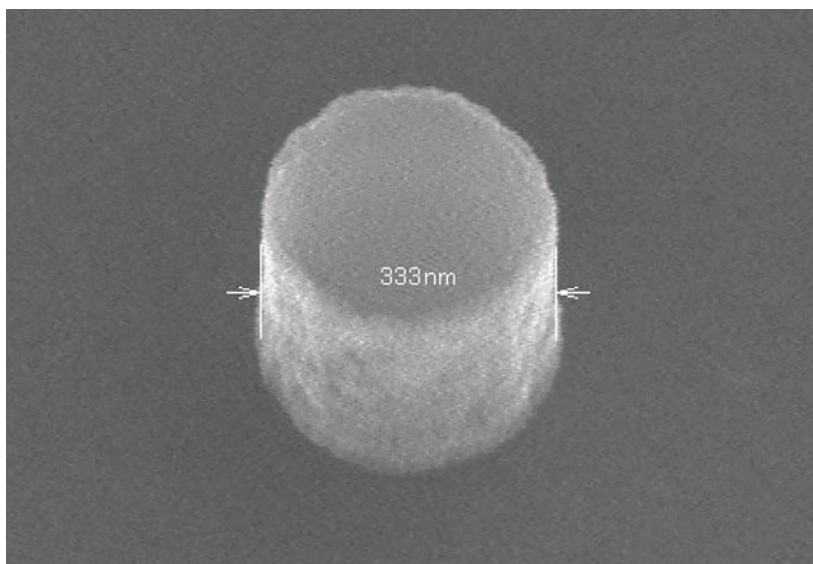
Au cours de l'évolution, le cerveau, qui ne dispose que d'une source d'énergie limitée – nos apports caloriques quotidiens – a développé une tout autre stratégie. Il fonctionne sur la base d'un compromis entre la fiabilité du traitement de l'information et la dépense énergétique. Les synapses et les neurones ont ainsi des comportements stochastiques: en intégrant une certaine marge d'aléatoire, ils ne donnent pas toujours un résultat identique même s'ils reçoivent des informations similaires.

En contrepartie, pour assurer tout de même un traitement fiable de l'information, le cerveau met en œuvre de multiples stratégies. Par exemple, comme chaque neurone, pris individuellement, n'est pas très fiable, plusieurs de ces cellules cérébrales sont parfois chargées de traiter le même signal. Un résultat cohérent et stable est ensuite déduit de l'ensemble de leurs réponses. La redondance est, en fin de compte, moins coûteuse en énergie qu'un système trop rigide qui corrige systématiquement les erreurs.

De plus, les signaux stockés dans les synapses et traités par les neurones ne sont pas des «0» ou des «1» (codage binaire) comme dans l'électronique actuelle. Ces signaux présentent une grande gamme de valeurs différentes et très proches: ils contiennent ainsi bien plus d'information, mais sont plus sensibles aux perturbations, autrement dit au «bruit». Enfin, contrairement aux processeurs où chaque élément opère au rythme d'une horloge unique, assurant un fonctionnement cohérent, mais limitant la vitesse du traitement de l'information, le cerveau travaille de façon asynchrone: chaque neurone émet des signaux électriques selon son propre rythme et s'en sert pour communiquer efficacement avec d'autres neurones, qui se trouvent parfois dans une zone différente du cerveau.

LE CERVEAU, SOURCE D'INSPIRATION

Ces spécificités contribuent à rendre le cerveau plus économe en énergie. Est-il possible de s'en inspirer pour construire des composants électroniques ou puces capables de traiter des données avec très peu d'énergie? Avec des neurones et des synapses électroniques installés au plus près, de façon à rapprocher mémoire et calcul, il serait possible de reproduire



Les jonctions tunnel magnétiques (telle celle-ci, vue au microscope électronique à balayage) sont fabriquées en plusieurs étapes. On fait croître les couches de matériaux l'une après l'autre par pulvérisation cathodique dans une enceinte sous vide. Ensuite, pour obtenir des jonctions d'un diamètre inférieur au micromètre, le matériau est recouvert d'une résine électrosensible et d'un masque sur lequel est dessinée la forme de la jonction. L'ensemble est soumis à une source d'électrons (lithographie) et la résine exposée est conservée. Les parties non protégées par la résine du matériau sont gravées et retirées pour ne garder que la forme de la jonction.

l'architecture équivalente à celle du réseau de neurones que l'on veut faire fonctionner. Cette idée n'est pas récente. Dès la fin des années 1980, Carver Mead, chercheur à Caltech (l'institut de technologie de Californie) et l'un des pères fondateurs de la microélectronique moderne, a inventé le concept de circuits «neuromorphiques», dont l'objectif est de mimer l'architecture neurobiologique du cerveau. Cette approche a longtemps été délaissée, car les obstacles technologiques étaient nombreux.

Le premier obstacle concerne la mémoire: les techniques de l'électronique actuelle ne permettent pas aujourd'hui d'intégrer d'importantes quantités de mémoire au plus près du calcul. En effet, les seuls circuits de mémoire qui peuvent être intégrés dans les processeurs (les circuits de mémoire vive statique) sont extrêmement coûteux, car ils utilisent une grande et précieuse surface dans le processeur. C'est pour cette raison que les processeurs n'intègrent que de très faibles capacités de stockage, la plus grande part de la mémoire étant physiquement distribuée en dehors des zones de calcul. Plusieurs pistes sont néanmoins à l'étude pour rapprocher mémoire et processeurs (voir l'encadré page 33). Parmi elles, l'électronique de spin, ou spintronique, a connu des progrès spectaculaires ces dernières années.

Cette technique n'exploite pas uniquement les électrons au travers de leur charge électrique, mais utilise aussi leur spin, une propriété purement quantique, assimilable à un moment cinétique (on peut représenter le spin d'un électron comme une petite flèche orientée). Comme le spin est responsable du moment magnétique intrinsèque de l'électron, quand une majorité d'électrons ont un spin pointant dans une direction privilégiée dans un matériau, ce dernier a une aimantation non nulle. La spintronique exploite les interactions ➤