

transmises à un ordinateur qui a simulé l'ensemble du réseau de neurones avec ses fonctions synaptiques. Ces dernières ont alors été configurées grâce à une phase d'apprentissage pour reconnaître les chiffres parlés. Puis, soumis à de nouveaux échantillons de paroles, le réseau identifiait correctement les chiffres avec un taux de succès de 99,6%, ce qui représente une performance exceptionnelle. Cette expérience a démontré la capacité des jonctions tunnel magnétiques impulsives à imiter les neurones de façon fiable.

Les travaux dans le domaine de la spintronique à des fins neuromorphiques sont encourageants. Notre futur défi sera de réaliser des réseaux de neurones complets comportant des millions de jonctions tunnel magnétiques jouant le rôle de neurones et de synapses. Comme on l'a vu, l'industrie sait déjà les intégrer par milliards sur des puces et les relier à des circuits électroniques classiques pour faire des mémoires, ce qui constitue une base solide pour aller plus loin.

La spintronique n'a pourtant pas fini de nous surprendre. Les jonctions tunnel magnétiques seraient capables d'imiter d'autres propriétés du cerveau, comme la synchronisation de neurones distants. En effet, dans le cerveau, des impulsions conduisent des neurones parfois très éloignés à accorder leurs réponses, en les déclenchant au même moment. Cette synchronisation a de nombreux avantages. Des neurones qui émettent des impulsions en même temps auront plus d'importance dans le traitement du signal. S'ils sont connectés au même neurone, celui-ci reçoit un très grand nombre d'impulsions dans un bref laps de temps et, ainsi, il les transmet très efficacement à son tour. Des populations entières de neurones se coordonnent par ce phénomène, au point de créer des ondes cérébrales qui, grâce à leur puissance, modifient le comportement de neurones dans d'autres aires cérébrales, parfois lointaines.

DE MINUSCULES ÉMETTEURS-RÉCEPTEURS

Les jonctions tunnel magnétiques ayant un fonctionnement très rapide, elles produisent des impulsions électromagnétiques à une fréquence pouvant dépasser quelques centaines de mégahertz. Le traitement de l'information se fait ainsi des millions de fois plus vite que dans le cerveau. Mais, autre conséquence, ces dispositifs se comportent comme des nanoémetteurs radio. Or ces jonctions sont aussi très sensibles aux ondes électromagnétiques environnantes, lesquelles peuvent modifier leur génération d'impulsions : les jonctions sont donc aussi de très bons récepteurs radio. En ajustant correctement les caractéristiques d'un ensemble de jonctions, il est possible de les synchroniser entre elles grâce aux

signaux qu'elles émettent et reçoivent... comme les neurones biologiques!

Induire ce type de comportement synchronisé dans des réseaux de neurones artificiels est une piste passionnante pour coordonner matériellement et efficacement des réseaux de neurones spécialisés dans des tâches différentes. Dans cette optique, en 2018, avec nos collègues, nous avons étudié un système de quatre jonctions tunnel magnétiques dont la tâche était de reconnaître des voyelles prononcées oralement (voir la figure page 36). Le signal vocal était réduit

Grâce au multiplexage, une jonction a imité quatre cents neurones

à deux fréquences (par analyse de Fourier) et accéléré 100000 fois pour être émis par une antenne aux quatre nanooscillateurs. De façon très intéressante, dans cette expérience, nous avons constaté que la capacité des jonctions à coordonner leurs rythmes augmentait les performances de classification des signaux vocaux.

Pour aller plus loin, nous cherchons désormais à réaliser des réseaux dont les neurones communiquent par les ondes électromagnétiques qu'émettent et reçoivent les jonctions. Il s'agit là d'une piste prometteuse pour interconnecter les neurones dans un réseau dense, ce qui est une condition indispensable pour l'implémentation de tâches complexes. À terme, un système complet associera ces jonctions jouant le rôle de neurones à des synapses artificielles à base de MRAM, pour lui donner une capacité d'apprentissage.

Que pourront alors réaliser de tels systèmes? Notre objectif n'est pas d'obtenir une intelligence capable de rivaliser avec l'intelligence humaine : notre connaissance du cerveau est bien trop partielle pour un tel résultat. En revanche, nous souhaitons concevoir une intelligence artificielle plus économe en électricité et qui soit plus rapide que celles disponibles actuellement. Ainsi, nous réduirons la consommation énergétique considérable des centres de calcul qui traduisent des textes ou interprètent ce que nous disons à nos enceintes intelligentes, et nous aurons la possibilité d'embarquer de tels dispositifs dans nos téléphones portables ou dans des véhicules autonomes pour nous assister dans notre vie quotidienne. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Grollier, D. Querlioz et al., **Neuromorphic spintronics**, *Nature Electronics*, 2 mars 2020.

M. Romera et al., **Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators**, *Nature*, vol. 563, pp. 230-234, 2018.

J. Torrejon et al., **Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators**, *Nature*, vol. 547, pp. 428-431, 2017.

N. Locatelli et al., **Spintronic devices as key elements for energy-efficient neuroinspired architectures**, *IEEE Xplore : Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, 2015.