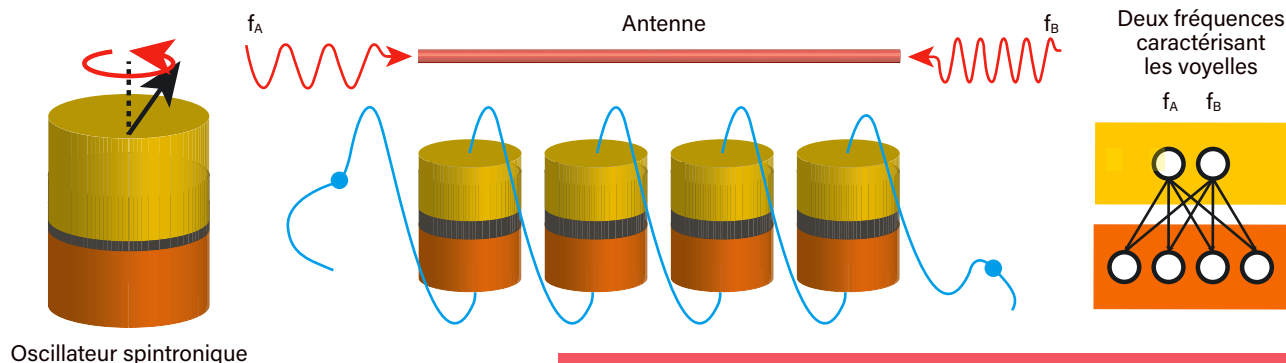




Oscillateur spintronique

la résistance électrique de la jonction (on parle d'effet de magnétorésistance) s'en trouve affectée et se traduit par un signal électrique périodique. Plus le courant entrant est important, plus la vitesse de rotation sera grande et la fréquence des impulsions engendrées sera élevée. On obtient bien un comportement très similaire à celui d'un neurone. En outre, ce phénomène est réalisable à température ambiante et est très stable pour des dispositifs nanométriques. Il peut donc être exploité pour des dispositifs concrets.

99,6% DE RÉUSSITE

En 2017, avec nos équipes, nous avons montré expérimentalement qu'une jonction tunnel magnétique pouvait effectivement imiter un neurone. Nous sommes même allés plus loin : nous avons utilisé une jonction unique pour imiter un réseau entier de 400 neurones grâce à une stratégie dite «de multiplexage temporel», la jonction jouant tour à tour le rôle de chaque neurone. Nous avons ensuite utilisé ce réseau de neurones spintroniques pour identifier des chiffres prononcés par différentes personnes.

Pour ce faire, nous avons converti les signaux audio à reconnaître en courant électrique injecté à travers la jonction tunnel magnétique. Ce courant injecté, qui correspond aux chiffres prononcés mille fois plus vite (pour être dans la bonne gamme de fréquences du dispositif), provoque une rotation de l'aimantation d'un nanoaimant de la jonction. Ce faisant, grâce à l'effet de magnétorésistance, le neurone convertit les modulations du courant en variation de la tension électrique à ses bornes. Nous avons enregistré ces variations de tension électrique provenant des neurones

↑ Une jonction tunnel magnétique peut être utilisée comme un neurone qui traite l'information. Pour cela, les caractéristiques de la jonction sont telles que le courant qui la traverse fait tourner de façon permanente l'aimantation de la couche supérieure (à gauche). La jonction émet alors un signal impulsionnel comme un neurone biologique. Ce composant se comporte aussi comme un émetteur-récepteur d'ondes radio. Dans une expérience, les chercheurs ont associé quatre neurones artificiels qui synchronisaient aussi leurs signaux grâce à une antenne (au centre). Ce réseau de neurones (schématisé à droite) reconnaît des voyelles prononcées.

spintroniques, que nous avons 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 impulsioneelles 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 ci-contre). Le signal vocal était réduit à deux fréquences (par analyse de Fourier) et accéléré 100 000 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. Un système complet associant ces jonctions jouant le rôle de neurones à des synapses artificielles à base de MRAM, pour lui donner une capacité d'apprentissage, est en cours de fabrication.

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.

— Les auteurs —

> Julie Grollier

est chercheuse à l'unité mixte de physique CNRS/Thales, à Palaiseau. Prix Irène Joliot-Curie 2021 de la Femme scientifique de l'année.

> Damien Querlioz

est chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (université Paris-Saclay/CNRS), à Palaiseau.

— À lire —

> N. Leroux et al.,

Hardware realization of the multiply and accumulate operation on radio-frequency signals with magnetic tunnel junctions, *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2021.

> J. Grollier et al.,

Neuromorphic spintronics, *Nature Electronics*, 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.