

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.

L'« intelligence » viendra sans doute aux machines. Mais en sera-t-il de même pour la conscience ? On peut fortement en douter.

L'improbable conscience artificielle

Christof Koch



Dans les décennies à venir, les progrès rapides des algorithmes d'apprentissage engendreront des machines d'une intelligence comparable à la nôtre. Capables de parler et de raisonner, elles auront leur place dans une myriade de domaines tels que l'économie, la politique et, inévitablement, la guerre. La naissance d'une véritable intelligence artificielle (IA) aura un impact profond sur l'avenir de l'humanité et conditionnera l'existence même d'un tel avenir.

Prenez par exemple la citation suivante : « Encore aujourd'hui, des recherches sont en cours pour mieux comprendre ce que les nouveaux programmes d'IA seront capables de faire, tout en restant dans les limites de l'intelligence d'aujourd'hui. La plupart des programmes d'IA actuellement programmés se limitent principalement à prendre des décisions simples ou à effectuer des opérations simples sur des quantités relativement faibles de données. »

Peut-être avez-vous eu l'impression que quelque chose clochait dans ce paragraphe ? Cette citation est l'œuvre de GPT-2, un robot linguistique que j'ai pu tester. Développé par OpenAI, un institut basé à San Francisco qui promeut les IA « vertueuses », GPT-2 est un algorithme d'apprentissage fondé sur un réseau de neurones artificiels. Ses entrailles contiennent plus d'un milliard de connexions simulant des synapses, les points de jonction entre neurones.

La tâche du réseau est apparemment stupide : confronté à un texte de départ arbitraire, il doit prédire le mot suivant. Il ne « comprend » pas les textes comme le ferait un humain. Mais durant sa phase d'apprentissage, il a dévoré des quantités astronomiques de textes – huit millions de pages

— En bref —

> Deux théories s'opposent sur la nature de la conscience : celle de « l'espace de travail neuronal global » et celle de « l'information intégrée ».

> L'une implique que les machines deviendront conscientes lorsqu'elles auront des capacités suffisamment sophistiquées, l'autre non.

> Ces théories sont actuellement testées par une collaboration internationale.

internet en tout – et ajusté ses connexions internes pour mieux anticiper des suites de mots.

J'ai écrit les premières phrases de l'article que vous êtes en train de lire, puis je les ai « injectées » dans l'algorithme en lui demandant de composer une suite. Il a notamment craché le paragraphe cité. Certes, ce texte ressemble aux efforts d'un étudiant de première année pour se rappeler un cours d'introduction à l'apprentissage automatique durant lequel il aurait rêvassé. Mais le résultat contient malgré tout les mots et les phrases clés – pas si mal, vraiment !

L'EFFET D'ÊTRE UNE CHAUVESOURIS

Les algorithmes sauront-ils un jour écrire un chef-d'œuvre aussi abouti qu'*À la recherche du temps perdu*, de Marcel Proust ? Difficile à dire, mais les prémices sont là. Rappelez-vous comme les premiers logiciels de traduction et de conversation étaient faciles à tourner en dérision, tant ils manquaient de précision. Mais avec les réseaux neuronaux profonds et la mise en place d'infrastructures de calcul surpuissantes par les entreprises du numérique, les ordinateurs se sont améliorés sans relâche, jusqu'à ce que leurs productions n'aient plus rien de ridicule.

Bien que les experts ne s'accordent pas sur la nature exacte de l'intelligence, la plupart d'entre eux estiment que, tôt ou tard, les ordinateurs atteindront ce que l'on appelle l'intelligence artificielle générale : ils deviendront capables de réaliser n'importe quelle tâche intellectuelle accessible à un humain. Mais auront-ils pour autant une forme de sentiment d'eux-mêmes ? En d'autres termes, pourront-ils un jour être conscients ?