

En réalité, l'architecture de la puce TrueNorth ne contient pas 1 million de neurones. Un neurone artificiel de ce type occupe une trop grande surface pour en mettre 1 million sur une puce. En revanche, cette puce est extrêmement rapide ; dès lors, un seul circuit numérique implémente plusieurs neurones artificiels (ceux qui seraient physiquement situés autour), en faisant successivement les calculs associés à chacun d'eux. C'est une petite, mais très pragmatique, entorse à l'idée de base du neuromorphisme de faire des neurones et synapses artificiels. En 2017, Intel a développé une puce analogue, mais plus modeste, Loihi, qui n'implémente que 130 000 neurones. Ces dispositifs restent volumineux et il est difficile de penser qu'il sera possible de rivaliser avec le cerveau humain en suivant cette approche.

AU PLUS PRÈS D'UN NEURONE

La spintronique fournit là encore une piste. Il est possible d'utiliser une jonction tunnel magnétique pour imiter les fonctions clés des neurones du cerveau. En particulier, ces derniers communiquent en émettant des impulsions électriques. Ces impulsions sont toutes identiques, mais leur nombre dépend de la sollicitation du neurone. Si un neurone reçoit beaucoup d'impulsions pendant un temps court, la fréquence avec laquelle il va engendrer des impulsions sera alors également élevée. S'il est stimulé par peu d'impulsions, il en émettra lui-même un nombre réduit.

Avec l'électronique traditionnelle, il est difficile de réaliser des neurones impulsionnels de taille nanométrique. En effet, produire des impulsions à un certain rythme nécessite de créer des boucles de rétroaction dans le circuit électronique, ce qui occupe de la place. Il est en revanche possible de fabriquer des jonctions tunnel magnétiques qui reproduisent ce comportement.

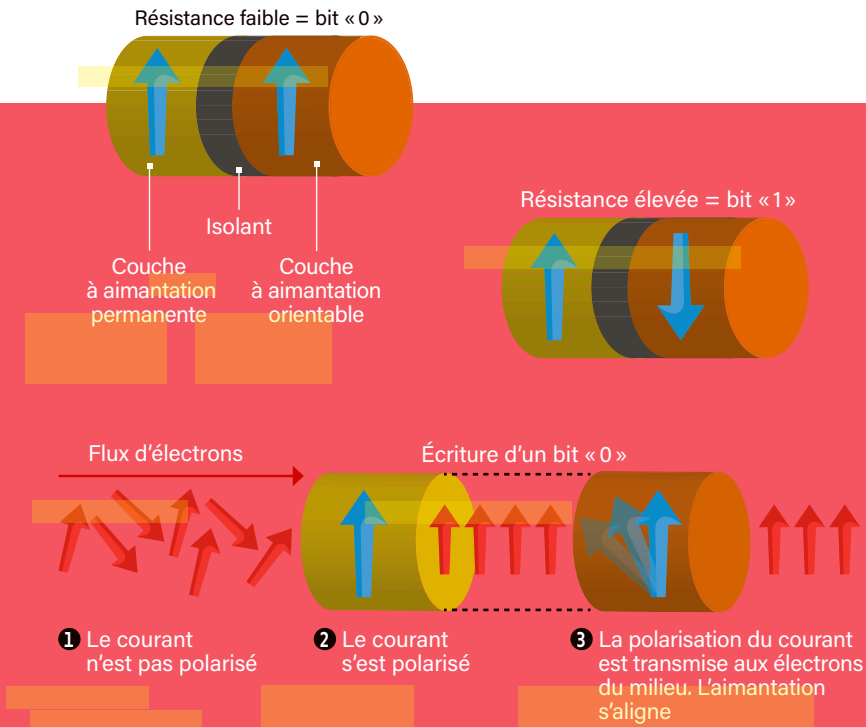
Une solution consiste à prendre les signaux d'entrée sous la forme de courants électriques qui sont additionnés (exactement comme dans un neurone biologique) avant d'être injectés dans la jonction. Ensuite, on choisit les caractéristiques du dispositif de telle sorte que le spin transféré par les électrons du courant entrant ne conduise pas à un basculement complet de l'aimantation du nanoaimant, mais la fasse osciller et tourner en permanence, telle une boussole dont l'aiguille pivoterait sur elle-même. Comme la configuration respective des deux aimantations (celle fixe et celle en rotation) change périodiquement,

MANIPULER DES SPINS

Dans les circuits électroniques actuels, la manipulation de la charge

électrique de l'électron est au cœur du fonctionnement des dispositifs, à l'instar des transistors. En électronique de spin, ou spintronique, on utilise, en plus de la charge, une autre propriété quantique des électrons, le spin. Celui-ci correspond à un moment magnétique intrinsèque de la particule. Les interactions de ce spin avec certains matériaux magnétiques offrent la possibilité de concevoir des composants aux comportements très riches. Dans un matériau magnétique, comme le fer ou le cobalt, le spin des électrons est globalement orienté dans une même direction, ce qui confère au matériau son aimantation. Lorsqu'un courant électrique traverse un tel matériau, le spin des électrons qui constituent le courant s'oriente dans la direction de l'aimantation. Cet effet donne lieu à deux phénomènes fondamentaux en spintronique.

Le premier est le phénomène de magnétorésistance observé dans les « jonctions tunnel magnétiques ». Ces composants sont constitués de deux couches aimantées séparées par une couche isolante. Les matériaux utilisés dépendent des propriétés que l'on veut donner à la jonction. L'isolant est souvent un oxyde métallique d'environ 1 à 2 nanomètres d'épaisseur. L'aimantation d'une couche magnétique est fixe tandis que l'autre peut être réorientée. En 1975, Michel Jullière, de l'Insa de Rennes, a été le premier à mettre en évidence la magnétorésistance à effet tunnel. Lorsqu'un courant

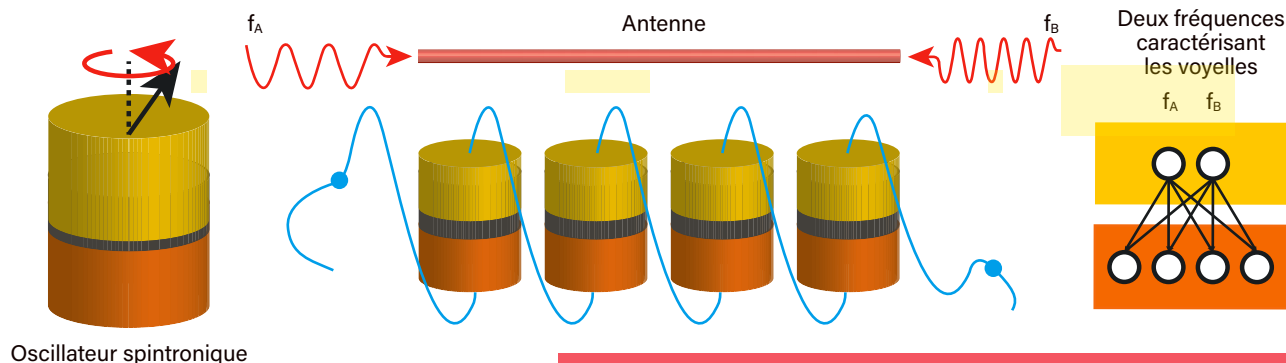


électrique traverse une jonction tunnel magnétique, la traversée de la couche isolante s'effectue grâce à l'effet tunnel (un phénomène purement quantique). Le courant passe plus facilement si les aimantations des deux couches magnétiques pointent dans la même direction, et plus difficilement dans le cas contraire.

Ainsi, en mesurant la résistance électrique (faible ou élevée) d'une jonction tunnel magnétique, on peut « lire » la direction des aimantations. On associe ainsi un bit «0» à des aimantations parallèles et un bit «1» à des aimantations antiparallèles. Ces jonctions tunnel magnétiques peuvent ainsi servir d'élément de base dans des systèmes de mémoire pour stocker des bits d'information. Une importante activité industrielle s'est développée autour des mémoires reposant sur ce principe et qualifiées de MRAM (*magnetoresistive random-access memory*).

La découverte d'un effet analogue dans des systèmes multicouches métalliques, la magnétorésistance géante, en 1988, a été décisive pour l'intérêt porté au développement de la spintronique, et a valu le prix Nobel de physique en 2007 à Albert Fert, de l'université Paris-Saclay, et Peter Grünberg, de l'université de Cologne. Cette technique et la magnétorésistance tunnel sont utilisées notamment dans les têtes de lecture des disques durs modernes. Le fait d'avoir une couche dont l'aimantation est « mobile » permet de réorienter cette dernière pour que la jonction porte un bit «0» ou «1». Pour écrire ce bit, l'approche initiale a été d'utiliser un champ magnétique extérieur, mais cette méthode ne permet pas une bonne réduction de la taille du système et son intégration à des échelles nanométriques. En 1996, John Slonczewski, chercheur chez IBM, et Luc Berger, de l'université

Carnegie-Mellon, aux États-Unis, ont mis en évidence le second phénomène crucial de la spintronique: le transfert de spin. Lorsqu'un courant électrique suffisamment intense traverse une jonction tunnel magnétique, il peut faire basculer l'aimantation de la couche à aimantation mobile pour obtenir une configuration parallèle ou antiparallèle. Pour écrire un bit «0» (voir ci-contre), le courant traverse d'abord la couche à aimantation fixe. Il se polarise: le spin des électrons du courant, qui n'avait initialement pas d'orientation particulière, s'aligne avec l'aimantation de la couche. Quand les électrons arrivent dans la seconde couche, ils interagissent avec les électrons du matériau et leur transfèrent leur polarisation. L'aimantation de cette couche devient progressivement parallèle à l'autre. Pour être plus précis, à chaque interface (entre une couche magnétique et l'isolant), une partie des électrons est réfléchi et une autre est transmise. Pour écrire un bit «1», le courant arrive par la couche à aimantation mobile. Il se polarise d'abord selon l'aimantation de cette couche. Mais les électrons qui sont réfléchis sur la couche à aimantation fixe prennent une polarisation un peu plus antiparallèle et transmettent cette orientation à la couche à aimantation mobile. Résultat: on obtient une configuration antiparallèle, correspondant à un bit «1». Depuis 2008, de nombreux industriels exploitent les jonctions tunnel magnétiques à transfert de spin pour concevoir des dispositifs de mémoire performants.



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.

110

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 un 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 impulsif 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 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.