

ajustent leur activité selon la quantité d'information à laquelle elles sont exposées. Par exemple, quand deux neurones connectés par une synapse sont actifs en même temps, cette synapse s'en trouve renforcée avec une activité accrue. Mais ce renforcement n'est pas toujours complet, sinon, d'une certaine façon, chaque nouveau signal effacerait la subtile configuration de la synapse élaborée au cours de toute son expérience passée.

En transposant ce principe aux dispositifs spintroniques, cela reviendrait à modifier la valeur des synapses artificielles en fonction du signal qu'elles reçoivent. Et effectivement, il est possible de reproduire une certaine plasticité avec ces systèmes. Quand une tension électrique est appliquée à une jonction tunnel magnétique, l'effet de transfert de spin met en mouvement l'aimantation d'un de ses nanoaimants. Si la tension est assez élevée et appliquée assez longtemps, ce mouvement entraîne l'inversion de l'aimantation du nanoaimant, et donc de la valeur stockée par la jonction tunnel magnétique. Mais ce renversement n'est pas toujours prédictible : si la tension n'est pas appliquée pendant une durée suffisante, parfois l'aimantation se retourne, parfois non. Plus la tension appliquée à la jonction est élevée, plus la probabilité de basculement de l'aimantation est importante, sans pour autant atteindre 100 %.

## UNE CAPACITÉ D'APPRENTISSAGE

Dans une mémoire usuelle, ce comportement incertain doit être évité à tout prix. Pour un système neuromorphique, on obtient des synapses qui, sous l'action des signaux qu'elles reçoivent, transforment progressivement la fonction du réseau de neurones dont elles font partie et adaptent la réponse du système à la nouvelle tâche sans avoir besoin d'utiliser des méthodes aussi lourdes que la rétropropagation du gradient.

En 2015, avec nos collègues, nous avons montré qu'un système équipé de mémoires spintroniques plastiques pouvait apprendre à compter des véhicules sur une autoroute (avec une précision de 95 %) ou à reconnaître des chiffres manuscrits, de la même façon que l'aurait fait un algorithme usuel d'intelligence artificielle. Sur ces tâches relativement simples, les performances s'approchent des techniques plus traditionnelles d'apprentissage des réseaux de neurones (qui reposent cependant sur plus de synapses, avec une consommation plus élevée

en énergie). En revanche, sur des tâches complexes (comme concurrencer un spécialiste du jeu de go), les techniques d'apprentissage bio-inspirées sont pour l'instant loin de rivaliser avec les techniques plus conventionnelles.

Si nous sommes capables de réaliser des synapses artificielles qui stockent de l'information et dont il est possible de moduler la réponse pour simuler la plasticité synaptique et le phénomène d'apprentissage, un système complet neuromorphique doit aussi inclure des neurones pour effectuer les calculs.

Le cerveau humain contient près d'une centaine de milliards de neurones, et les algorithmes d'intelligence artificielle simulent aujourd'hui jusqu'à des dizaines de millions de neurones. Est-il envisageable de réaliser des neurones avec les techniques actuelles de transistors au silicium ? D'abord, si l'on veut autant de composants dans une puce électronique de la taille d'un pouce, il faudrait que chaque neurone ait une largeur bien inférieure à 1 micromètre, ce qui est impossible, car réaliser même un unique neurone artificiel par cette approche nécessite des centaines de transistors.

Par exemple, la puce TrueNorth conçue par IBM en 2014 est une démonstration impressionnante d'électronique neuromorphique qui ne fait pas appel à la spintronique. Ce système comporte cinq milliards de transistors (un nombre considérable), ce qui permet d'implémenter 1 million de neurones et des centaines de millions de synapses. En rapprochant ainsi centre de calcul et mémoire, IBM affirme que la puissance consommée par la puce est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle d'une puce usuelle.

Avec la spintronique,  
il est possible  
de reproduire une  
certaine plasticité  
des synapses,  
ici artificielles

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