

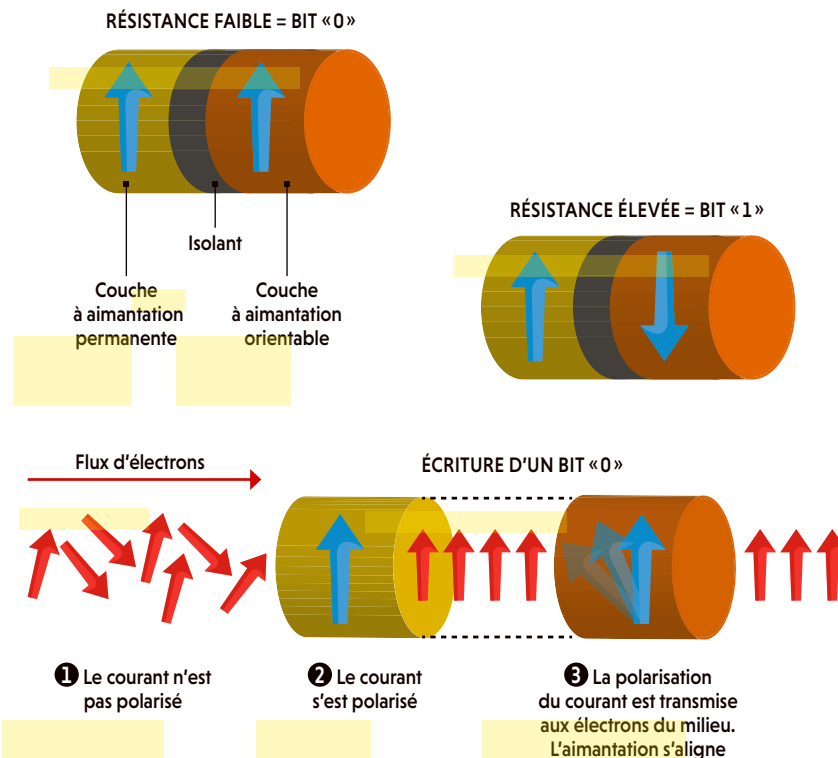
MANIPULER LES SPINS DES ÉLECTRONS

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 et son épaisseur est d'environ 1 à 2 nanomètres. 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 si les aimantations sont orientées dans des directions opposées.

Ainsi, en mesurant la résistance électrique (faible ou élevée) d'une jonction tunnel magnétique, on peut « lire » la direction respective 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-dessus), 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.

> s'inspirer encore une fois de la façon dont le cerveau apprend. En particulier, les synapses biologiques ne servent pas juste comme mémoire, elles sont aussi au cœur du mécanisme de l'apprentissage. Elles sont en effet «plastiques»: elles 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.

Pour réaliser un unique neurone artificiel avec des transistors, il en faudrait des centaines

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 un 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 un 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.

En réalité, l'architecture de la puce TrueNorth ne contient pas un million de neurones. Un neurone artificiel de ce type occupe une trop grande surface pour en mettre un million sur une puce. En revanche, cette puce est extrêmement rapide; dès lors, un seul circuit >