

LES DIFFÉRENTES APPROCHES NEUROMORPHIQUES

Dans un ordinateur usuel, les données sont stockées dans une mémoire physique séparée du processeur où sont exécutés les calculs ; on parle d'« architecture de von Neumann ». Ce système simple à mettre en œuvre est cependant énergivore et sa vitesse est limitée. Pour rapprocher les mémoires des processeurs, la spintronique est une piste, mais il existe d'autres possibilités.



SPINTRONIQUE

Cette technique repose sur des jonctions tunnel magnétiques. La résistance d'une jonction, qui dépend de l'orientation de l'aimantation de ses deux couches magnétiques, encode des bits « 0 » et « 1 ». Ces composants peuvent être configurés pour agir comme des synapses ou des neurones artificiels.

- + Physique particulièrement riche et comprise
- Fabrication difficile



TRANSISTORS

Il est possible de concevoir des neurones et des synapses avec des transistors au silicium, mais pour réaliser un unique neurone, il faut des centaines de transistors. Cette idée a été mise en application dans les puces TrueNorth, d'IBM, et Loihi, d'Intel.

- + Accessible dès aujourd'hui
- Mémoires extrêmement coûteuses



MEMRISTORS

Ces composants électroniques, par exemple en dioxyde de titane, ont une résistance qui dépend du courant qui les traverse. Leur état est fonction de l'historique des courants qui ont déjà été appliqués. Ces mémoires artificielles exhibent ainsi une certaine capacité de plasticité synaptique.

- + Fabrication simple
- + Composants bon marché
- Fiabilité réduite



MÉMOIRES À CHANGEMENT DE PHASE

Ces composants contiennent des matériaux, tels que des verres de chalcogénure, qui basculent d'une phase cristalline à amorphe sous l'effet de la chaleur. La résistance électrique des phases amorphes est supérieure à celle des phases cristallines, ce qui permet d'encoder des bits « 0 » et « 1 ».

- + Technologie mature
- Consommation énergétique



OPTIQUE

Dans un ordinateur optique, les photons émis par des lasers remplacent les électrons. Le signal lumineux est directement traité grâce à des composants optiques qui sont plus rapides que les transistors électriques. Il est également possible de concevoir des dispositifs de mémoire avec ces composants optiques.

- + Calculs très rapides
- Mise en œuvre complexe (miniaturisation difficile des composants)
- Forte consommation énergétique

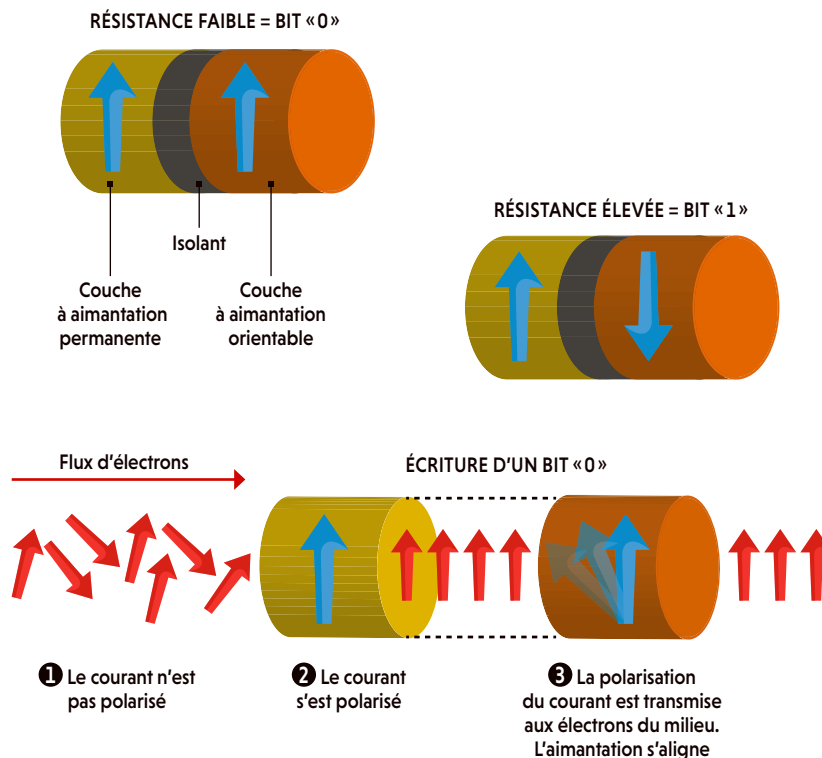
MANIPULER LES SPINS DES ÉLECTRONS

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.