

Il existe toute une variété de mémoires à résistance variable, selon les principes physiques qui créent la résistance. Présentons ici deux successeurs possibles des mémoires dynamiques : les mémoires dites magnétiques et les mémoires dites à changement de phase. Ces mémoires consomment moins d'énergie et présentent, en principe, une densité d'information équivalant à celle des mémoires dynamiques.

Les mémoires magnétiques (MRAM pour *Magnetic Random Access Memory*) existent depuis les années 1950. Leur utilisation était cependant limitée à des niches, tel le domaine aérospatial. Ces mémoires résistent mieux aux effets des rayons cosmiques, qui peuvent induire des erreurs d'écriture des bits dans les autres dispositifs de stockage. Depuis dix ans, les mémoires magnétiques ont

connu de nombreuses innovations qui ont relancé leur intérêt.

MRAM et PCRAM, des pistes sérieuses

Il existe aujourd'hui des mémoires magnétiques ayant une capacité de stockage de 64 mégaoctets. La résistance qui code le bit est contrôlée par l'aimantation des éléments dont est formé le composant (voir l'encadré ci-dessous). Le temps d'écriture est de l'ordre de la nanoseconde, mais le temps nécessaire pour lire une information est plus long. En effet, la différence de résistance entre les états « 0 » et « 1 » n'étant pas très marquée (le rapport des résistances est inférieur à dix), il faut plus de temps pour lire correctement le bit d'information.

Le deuxième dispositif pour remplacer la mémoire dynamique est la mémoire à changement de phase (PCRAM ou *Phase Change Random Access Memory*). Il a été développé à la fin des années 1960 par l'inventeur américain Stanford Ovshinsky (un autodidacte qui a déposé plus de 400 brevets en 50 ans et dont un grand nombre sont exploités industriellement). Dans cette mémoire, la résistance est déterminée par la structure atomique d'un semi-conducteur. Ce dernier peut être cristallin ou amorphe, et devient ainsi conducteur ou isolant (voir l'encadré ci-dessous). Un élément chauffant permet de changer de façon réversible la structure du semi-conducteur. Ce type de mémoire demande donc plus d'énergie pour écrire ou effacer un bit que dans le cas de la mémoire magnétique.

MÉMOIRES DYNAMIQUES

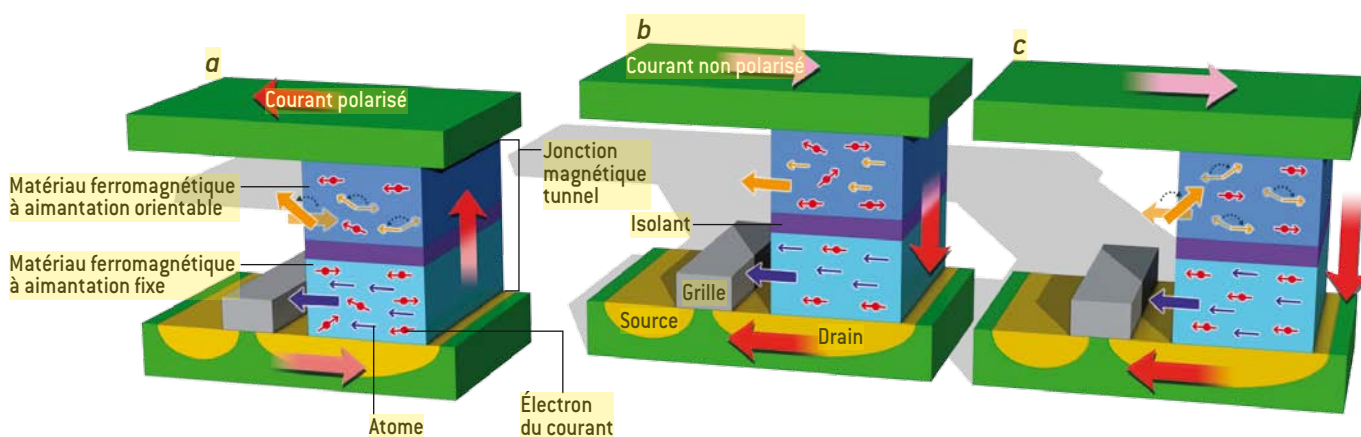
Mémoires magnétiques

Pour remplacer les mémoires dynamiques et dépasser leurs limites, une des pistes les plus intéressantes est celle des mémoires magnétiques (MRAM pour *Magnetic Random Access Memory*). Dans l'exemple de la mémoire magnétique à transfert de spin, le bit de mémoire est constitué d'un transistor et d'une résistance. Cette dernière est constituée d'une superposition de deux films minces de matériau ferromagnétique séparés par une barrière isolante qui ne peut être franchie par des électrons que par effet tunnel – on parle de jonction magnétique tunnel. L'information est portée par la résistance de la jonction : on a « 0 » si la résistance est importante, « 1 » si la résistance est faible. L'aimantation des deux couches ferromagnétiques contrôle cette ré-

sistance. L'aimantation de la couche inférieure est fixée. Dans l'autre, il est possible de l'orienter grâce à un courant dont le spin des électrons – leur moment cinétique intrinsèque – est polarisé : tous les spins sont dirigés dans le même sens. Ce spin permet d'orienter l'aimantation du matériau. Le schéma (a) indique le processus d'écriture et le passage d'un bit 0 à un bit 1. Un flux d'électrons (*en rouge*) non polarisé arrive par le bas. Lors du passage de la barrière de potentiel, le transfert des électrons de spin dirigé vers la gauche est facilité. Ainsi, dans le matériau ferromagnétique, le flux d'électrons est polarisé. Le spin des électrons interagit avec les spins des atomes du matériau (*en jaune*) et les réoriente de la droite vers la gauche. L'aimantation des deux

matériaux ferromagnétiques (*violet et jaune*) est alors dans le même sens (parallèle). La résistance est alors faible. Un courant plus faible peut être injecté dans le dispositif pour mesurer cette résistance et signaler que l'état correspond à un bit 1.

Pour faire passer l'état d'un bit de 1 à 0, on inverse le sens du courant de polarisation. En arrivant par le haut (b), il n'est pas polarisé, mais seuls les électrons dirigés vers la gauche traversent la barrière. Il ne reste que des électrons de spin dirigé vers la droite dans le milieu ferromagnétique du haut (c), ce qui entraîne un basculement de l'aimantation de la gauche vers la droite. Les aimantations sont antiparallèles. La résistance est grande, ce qui correspond à un bit 0.



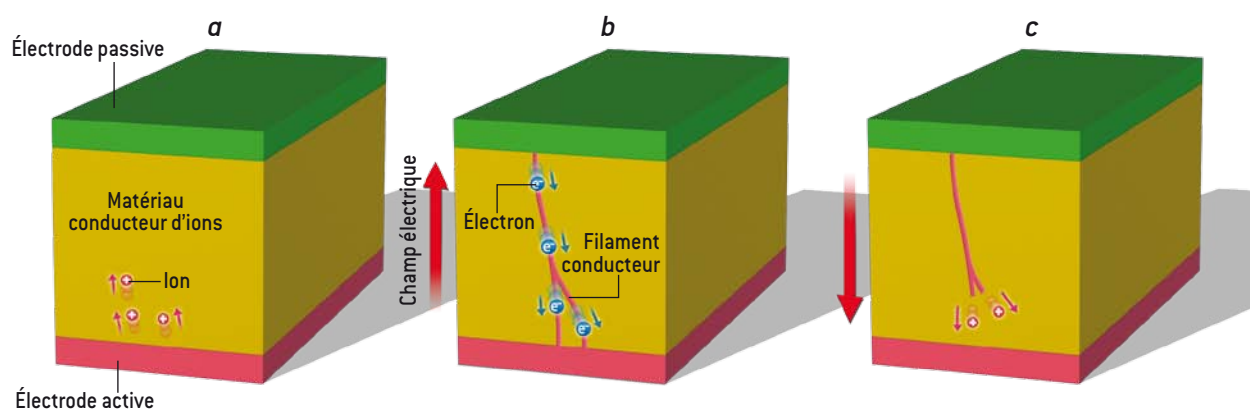
Les mémoires flash pourraient être remplacées par des dispositifs fondés sur les mémoires à oxydes (OxRAM) et les mémoires à pont conducteur (CBRAM). Dans les deux dispositifs, le bit d'information est porté par un transistor couplé à une résistance. Cette dernière est composée de deux électrodes séparées par un oxyde isolant ou un solide perméable à la conduction des ions. L'information est codée par la résistance du dispositif, qui dépend de la présence ou non d'un filament conducteur entre les électrodes. Ce filament est créé ou détruit par un stimulus électrique. Le phénomène électrique de claquage de l'oxyde (correspondant à la formation du filament conduc-

teur) a été étudié depuis les années 1960, mais l'industrie n'a commencé à s'y intéresser qu'à partir de 2004. En général, pour les mémoires à oxydes, le substrat est « vierge » lors de la première utilisation : il faut appliquer une tension importante pour amorcer la formation du filament. La tension d'utilisation par la suite sera beaucoup plus faible, car seul un petit élément du filament est construit ou détruit.

La physique des mémoires à pont conducteur est mieux établie que celle des mémoires à oxydes. La nature du pont dépend de la composition de l'électrode active (cuivre, argent...). Le filament se forme à partir de la dissolution de l'électrode active, qui émet des cations se propageant vers

l'électrode inerte grâce au champ électrique appliqué (a). Les cations sont réduits et forment un filament d'atomes neutres qui relie les électrodes (b). La résistance du dispositif chute (et fait passer le bit de l'état 0 à 1). Le processus est réversible : il faut inverser la polarité du champ électrique pour que les cations retournent à leur électrode initiale (c).

De nombreuses études cherchent à optimiser les performances de ce dispositif en associant divers matériaux pour les électrodes, aussi bien dans les mémoires à oxydes que dans celles à pont conducteur. De plus, la compréhension et la description microscopique des effets impliqués pourraient nécessiter plusieurs années.



Les mémoires à changement de phase atteignent aujourd'hui une capacité de un gigaoctet et les temps d'écriture sont de l'ordre de plusieurs dizaines de nanosecondes. De ce point de vue, ces dispositifs sont moins performants que les mémoires magnétiques. Mais la différence de résistance des deux états étant plus marquée (d'un facteur supérieur à 100), le temps de lecture est plus court. Par ailleurs, ces mémoires sont robustes et fonctionnent à haute température.

Le paysage des mémoires de stockage pourrait aussi changer d'ici cinq à dix ans. Comme nous l'avons vu, les disques durs sont les mémoires les moins chères, mais ils sont trop fragiles pour des utilisations nomades. Bien qu'ils soient déjà en partie remplacés par des dispositifs contenant des mémoires flash, de nouvelles mémoires de stockage se profilent. Si leurs caractéristiques deviennent intéressantes, elles pourront remplacer les mémoires

flash dans quelques années. Deux pistes sont prometteuses parmi les nombreuses solutions étudiées par les industriels : les mémoires à oxydes (OxRAM ou *Oxide-based Random Access Memory*) et les mémoires à pont conducteur (CBRAM ou *Conductive Bridge Random Access Memory*, voir l'encadré ci-dessus). Ces dispositifs sont récents, mais les recherches sont très actives et le nombre de prototypes augmente rapidement. Il n'est pas impossible que ces concepts de mémoires remplacent aussi les mémoires dynamiques. En 2013, une mémoire à oxydes de 32 gigaoctets a été annoncée par les Sociétés *Sandisk* et *Toshiba*.

Comme pour les mémoires magnétiques et à changement de phase, ces dispositifs sont constitués d'un transistor et d'une résistance variable. La valeur de la résistance détermine si le bit vaut 0 ou 1. Elle est contrôlée par un filament conducteur qui s'établit entre deux électrodes. Celui-ci peut être créé ou détruit par un champ et un courant électriques. Par exemple, dans une mémoire à pont conducteur, le filament métallique se

SI LES DISQUES DURS COMMENCENT déjà à disparaître dans les appareils nomades, les mémoires dynamiques pourraient être remplacées d'ici trois à cinq ans.