

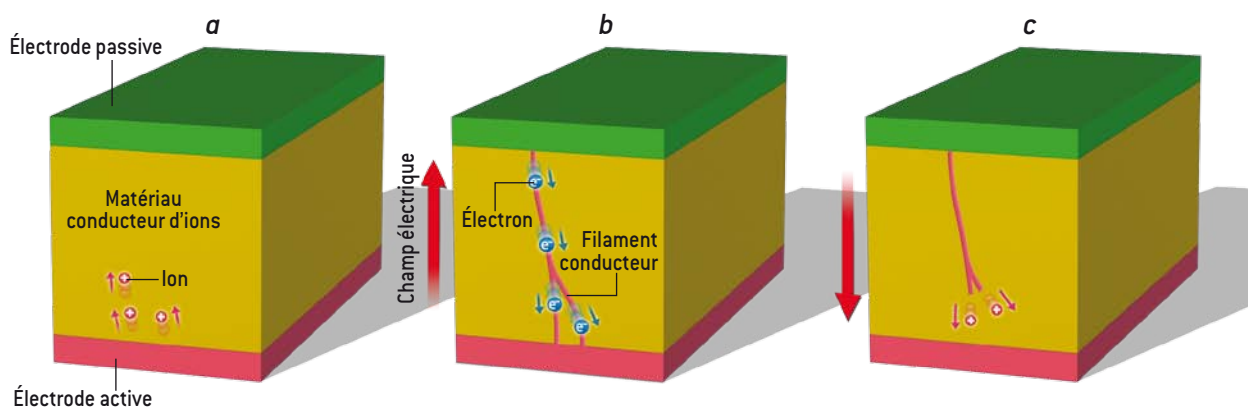
Les mémoires flash pourraient être remplacées par des dispositifs fondés sur les mémoires à oxydes (OxRAM) et les mémoires à pont conducteur (CBRAM). Dans les deux dispositifs, le bit d'information est porté par un transistor couplé à une résistance. Cette dernière est composée de deux électrodes séparées 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.