

Drive. Ces derniers ont plusieurs avantages. Les ordinateurs équipés de ce type de mémoires sont beaucoup plus rapides. Et l'absence d'éléments mécaniques les rend plus robustes et moins sujets aux pannes.

Du flash pour les nomades

Les habitudes nomades des utilisateurs de tablettes, d'ordinateurs ou de téléphones portables favorisent l'utilisation de systèmes résistants aux chocs. Toutefois, les disques durs ne disparaîtront pas dans un futur proche, leur coût restant dix fois inférieur à celui des mémoires flash.

Les mémoires dynamiques, les mémoires flash et les disques durs semblent atteindre leurs limites. Il est donc crucial de développer de nouveaux dispositifs

pour les remplacer. Mais les mémoires à venir ne pourront peut-être pas prétendre au statut de dispositifs universels. Les scientifiques continuent de développer des mémoires qui auront les caractéristiques soit de mémoire de travail, soit de mémoire de stockage, en améliorant leurs capacités de stockage, la vitesse de leur lecture ou de leur écriture, ou leur consommation d'énergie.

Ce dernier point est particulièrement étudié. Les mémoires non volatiles ont ici un réel avantage et devraient prendre une part de marché plus importante. Il est cependant difficile d'envisager un système uniquement composé de mémoires non volatiles. La mémoire la plus proche du microprocesseur est sollicitée en permanence et requiert des accès ultrarapides. La mémoire statique reste, dans ce cas, la

plus efficace et la plus économe en énergie. Il n'y a donc pas besoin de remplacer les mémoires statiques par des mémoires non volatiles (pour être exact, on distingue trois types de mémoires statiques, dont l'un fait l'objet de recherches pour le substituer par un système plus performant).

De nouveaux dispositifs sont pressentis pour remplacer les mémoires dynamiques et pour remplir l'espace de performance entre les mémoires dynamiques et les mémoires flash. Dans ces concepts, que nous allons présenter, le condensateur des mémoires dynamiques est remplacé par une résistance électrique qui peut varier, le bit correspondant valant 0 ou 1 selon que la résistance est faible ou élevée. Il n'y a pas de problème de fuite de charges électriques dans ces dispositifs ; dès lors, ces mémoires sont non volatiles.

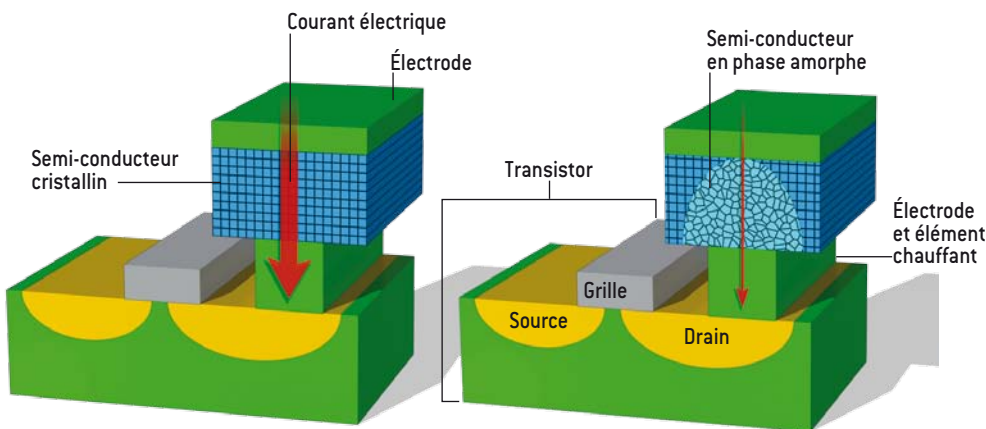
LES SUCCESSIONS DES

Pour gérer l'énorme flux d'informations à traiter et à archiver, de nouveaux dispositifs sont en cours de développement. Ils pourraient être bientôt sur le marché et remplacer les systèmes actuels. Les mémoires dynamiques sont des mémoires volatiles, qui nécessitent d'être réécrites en permanence. De ce fait, elles sont peu économes en énergie. Les mémoires à changement de phase et les mémoires magnétiques pourraient leur succéder en remplaçant les condensateurs, à l'origine de la volatilité, par des résistances.

Mémoires à changement de phase

Les mémoires à changement de phase (PCRAM ou *Phase Change Random Access Memory*) sont constituées d'un transistor et d'une résistance. Celle-ci se compose de deux électrodes séparées par un semi-conducteur, tel l'alliage germanium-antimoine-tellure, aux propriétés particulières. La structure de ce dernier peut être cristalline ou amorphe. Dans le premier cas, la circulation des électrons du courant électrique est aisée : la résistance est faible et le bit vaut 1 (*à gauche*). Avec une phase amorphe, la circulation des électrons est plus difficile, la résistance est supérieure (*à droite*). Cela correspond à un bit égal à 0.

Pour changer la valeur du bit, il faut changer la structure du semi-conducteur par chauffage. Un alliage résistif sert de source de chaleur. Il convertit un courant électrique en chaleur par effet Joule. Avec un chauffage bref, on obtient une structure amorphe. Si le chauffage est soutenu, une structure cristalline se met en place. Pour effectuer ces transitions réversibles,



des températures de 500 °C à 800 °C sont nécessaires, ce qui implique des courants assez importants dans les dispositifs. La différence de résistance des deux états est bien marquée (rapport supérieur à 100), ce qui permet d'avoir un temps de lecture assez court, car il n'y a pas d'ambiguïté entre les deux états.

Une telle amplitude de résistance permettrait d'utiliser un tel dispositif pour plusieurs bits. Dans ce cas, la plage de résistance n'est pas divisée en deux intervalles correspondant aux bits 0 et 1, mais en davantage d'intervalles, ce qui permet de coder deux bits (00, 01, 10 ou 11). Ce fonc-

tionnement est délicat à appliquer à cause de phénomènes de relaxation. Le matériau subit des chocs thermiques durant les étapes d'écriture et d'effacement. Entre ces étapes, une relaxation structurelle conduit à une variation stable de la résistance dans le temps, qui empêche une bonne utilisation des mémoires à changement de phase en mode multiniveaux.

En outre, ces mémoires ont une grande stabilité quand elles sont utilisées à haute température. Elles peuvent être utilisées dans certaines applications – automobiles, cartes à puces... – où les contraintes de température sont fortes.

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 — 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.

