

transistors. De plus, la forme des condensateurs est aujourd'hui cylindrique et très allongée, ce qui réduit la consommation électrique. Avec un rapport de la longueur du condensateur sur la largeur de sa base qui peut atteindre 50, et une densité élevée de condensateurs, les fabricants se trouvent confrontés à plusieurs défis : la production de cavités aussi longues et étroites, et la gestion des problèmes de fuites. La limite de miniaturisation semble atteinte pour ces dispositifs, dont la densité de stockage (quatre gigaoctets) augmente difficilement.

Ainsi, les ingénieurs travaillent en priorité sur deux aspects relatifs aux mémoires dynamiques : l'augmentation de la densité d'information et l'économie d'énergie, cette dernière étant obtenue en supprimant la volatilité.

Les « mémoires flash » sont un type de mémoire non volatile. Mais elles ne peuvent pas remplacer les mémoires dynamiques. Situées plus bas dans la pyramide des mémoires, les mémoires flash ont un temps d'accès d'une dizaine de microsecondes – soit deux ordres de grandeur de plus que les mémoires dynamiques. Dans les mémoires flash, chaque bit est représenté par l'état ouvert ou fermé d'un transistor. Un réservoir au sein du transistor peut accumuler une certaine quantité d'électrons

qui créent un champ électrique. Celui-ci laisse passer ou bloque le courant qui traverse le transistor.

Les mémoires flash sont non volatiles, car les électrons restent bloqués dans le réservoir même en l'absence d'une source extérieure (qui, dans les mémoires dynamiques, rafraîchit les informations). Le blocage est dû au fait que le réservoir d'électrons est intercalé entre deux couches d'oxydes qui l'isolent du substrat environnant. Ainsi, une information archivée n'est pas altérée.

Depuis leur développement dans les années 1980, les mémoires flash ont été miniaturisées. Elles atteignent actuellement des capacités de stockage de 128 gigaoctets. Cependant, pour conserver les propriétés de non-volatilité, les couches d'oxydes ne peuvent pas être soumises à la même miniaturisation, qui affaiblirait le blocage des électrons. En outre, comme pour les mémoires dynamiques, la miniaturisation augmente le risque d'erreurs d'écriture et de lecture.

Aujourd'hui, pour augmenter la quantité d'information qu'il est possible d'enregistrer sur une plaque de silicium, les fabricants créent plusieurs couches de mémoire empilées les unes sur les autres. La capacité de mémoire est multipliée approximativement par le nombre de couches.

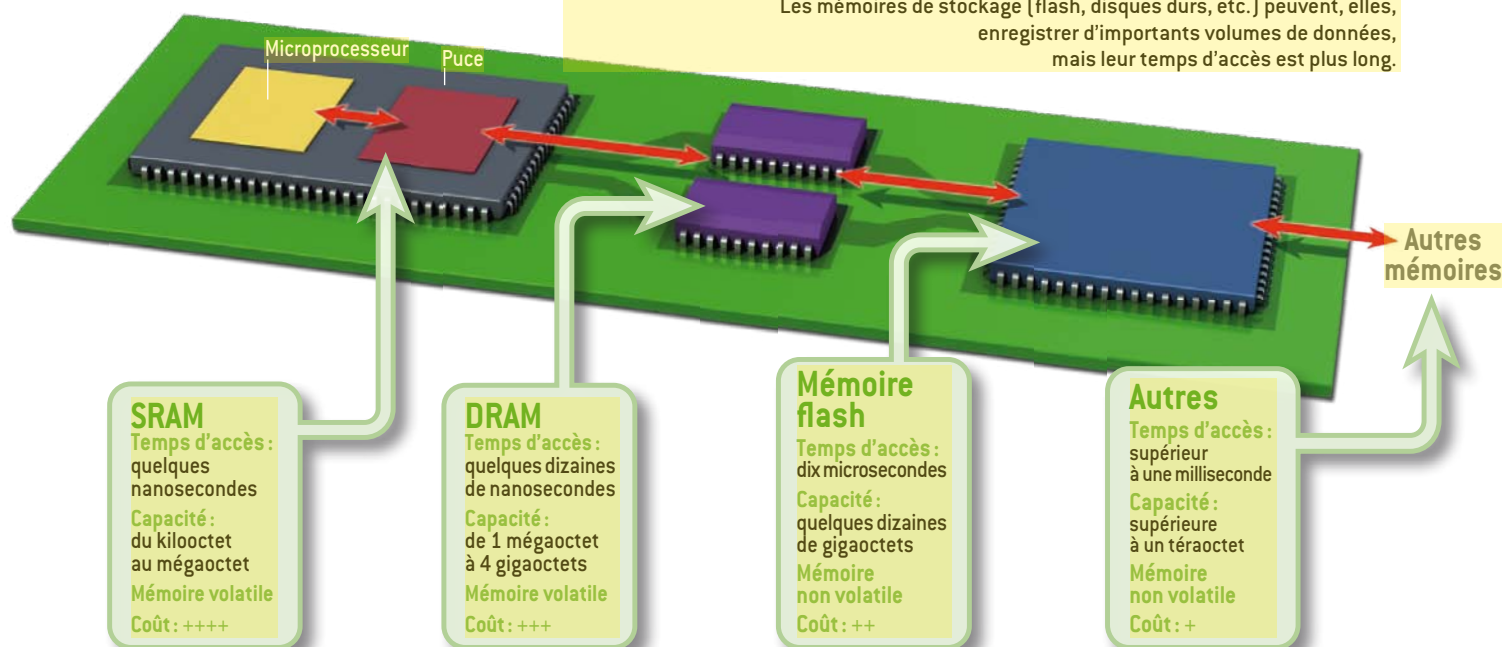
Même si les mémoires flash semblent aussi atteindre des limites de miniaturisation, elles pourraient remplacer une partie des « disques durs ». Ces supports numériques ont été développés dans les années 1950 par IBM. L'information est enregistrée sur des couches de matériau ferromagnétique déposé sur des disques rotatifs. Un élément, la tête de lecture, monté sur un bras mécanique, lit l'information sur le disque à partir de l'état magnétique local du bit. Il peut inscrire un bit grâce à des effets magnétiques réversibles.

Disques durs : volumineux, mais lents

Les disques durs occupent le bas de la pyramide des mémoires. Leur densité d'information est supérieure à celle des mémoires flash et leur prix par unité de mémoire stockée est plus faible. En revanche, le temps d'accès est de l'ordre de la milliseconde, car la tête de lecture doit d'abord être positionnée au bon endroit par un déplacement du bras mécanique et par une rotation du disque.

Dans les années à venir, les disques durs de certains appareils pourraient être remplacés par des dispositifs contenant des mémoires flash, les SSD, ou *Solid State*

2. UN SYSTÈME NUMÉRIQUE associe toujours des mémoires de travail et des mémoires de stockage. Les premières (mémoires statiques et mémoires dynamiques) sont placées au plus près du microprocesseur, chargé de faire les calculs. Elles échangent rapidement les informations avec le processeur, mais ne présentent que de petits volumes de stockage. Les mémoires de stockage (flash, disques durs, etc.) peuvent, elles, enregistrer d'importants volumes de données, mais leur temps d'accès est plus long.



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.

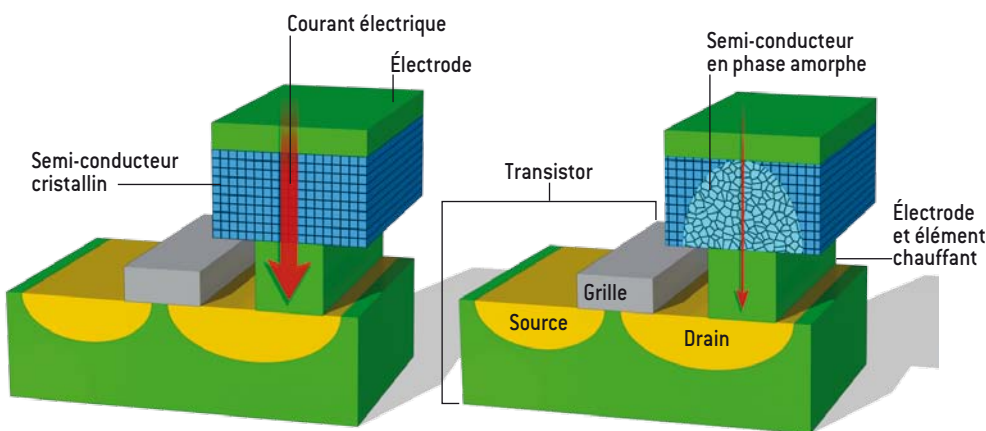
LES SUCCESSIONS DES

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.