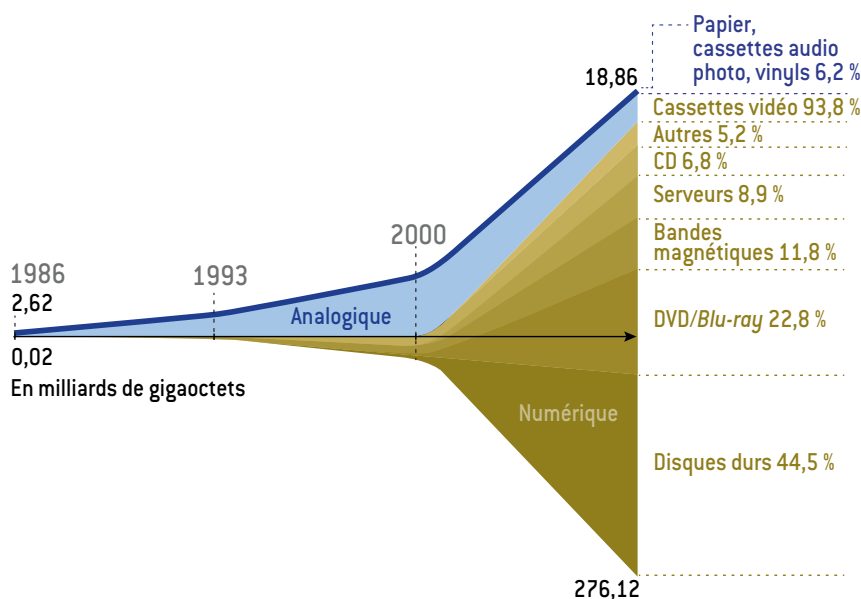




1. LES DONNÉES NUMÉRIQUES ont connu un essor spectaculaire. Le développement de supports numériques bon marché et simples d'utilisation marque un tournant au début des années 2000. Le numérique a supplanté les supports analogiques et le volume total de données enregistrées a augmenté rapidement. Cette tendance ne semble pas faiblir.

volumes de données. Pour archiver les informations, il faut donc ajouter au dispositif des mémoires de stockage.

Les deux types de mémoires sont complémentaires et cohabitent dans tous les dispositifs numériques (voir la figure 2) : ordinateurs, tablettes, téléphones portables, clés USB... On peut définir une hiérarchie pyramidale des mémoires. Au sommet se situent les mémoires de travail, aux temps d'accès très courts et aux capacités de stockage faibles. En descendant dans la pyramide, les volumes d'information qu'il est possible de stocker augmentent au détriment des temps d'accès. La base de la pyramide correspond aux mémoires de stockage.

Les mémoires de travail et de stockage se distinguent aussi par leur capacité à conserver l'information sans alimentation électrique. Les mémoires de travail sont dites volatiles : en l'absence d'une source d'énergie électrique, l'information qui y est enregistrée disparaît en quelques dizaines de millisecondes. Ainsi, quand un ordinateur effectue une opération et qu'une panne de courant survient, toutes les informations stockées dans la mémoire de travail sont perdues. Les mémoires de stockage sont, au contraire, non volatiles : l'information reste en mémoire. Si vous sauvegardez des fichiers sur une clé USB ou sur un disque dur et que vous éteignez l'ordinateur, l'information ne sera pas perdue et pourra être réutilisée ultérieurement.

Examinons le fonctionnement des différentes mémoires. Au plus près du processeur, on distingue deux types de mémoires de travail : les mémoires statiques (ou SRAM pour *Static Random Access Memory*) et les mémoires dynamiques (ou DRAM pour *Dynamic Random Access Memory*). Les premières occupent le sommet de la pyramide. Elles sont directement construites sur la puce de silicium du microprocesseur, car elles sont constituées de transistors, comme ce dernier. Leur temps d'accès est de quelques nanosecondes, mais le volume de stockage est très faible.

Les mémoires dynamiques, juste en dessous dans la pyramide des mémoires, ont une capacité de stockage plus importante ; elles sont en général placées sur des puces indépendantes, dont le temps d'accès est compris entre 10 et 100 nanosecondes. Ces mémoires de travail sont utilisées pour effectuer les opérations de calcul des microprocesseurs.

Des mémoires volatiles qui perdent les données

Dans une mémoire dynamique, le bit d'information est enregistré par un système composé d'un transistor et d'un condensateur. Ces composants sont gravés dans le substrat semi-conducteur en silicium de la puce de mémoire. Le transistor agit comme un interrupteur qui autorise, s'il est ouvert, la lecture du bit par un courant électrique. Physiquement, l'état du bit est défini par la charge électrique (l'accumulation d'électrons) du condensateur. Si le condensateur est chargé, le bit vaut 1, s'il est déchargé, le bit vaut 0.

Le problème des condensateurs est qu'ils retiennent mal les électrons, qui fuient dans le silicium environnant. Pour cette raison, la mémoire dynamique est volatile. Il est donc nécessaire de réécrire le bit d'information régulièrement, toutes les quelques dizaines de millisecondes, pour éviter que le condensateur ne se décharge trop et que le bit change d'état. Ainsi, sans alimentation électrique, l'information disparaît de la mémoire.

Dans les premières mémoires dynamiques des années 1960, les transistors et les condensateurs étaient accolés. La miniaturisation a conduit à réduire la taille des composants, mais aussi à changer leur placement relatif. Les condensateurs sont maintenant construits au-dessus des

L'AUTEUR



Luca PERNIOLA dirige le groupe des technologies de mémoires avancées au Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (LETI) au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, à Grenoble.

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.

