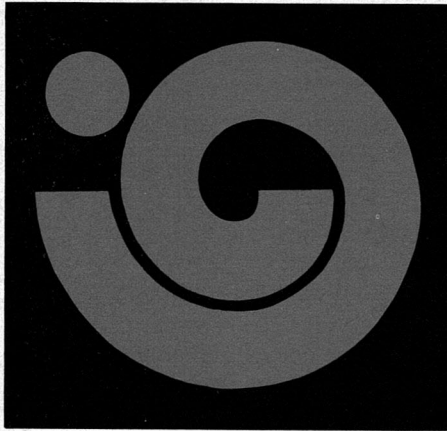


Mémoire à gaufre



par J. P. VASSEUR (CSF)
et J. AVILES (CAE)

Pour bien comprendre le rôle de la mémoire dans un ordinateur, analysons d'abord la méthode employée par un ingénieur pour calculer, par exemple, un pont. Il va se munir d'une feuille de papier et d'un crayon, puis va d'abord écrire les relations théoriques qui résolvent le mieux possible le problème posé. Il écrira ensuite les valeurs numériques, telles que la portée du pont, la charge à supporter, etc. Ces opérations nécessitent de l'intelligence et un ordinateur ne pourrait pas les effectuer.

L'ingénieur va alors entreprendre la résolution numérique de son calcul en remplaçant de proche en proche les grandeurs théoriques de ses équations par des valeurs numériques. Au cours de cette dernière phase, il sera obligé d'écrire sur le papier de nombreux résultats intermédiaires qu'il reprendra pour la suite du calcul.

Dans toutes ces opérations, le papier aura servi à aider l'ingénieur qui ne pouvait pas se rappeler par cœur de tous les détails du calcul. Autrement dit, le papier a remplacé la mémoire de l'ingénieur.

Un ordinateur résout un calcul exactement de la même façon. Il se compose d'une unité de calcul qui effectue les opérations arithmétiques et d'une mémoire. Celle-ci contient d'abord le programme, c'est-à-dire les équations à résoudre, introduites par l'homme sous la forme du détail de la suite des opérations à effectuer. La mémoire contient également les données numériques du problème et stocke les résultats intermédiaires.

La mémoire du ordinateur joue donc le rôle du papier dans un calcul à la main. Mais l'unité arithmétique calculant infiniment plus vite que l'homme, on comprend qu'un ordinateur demande beaucoup de mémoire, un homme effectuant la même quantité de calculs utiliserait aussi beaucoup de papier.

La capacité de calcul est très souvent limitée par le volume de la mémoire et les ordinateurs modernes en demandent de plus en plus. Cette tendance ne fait qu'augmenter avec l'utilisation des ordinateurs en temps partagé, c'est-à-dire pour résoudre plusieurs problèmes en même temps.

On sait que les ordinateurs utilisent le langage binaire, composé de combinaisons des deux chiffres 0 et 1. Une cellule élémentaire de mémoire stocke donc un chiffre 0 ou 1 et les gros ordinateurs modernes comportent sou-

vent des millions ou des dizaines de millions de cellules élémentaires. Des volumes encore plus grands allant jusqu'au milliard de cellules, sont sérieusement envisagés dans les laboratoires de recherche. Pour fixer les idées, les ordinateurs précédents comportaient seulement des dizaines ou des centaines de milliers de cellules de mémoire.

Une seconde caractéristique importante des ordinateurs actuels est la vitesse de travail, que l'on cherche de plus en plus grande. Cette course à la vitesse répond à un double impératif. D'une part, jusqu'à une certaine limite, le prix d'un ordinateur croît moins vite que sa vitesse alors que le travail effectué par heure est directement proportionnel à cette vitesse. Les ordinateurs rapides sont donc plus économiques. D'autre part, il existe de plus en plus des applications en temps réel où la vitesse de calcul est imposée. Par exemple, le guidage d'une fusée au départ exige des calculs très complexes et il faut évidemment les faire très vite car il n'est pas question d'arrêter la fusée pour attendre le ordinateur.

En pratique, la vitesse des ordinateurs est presque toujours limitée par celle de la mémoire. En effet, le cycle typique d'un ordinateur consiste à prendre certains nombres dans la mémoire, effectuer sur eux l'opération indiquée par le programme et ranger le résultat dans la mémoire. Il est donc raisonnable de demander que la mémoire ait une rapidité comparable à celle de l'unité arithmétique.

Les progrès réalisés surtout dans les circuits intégrés logiques, ont rendu maintenant les opérations arithmétiques extrêmement rapides. L'unité de temps est devenue la nanoseconde, c'est-à-dire le milliardième de seconde et les opérations arithmétiques nécessitent quelques dizaines à quelques centaines de ces unités. Ce sont là les vitesses demandées aux nouvelles mémoires et il est intéressant de faire une comparaison avec les mémoires actuelles, dont la rapidité est de l'ordre du millionième de seconde alors que les mémoires récentes étaient cinq à dix fois plus lentes.

L'étude des nouvelles mémoires pose donc le problème d'augmenter sérieusement à la fois le volume et la vitesse des mémoires actuelles. Ces deux exigences sont d'ailleurs contradictoires pour plusieurs raisons dont l'une, très fondamentale, est que le courant électrique met un certain temps à se propager le long des fils.

Fig. 1
Mémoire à gaufre, 64 mots-36 bits

Fig. 2
Vue en coupe

Fig. 3
Etat magnétique du métal après écriture

Fig. 4
Etat magnétique du métal après lecture

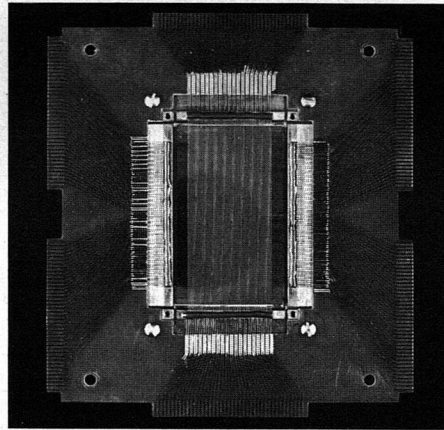


Fig. 1

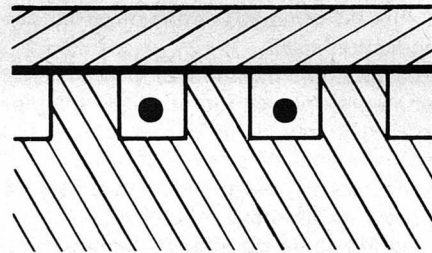


Fig. 2

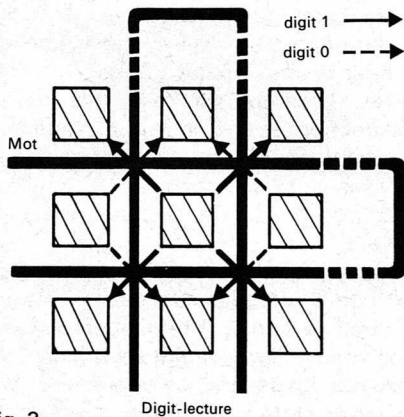


Fig. 3

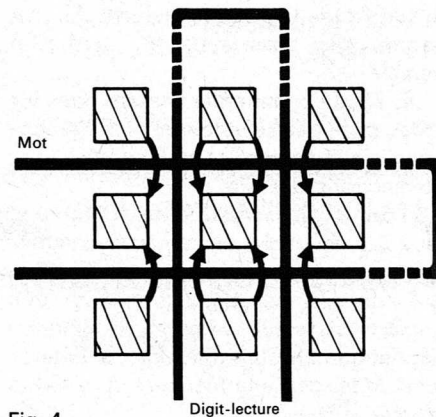


Fig. 4

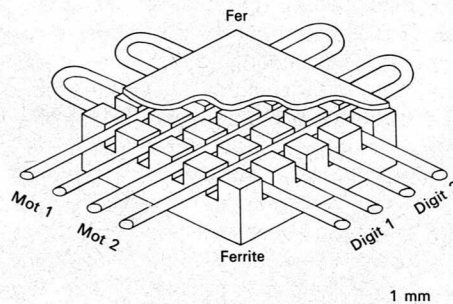


Fig. 5

Dans le vide, la lumière parcourt 30 cm par nanoseconde et le courant électrique va trois à dix fois moins vite sur les fils d'une mémoire à cause de l'interaction avec les cellules. Dans une mémoire de grande capacité, les fils sont longs et le temps de propagation des signaux devient notable devant la rapidité désirée. Le seul moyen de faire une mémoire rapide et de grande capacité est de la réaliser physiquement petite, ce qui conduit à des dimensions microscopiques pour les cellules élémentaires.

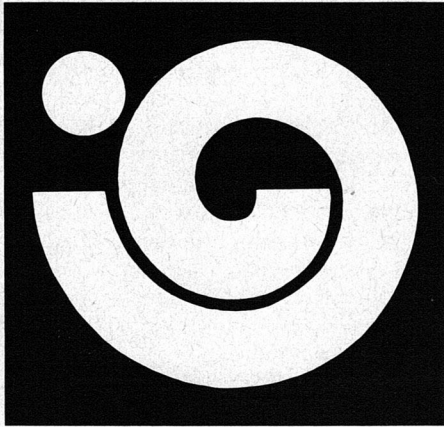
Mais le problème le plus ardu posé par les nouvelles grosses mémoires est le prix. Pour fixer les idées, le prix des mémoires rapides actuelles, de quelques centaines de milliers de cellules, est de l'ordre du franc lourd par cellule. Ce prix diminue bien quand la capacité augmente, mais beaucoup moins vite. On conçoit ainsi que l'augmentation sérieuse de la capacité ne soit possible que si le prix de la cellule élémentaire est nettement abaissé, alors qu'on demande en même temps des performances améliorées.

Après les solutions héroïques des tout premiers calculateurs, tubes à vide ou lignes à retard en mercure, une technique unique s'est très vite imposée; les mémoires à tores de ferrite. La cellule élémentaire est alors un minuscule tore en céramique magnétique, où l'information est représentée par le sens de l'aimantation. Les tores élémentaires sont assemblés en «plans» ou «matrices» à l'aide des fils de commande qui les traversent.

Cette technique est très bien au point mais semble atteindre les limites de ses possibilités. Son défaut fondamental est que les tores doivent être fabriqués, testés et assemblés un à un, ce qui limite à la fois la baisse de prix et la quantité produite. Par ailleurs, les vitesses actuelles deviennent difficiles à augmenter.

Tous les laboratoires du monde cherchent actuellement à mettre au point de nouvelles mémoires, réalisées par une fabrication collective des cellules élémentaires, ou «intégrées» pour prendre le mot à la mode. Le problème est très ardu, car la nouvelle technique doit, dès sa naissance, lutter en performances et surtout en prix, contre celle des tores qui bénéficie de près de vingt ans de mise au point et d'investissements industriels.

Des solutions très diverses ont été proposées. L'emploi de films magnétiques très minces, de l'ordre de 30 milliardièmes de millimètre, ne semble



pas couronné de succès malgré plus de dix ans d'études intensives. Les Japonais viennent de mettre au point une mémoire utilisant un métal magnétique orienté déposé sur un fil conducteur.

Dans la recherche de phénomènes autres que le magnétisme, un effort très important a porté sur les mémoires supraconductrices, fonctionnant à la température de l'hélium liquide (4 degrés absolus ou -269 degrés centigrades). En raison des difficultés de fabrication et de la gêne expérimentale apportés par une si basse température, ces mémoires semblent encore très loin de sortir du stade expérimental.

La mémoire à gaufre a été conçue pour concilier les avantages de différentes techniques, de façon à obtenir à la fois de bonnes performances et une fabrication aisée.

La fonction mémoire proprement dite est assurée par un film d'alliage magnétique dur très riche en fer. Le film a environ un millième de millimètre d'épaisseur et est déposé par électrolyse sur un substrat conducteur.

Le film de fer est appuyé sur une pièce de ferrite portant deux familles de fentes perpendiculaires, ce qui lui donne l'aspect d'une gaufre. A l'opposé du film de fer, la ferrite est douce, c'est-à-dire qu'elle laisse passer facilement le flux magnétique, mais sans en garder la mémoire.

Les fils de commande passant dans les fentes de la gaufre, et les cellules élémentaires de mémoire sont localisées aux intersections des fils.

En effet, une intersection comprend deux fils entourés de matériau magnétique, structure analogue à celle d'un tore traversé par deux fils dans une mémoire classique. Mais ici le matériau magnétique entourant les fils est hétérogène, le fer garde la mémoire et le ferrite referme le flux.

La mémoire à gaufre a ainsi à la fois les avantages des mémoires métalliques, grande vitesse et température de fonctionnement peu critique, et les avantages des mémoires à flux fermé, courant de commande faible, signal de sortie important et très faible sensibilité aux perturbations extérieures.

En pratique, pour compenser les signaux parasites qui deviennent importants aux très grandes vitesses, les fils de commande sont repliés en épingle et un point de mémoire est localisé sur quatre intersections. Cette redondance a en outre l'avantage de réduire considérablement l'influence de défauts localisés,

et donc d'augmenter le rendement de production.

La fabrication des mémoires à gaufre est assez aisée et ne comprend aucune opération critique. Des plans de 2000 à 4000 points (quatre fois plus d'intersections) sont fabriqués d'un seul coup. Le plus délicat est évidemment de déposer par électrolyse le film de fer, dont les propriétés doivent être rigoureusement contrôlées. Par ailleurs, la pièce de ferrite est polie, puis les fentes γ sont sciées, toutes celles du même sens étant creusées en même temps. Enfin, des nappes de fil sont préparées sur des peignes pour être déposées en bloc dans les fentes. Il ne reste plus alors qu'à presser le dépôt de fer sur la gaufre et à déposer l'ensemble sur un support convenable.

Toutes ces opérations pourraient être facilement automatisées pour conduire à un prix très bas. Par ailleurs, les performances obtenues sont excellentes. Par exemple, l'écriture ou la lecture d'un point mémoire demande environ 100 milliardièmes de secondes, soit environ cinq fois moins que les mémoires à tore actuellement utilisées.

Ces résultats sont très encourageants. D'autant plus que deux variantes de la mémoire à gaufre sont également expérimentées avec succès.

Une technique très voisine de celle décrite permet de réaliser des mémoires « mortes » très rapides. Dans ces mémoires, l'écriture est faite lors de la construction et le calculateur n'effectue que des lectures. Les informations ainsi stockées sont en général des « micro-instructions » que le calculateur utilise souvent.

La seconde variante concerne la lecture non destructive. De même qu'avec les tores de ferrite, l'information stockée dans la mémoire à gaufre est effacée par la lecture. En général, on veut cependant conserver cette information et il faut la réinscrire. Le cycle d'une mémoire classique est ainsi composé d'une lecture puis d'une réinscription de l'information.

Moyennant quelques précautions, la mémoire à gaufre peut être rendue non destructive, c'est-à-dire que l'information n'est plus effacée par la lecture. Le calculateur est ainsi accéléré puisque les opérations de lecture et d'écriture sont maintenant dissociées et peuvent être faites indépendamment l'une de l'autre.

La mémoire à gaufre se présente ainsi comme une solution particulièrement avantageuse pour améliorer les performances de la nouvelle génération de calculateurs actuellement en étude.