

CHAPITRE IV

LE STOCKAGE DE L'INFORMATION EN MÉMOIRE CENTRALE

Les mémoires centrales des ordinateurs ont d'abord été construites à l'aide de *tubes* auxquels se sont rapidement substituées des matières magnétisables. Aujourd'hui les mémoires centrales à ferrites sont très répandues; nous en étudierons sommairement le fonctionnement ⁽¹⁾. Nous examinerons ensuite de quelle manière l'information est stockée dans les ferrites, et enfin de quelle façon cette information est *adressable*, c'est-à-dire comment on peut l'envoyer dans un endroit précis de la mémoire et l'y retrouver ensuite grâce aux *adresses* de la mémoire.

Section 1. Les mémoires à ferrites.

1. Les avantages de la ferrite. — 2. Caractéristiques du tore de ferrite. —
3. Emploi des tores. Disposition des tores en mémoires.

1. Les avantages de la ferrite.

L'introduction, voici un peu plus de dix ans, des *noyaux annulaires* ou *tores magnétiques* pour constituer les mémoires centrales a beaucoup contribué à l'amélioration de la vitesse et de la fiabilité des ordinateurs. Les mémoires utilisées auparavant contenaient soit des lignes à retard, généralement au

mercure, quelquefois au nickel ou au quartz, comme moyen de transmission, soit des tubes cathodiques, nommés tubes Williams du nom de leur inventeur.

Après quelques types de grands tores en anneaux pour des applications spéciales, les premiers tores qui trouvèrent une utilisation pratique pour les mémoires des ordinateurs avaient un diamètre extérieur de 2 mm environ, et fonctionnaient avec une durée de cycle de 10 μ s ⁽¹⁾.

Le cycle d'une ferrite se décompose ainsi :

- un temps de commutation pour la lecture destructive,
- un temps mort,
- un temps de commutation pour la réinscription,
- un temps mort.

Les deux temps morts servent à l'affaiblissement des phénomènes de transition dans les amplificateurs et dans d'autres parties de l'appareil électronique.

Pour obtenir des cycles plus courts, il faut limiter les phénomènes de transition et diminuer le temps de commutation proprement dit. Dans ce but, il faut utiliser des tores à grande force coercitive et avoir pour la lecture et l'écriture une intensité du champ assez grande; à courant égal, pour augmenter cette intensité, il faut recourir à des *tores plus petits*, ce qui permet d'ailleurs de fabriquer des mémoires tressées plus compactes. Il en résulte des impulsions plus faibles lors de l'écriture, et une répercussion favorable sur les phénomènes de transition dans les amplificateurs. Ainsi, la durée du cycle peut être abaissée à 6 μ s avec un noyau torique de 1,25 mm de diamètre.

Le développement de la fabrication s'est orienté ensuite vers l'augmentation de la *fiabilité*. En connaissant mieux le processus de frittage du matériau utilisé, la stabilité des propriétés de l'élément de mémoire a été fortement améliorée. Par une meilleure composition de la matière, on obtient une plus faible sensibilité à la température et un cycle d'hystérésis plus rectangulaire ⁽²⁾. En outre, on s'est beaucoup attaché à l'amélioration des méthodes de câblage des matrices de tores.

Progressivement, l'amélioration de la technologie a permis, d'une part, d'obtenir en 1961 des tores encore plus petits, de diamètre extérieur de 0,75 mm et, d'autre part, d'accélérer le fonctionnement des montages électroniques, de sorte que la période du cycle a été ramenée à environ 2 μ s.

Il est évident que les problèmes de câblage des tores en sont devenus plus difficiles : il faut ainsi faire passer trois ou quatre fils par un trou ayant un diamètre de 0,4 mm. On a cependant réussi, non seulement à obtenir des tores encore plus petits (0,5 mm de diamètre extérieur), mais aussi à les câbler sans difficultés majeures. Avec ces tores, on obtient des périodes de cycle d'environ 1 μ s. Si l'on peut fabriquer des tores en ferrite encore plus petits, le câblage

⁽¹⁾ 10 μ s (dix microsecondes), c'est-à-dire dix millièmes de seconde.

⁽²⁾ Nous reviendrons plus loin sur ce point.

⁽¹⁾ La technique plus évoluée des mémoires à films minces a été abordée au chapitre II.

de tels ensembles soulève cette fois d'autres difficultés dues en particulier à la faible résistance des fils (voir fig. IV. 3).

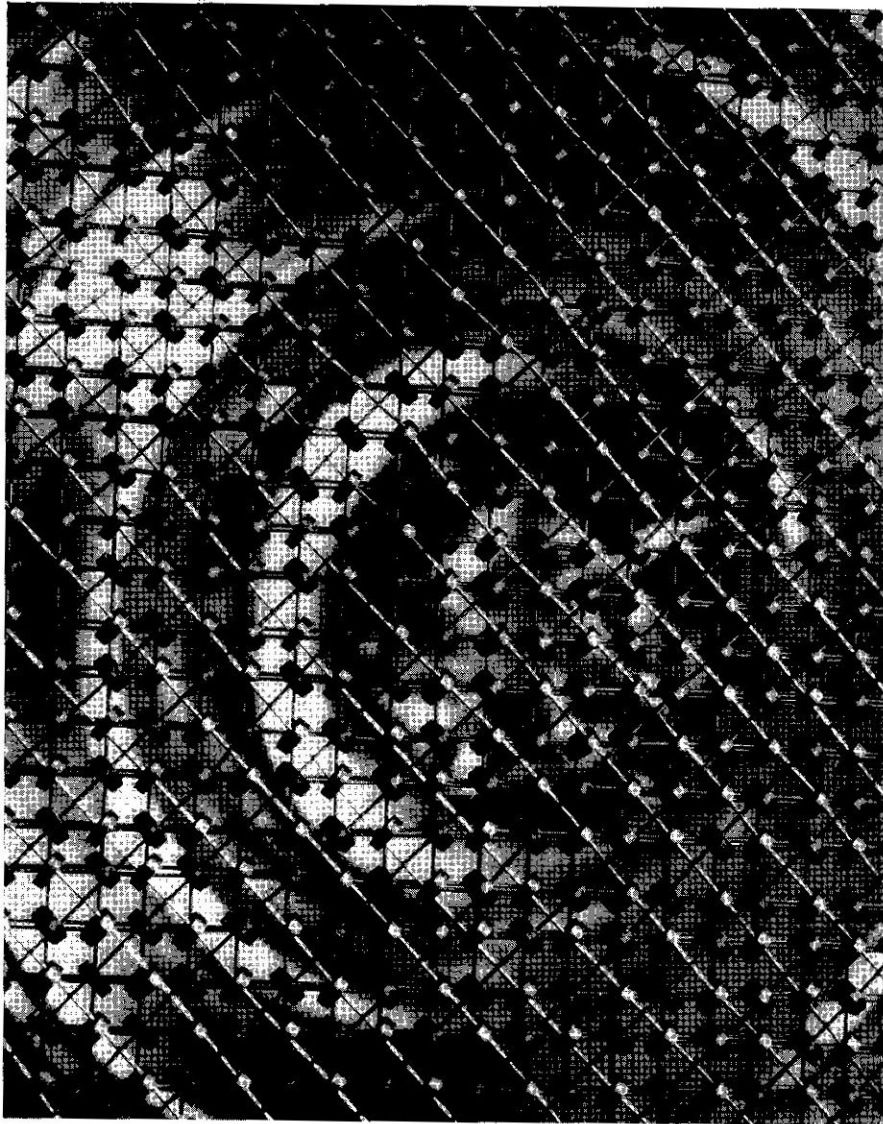


Photo IV. 1. — Disposition des tores en mémoire
(Document IBM).

Le tableau de la figure IV. 1 récapitule les différents diamètres des tores et les temps de commutation correspondants.

Diamètre extérieur du tore (mm)	Année de lancement	Temps de commutation (μ s) ⁽¹⁾	Courant de commutation (mA)
3,81	1953	10	400
2,03	1955	1,5	700
1,27	1958	1,0	500
0,76	1962	0,5	650
0,51	1964	0,2	850

(¹) Le temps de commutation est inférieur à la moitié de la durée du cycle.

FIG. IV. 1. — Caractéristiques des tores.

2. Caractéristiques du tore de ferrite.

a) Ses dimensions.

Les tores de ferrite dont le diamètre est inférieur à 1 mm sont aujourd'hui d'usage très courant :

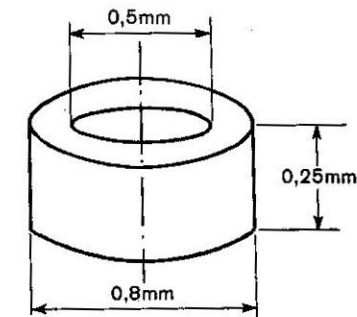


FIG. IV. 2. — Schéma d'un tore.

b) Le matériau.

Le tore est fait d'une substance ferromagnétique possédant un cycle d'hystérésis ⁽¹⁾ qui, pour remplir convenablement la fonction de sélection, c'est-à-dire prendre deux états stables avec passage rapide de l'un à l'autre, doit être le plus rectangulaire possible (voir fig. IV. 4). Tel est le cas de certains alliages Fe-Ni (Rectimphy, Deltamax), et aussi celui des ferrites (minerai de fer fortement magnétisable ⁽²⁾).

⁽¹⁾ Le phénomène d'hystérésis est une propriété caractéristique des substances ferromagnétiques, pour lesquelles l'induction, à un instant donné, dans l'échantillon considéré, dépend non seulement du champ magnétisant, mais aussi des états magnétiques antérieurs de l'échantillon.

Le cycle d'hystérésis est la suite des valeurs que prend l'induction magnétique dans un corps ferromagnétique, lorsque le champ varie entre deux valeurs égales et de signes contraires. Un cycle rectangulaire est le signe du passage rapide d'un état à l'autre.

⁽²⁾ Les oxydes soigneusement purifiés sont finement broyés, mélangés à un liant organique, puis moulés sous une pression de plusieurs tonnes par centimètre carré. Les pièces sont ensuite frittées entre 1 200 et 1 400 °C pendant plusieurs heures en atmosphère contrôlée.

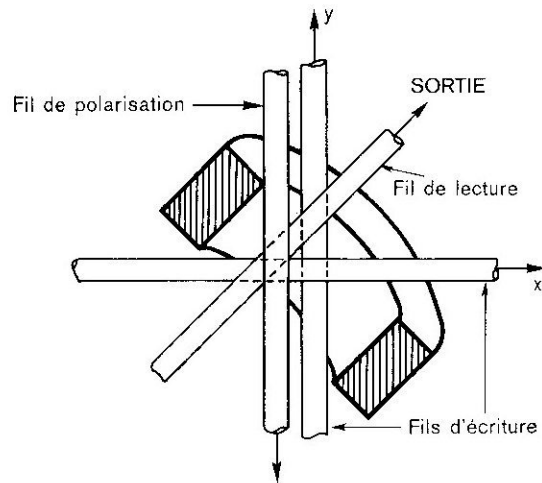


FIG. IV. 3. — Schéma de câblage d'un tore.

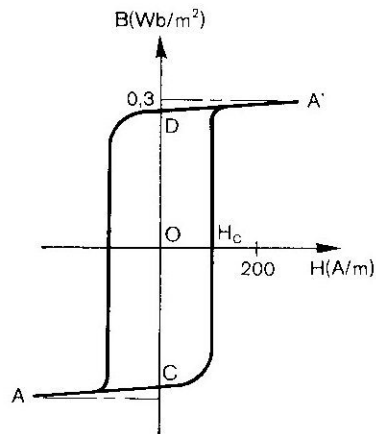


FIG. IV. 4. — Schéma d'un cycle d'hystérésis.

Le cycle d'hystérésis représente la variation de l'induction magnétique (en weber par mètre carré) en fonction du champ magnétique (en ampère par mètre). Le champ coercitif H_c correspond à la valeur du champ nécessaire pour faire passer l'induction d'une valeur négative voisine de OC à une valeur positive voisine de OD .

c) Application des phénomènes électromagnétiques aux ferrites.

Les lois fondamentales de l'induction énoncées et précisées par Faraday et Lenz peuvent se ramener aux points suivants :

Étant donné un circuit placé dans un champ magnétique tel que le flux d'induction Φ embrassé par le circuit soit variable :

— Si le circuit est ouvert, il y a entre les bornes de la coupure une force électromotrice qui n'existe que pendant la variation de Φ ; elle ne dépend ni de la façon dont cette variable est produite, ni de l'état antérieur du circuit.

— Quand le circuit est fermé, apparaît un courant induit dont la durée est encore celle de la variation de flux ; il ne dépend pas du courant pouvant éventuellement préexister dans le circuit. Le flux Φ' du champ associé au courant induit tend toujours à contrecarrer les variations de Φ ; quand Φ croît Φ' lui est opposé et le sens du courant est donné par la règle du bonhomme d'Ampère ; quand Φ décroît, Φ' s'ajoute à Φ et le courant change de sens.

Nous rappelons que le flux d'induction est le produit de l'induction magnétique B , supposée normale à la surface donnée, par l'aire de celle-ci.

La force électromotrice e créée par le circuit par induction est donnée par la formule $e = -d\Phi/dt$ (1).

Le flux s'exprime en webers (Wb) ou en teslas par mètre carré (T/m^2), la force électromotrice est en volts (V), l'induction magnétique en webers par mètre carré (Wb/m^2) ou en teslas (T).

$$\Phi = B \cdot S \quad (\text{en webers})$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{en volts.})$$

Les courbes des figures IV. 5, IV. 6 et IV. 7 illustrent ces phénomènes. Nous expliquerons ensuite l'application qui en est faite aux ferrites.

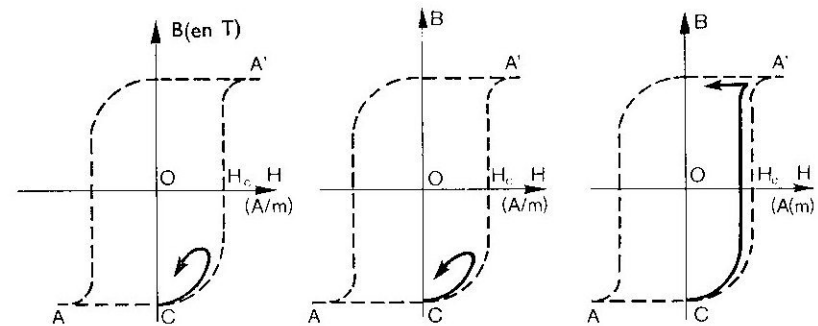


FIG. IV. 5. — Évolution du cycle d'hystérésis en fonction du champ magnétique.

Le schéma ci-dessus et les figures suivantes représentent trois états successifs d'un tore. Dans tous les cas le tore est magnétisé négativement au départ et l'induction B est voisine de OC .

Dans les deux premiers cas (à gauche et au centre) on fait varier le champ H d'une valeur inférieure à H_c ; aucune modification ne se produit dans l'état magnétique de la ferrite ; dans le troisième cas (à droite) on passe au point A' du cycle lequel correspond à un changement de signe de l'induction B .

(1) $d\Phi/dt$ est la dérivée du flux d'induction Φ par rapport au temps t .

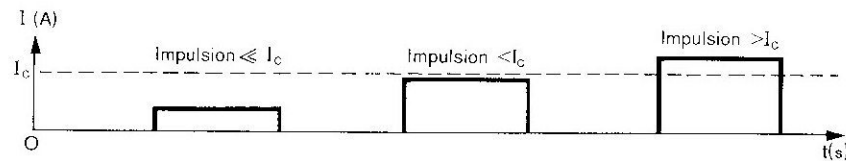


FIG. IV. 6. — Courbe d'intensité en fonction du temps.

Dans les deux premiers cas le courant qui traverse les fils d'écriture est inférieur au courant I_c qui crée le champ H_c ($H_c = \frac{I_c}{2\pi r}$).

Lorsque le courant devient supérieur à la valeur de I_c il y a basculement de l'état magnétique.

Sur cette figure ainsi que sur les suivantes le temps est porté en abscisse : il convient de ne pas oublier, en effet, que ces phénomènes ne sont pas instantanés.

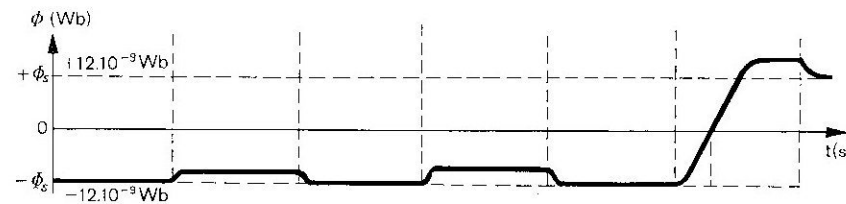


FIG. IV. 7. — Courbe du flux magnétique en fonction du temps.

Tant que l'état magnétique ne change pas, le flux magnétique Φ dans le tore reste voisin d'une valeur négative (ici : $-12 \cdot 10^{-9}$ Wb). Les faibles variations par rapport à cette valeur sont dues aux petites variations de l'induction magnétique B pendant les deux premières phases. Dans la troisième phase le flux devient positif ($+12 \cdot 10^{-9}$ Wb).

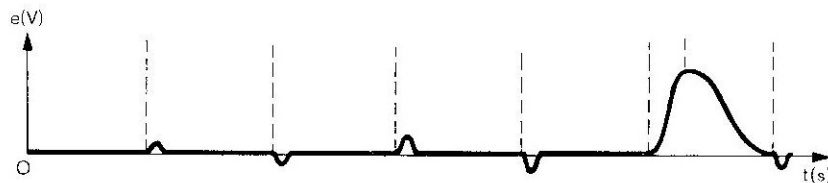


FIG. IV. 8. — Courbe de la différence de potentiel induite en fonction du temps.

On note ici la variation dans le temps de la différence de potentiel que l'on pourrait mesurer sur le fil de lecture, par exemple. Cette différence de potentiel est induite par la variation du flux (fig. IV. 7) et n'existe que pendant la variation de celui-ci. L'importance de cette différence de potentiel est fonction de la rapidité avec laquelle le flux varie, son signe est fonction du sens de variation du flux.

Le champ magnétique H d'un fil (ou d'un enroulement) parcouru par un courant de polarisation aimante tous les tores; leur induction est alors au point A du cycle et le flux est $-\Phi_s$. Si deux fils x et y sont traversés à la fois par une impulsion de courant donnant un champ en sens inverse du champ de polarisation, l'état magnétique du tore passe subitement en A' , ce qui induit

une tension dans le fil marqué sortie, et le flux devient $+\Phi_s$. Par contre, si un seul des fils x ou y amène une impulsion de courant, le point (B, H) passe seulement en C sans donner d'impulsion de courant dans l'enroulement de sortie (cf. fig. IV. 3. — Schéma de câblage d'un tore).

Le champ magnétique créé par le courant I qui parcourt le fil est :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (r \text{ rayon moyen du tore}).$$

Si H_c est le champ coercitif, c'est-à-dire la valeur de H suffisante pour changer la ferrite d'état, ou encore la faire passer d'une aimantation positive à une aimantation négative, la formule précédente devient :

$$H_c = \frac{I_c}{2\pi r} \quad (\text{en ampères/mètre}).$$

I_c est l'intensité du courant correspondant à H_c . La variation du flux n'est pas instantanée. Le temps dit de basculement, c'est-à-dire de passage d'un état à l'autre, est de l'ordre de 100 à 200 nanosecondes.

3. Emploi des tores. Disposition des tores en mémoire.

Le rôle des ferrites est de conserver des informations binaires. Le fonctionnement des mémoires matricielles à tores de ferrite est fondé sur l'emploi du circuit d'intersection.

Les tores sont disposés sous la forme d'une matrice carrée ou rectangulaire comme le montre la figure IV. 9. Les enroulements sont constitués par de simples fils traversant les tores et formant les lignes et les colonnes de la matrice.

Supposons qu'initialement tous les tores soient dans l'état 0 et examinons, d'abord, les opérations d'écriture; ensuite, les opérations de lecture.

Opération d'écriture : l'application d'une impulsion positive à une ligne ou à une colonne est supposée insuffisante pour que les tores intéressés changent d'état. Par contre, l'application simultanée d'une impulsion positive à une ligne et à une colonne entraîne le changement d'état du tore placé au point de croisement, pour lequel les deux effets se cumulent.

Opération de lecture : inversement, pour tester l'état d'un tore, on appliquera simultanément une impulsion négative aux deux fils qui s'y croisent. Si le tore est dans l'état 0, le fil de lecture qui traverse tous les tores en série sera le siège d'un signal de faible amplitude. Si, au contraire, le tore testé se trouve dans l'état 1, il passera dans l'état 0, et la variation de flux correspondante induira un signal de plus grande amplitude dans l'enroulement de lecture (fil de sortie).

Malheureusement, ce processus de lecture détruit l'information lue si le

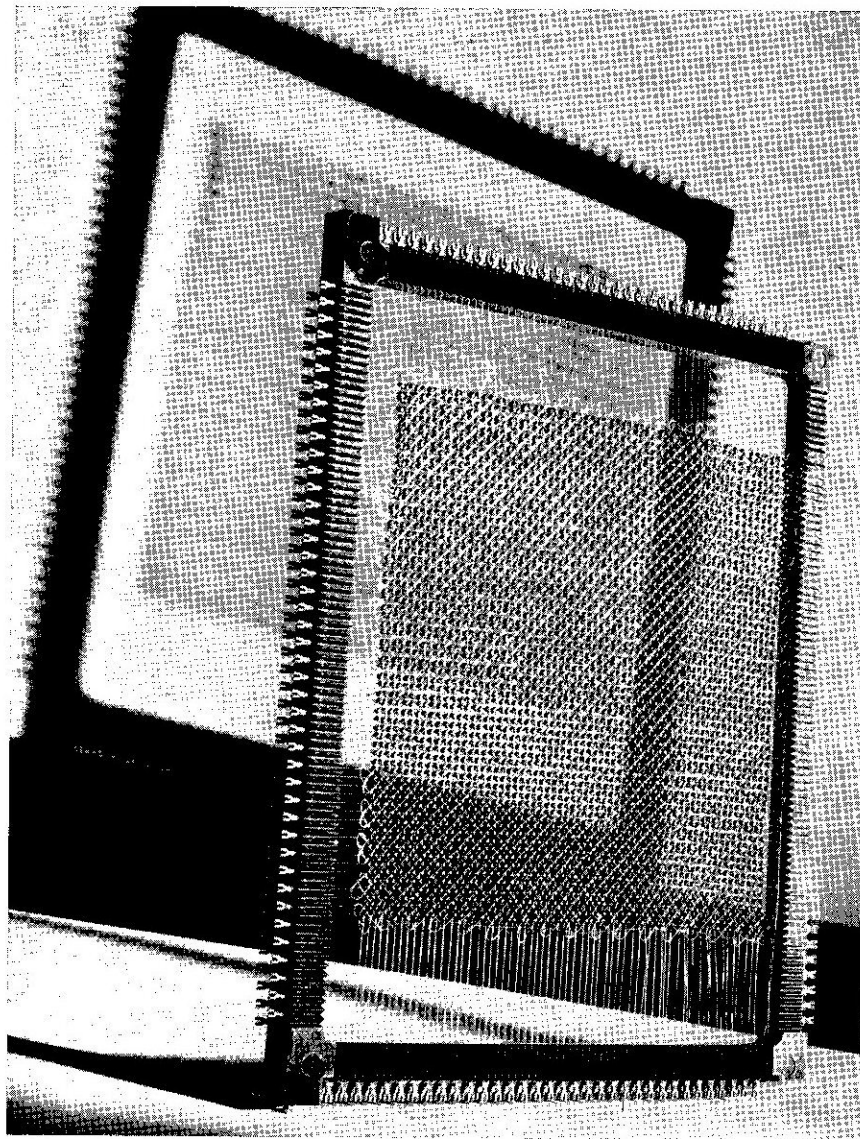


Photo IV. 2. — Matrice de tores
(Document IBM).

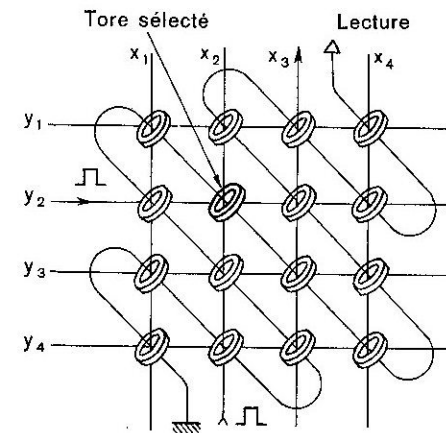


FIG. IV. 9. — Mémoire matricielle à tores de ferrite.

Un \square indique une impulsion d'intensité I dans les fils x_2 et y_2 , ce qui permet de sélectionner le tore à l'intersection de ces deux fils. Son changement d'aimantation induit une tension dans le fil de lecture.

Emplacement de la lettre A

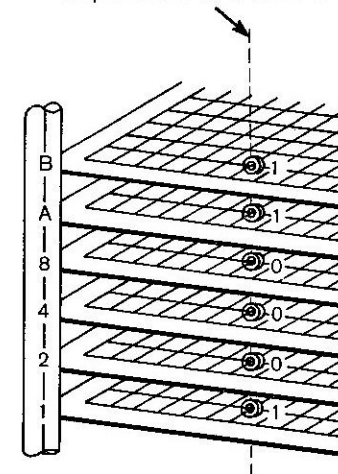


FIG. IV. 10. — Représentation d'une mémoire à couches parallèles ⁽¹⁾
(mode IBM 1400).

Chaque information est représentée en binaire par aimantation des tores sur une même verticale. Il s'agit ici de la représentation de la lettre *A* dans une mémoire à ferrites du système IBM 1400.

⁽¹⁾ On prévoit toujours une couche supplémentaire de tores de façon à faire correspondre à chaque caractère (ici six tores) un tore qui permette un contrôle de la transmission et de la permanence des informations. Nous retrouverons le *bit de contrôle* dans l'écriture des bandes magnétiques (cf. chap. VII).

tore est dans l'état 1, information qui doit donc être rétablie immédiatement par des circuits annexes.

Des mesures doivent également être prises en vue de réduire l'influence des tensions parasites induites dans l'enroulement de lecture par les petites variations de flux qui se produisent dans les tores non sélectionnés et qui sont dues à la forme imparfaitement rectangulaire de la boucle d'hystérésis. Il ne faut pas que le cumul de ces signaux parasites risque de produire un signal d'amplitude comparable à celle des signaux utiles. On peut, par exemple, faire passer l'enroulement de lecture à travers les tores alternativement dans un sens et dans l'autre, pour que les signaux parasites s'annulent mutuellement en moyenne. Nous n'insisterons pas sur ces questions, dont l'importance technologique est cependant considérable.

On sait réaliser actuellement des matrices de plusieurs milliers de tores doués d'un temps d'accès de l'ordre de la microseconde. Cependant, la nécessité de rétablir l'information initiale après lecture allonge l'intervalle de temps qui doit séparer deux lectures successives.

Comme le montre la figure IV. 10 les matrices de tores se prêtent bien à la réalisation de mémoires à couches parallèles. On utilise autant de matrices que de chiffres dans les nombres à traiter, les chiffres d'un même nombre occupant des positions homologues dans les différentes matrices. On peut ainsi construire des mémoires à accès rapide d'une capacité atteignant un million de chiffres binaires.

Section 2. Les données en mémoire centrale.

A — Caractères et mots. 1. Le mot de la série GE 400. — 2. Le mot de la série ICL 1900. — 3. L'octet de la série IBM 360.

B — La représentation des nombres dans la mémoire centrale. 1. Les nombres en virgule fixe. — 2. Le principe de la virgule flottante. — 3. Les opérations en virgule flottante. — 4. La virgule flottante dans le système IBM 360. — 5. Le système des octets IBM : mode condensé (PACK) et mode non condensé (UNPACK).

A. CARACTÈRES ET MOTS

En réunissant un certain nombre de ferrites, dont chacune correspond à un *bit*, il est possible d'enregistrer en mémoire centrale soit des chiffres ou des lettres isolés, soit des nombres ou des groupes de lettres. Ainsi dans l'exemple de la figure IV. 10, un groupe de 6 bits permet d'enregistrer un chiffre ou une lettre dans les ordinateurs de la série IBM 1400. La mémoire centrale

de cette série est appelée *mémoire à caractères* car chaque caractère de 6 bits est *adressable* dans la mémoire, ce qui implique qu'il porte un numéro de repère.

La mémoire à caractères présente un progrès certain en ce sens que 6 bits suffisent pour enregistrer une information qui demanderait 12 bits si la carte perforée écrite en code Hollerith était enregistrée telle quelle dans la mémoire. En fait, on enregistre les données numériques suivant le système *décimal codé binaire* (DCB) sur 6 bits. Mais la place perdue n'est pas négligeable puisqu'il suffit de 4 bits pour enregistrer un chiffre.

L'utilisation du *binaire pur* économise davantage de place que le DCB. En effet, le nombre 7 214 exige $4 \times 6 = 24$ bits dans une mémoire à caractères (sans parler des bits de contrôle). En binaire pur, 7 214 s'écrit avec 13 bits seulement :

$$7214_{(10)} = 1\ 110\ 000\ 101\ 110.$$

Le mot peut avoir deux sens selon qu'il s'agit :

- d'un mot d'information qu'on désire manipuler globalement au cours d'un traitement, on parle de *mot d'information* ;
- d'un mot de mémoire formé de l'assemblage de plusieurs positions, on l'appelle *mot technologique*.

Le problème est alors pour le constructeur de définir la taille optimale du mot technologique afin de l'adapter le mieux possible à la taille du mot d'information : si le mot technologique est trop long il y a perte de place quand les informations sont courtes. Inversement, si le mot technologique est trop court, il peut en résulter de dangereuses chutes de précision dans les calculs.

Les constructeurs définissent des mots technologiques de tailles différentes :

16 bits pour IBM 1130,
24 bits pour GE 400,
24 bits pour ICL 1900,
32 bits pour IBM 360.

Nous examinerons rapidement les mots GE 400, les mots ICL 1900 et les octets IBM (il s'agira toujours de *mot technologique*).

1. Le mot de la série GE 400.

Le mot de la série GE 400 représenté à la figure IV. 11 est un mot à 24 bits numérotés de 0 à 23 vers la gauche. Le mot forme un ensemble de 4 caractères alphanumériques de 6 bits. Chaque caractère comprend 2 bits *hors-texte* et 4 bits *numériques*.

Dans les opérations arithmétiques décimales, les bits hors-texte de tous les caractères de chaque mot sont ignorés, sauf ceux du caractère 3 qui indiquent le *signe* (positif ou négatif) du mot. Un signe moins est représenté par