

Chapitre 5

Réalisation des registres et des mémoires

Nous avons vu l'intérêt des *registres*, ou plus exactement des registres de travail, c'est-à-dire des organes capables de stocker un nombre et de le restituer lorsque le besoin s'en fait sentir, sans en détruire la valeur dans le registre (afin de pouvoir l'appeler à nouveau si nécessaire).

Les registres d'entrée et de sortie peuvent être réalisés de façon simple : grâce à des interrupteurs pour les registres d'entrée, constitués d'ampoules pour les registres de sortie. Aucune de ces deux technologies ne convient cependant pour les registres de travail : il n'est pas pratique de faire changer la position d'un interrupteur à l'aide d'un courant électrique (bien que cela soit possible grâce à un relais).

La technologie pour les registres de travail a connu une longue évolution pour se stabiliser avec les registres reposant sur des *bascules*, implémentés de nos jours sur des circuits intégrés. Nous ne décrirons le principe que de ces derniers

5.1 Réalisation des registres

5.1.1 Bistable R.S.

Principe.- Considérons le circuit de la figure 5.1 à deux entrées R et S et deux sorties P et Q :

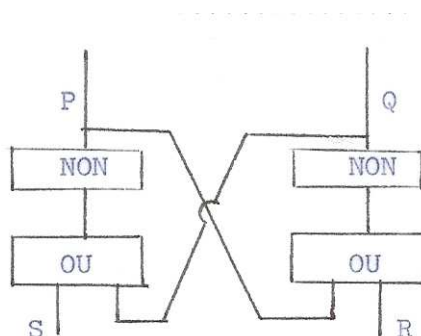


FIGURE 5.1 – Principe du bistable R.S.

- À l'état de **repos**, c'est-à-dire pour $S = R = 0$, qui sera pour nous l'état le plus fréquent, le circuit est dans l'un des deux états : $P = 0, Q = 1$ ou $P = 1, Q = 0$, d'où le nom de **bistable** (*flip-flop* en anglais) donné à un tel circuit, puisqu'il y a deux états stables.
- Lorsqu'on envoie une impulsion, c'est-à-dire un 1, sur l'entrée S alors, quel que soit l'état initial du circuit et après une certaine période transitoire, le circuit se place dans l'état $P = 0$ et $Q = 1$, qui reste stable, même après disparition de l'impulsion S.
- De même, lorsqu'on envoie une impulsion sur l'entrée R, le circuit se place dans l'état $P = 1$ et $Q = 0$, qui est également stable.
- Si les deux entrées R et S sont simultanément à 1, on obtient $P = Q = 0$ mais lorsque les entrées repassent à zéro, le bistable reprend, après une période transitoire, l'une des deux positions d'équilibre et nous ne pouvons pas prévoir laquelle : on parle d'**état métastable**. On s'interdira d'envoyer des impulsions sur S et R simultanément.

Ce circuit se comporte donc comme un élément de mémoire capable de conserver une information binaire fournie sous forme d'impulsion. On l'appelle **bistable R.S.**.

Notation.- La figure 5.2 indique le schéma utilisé pour représenter un bistable R.S. L'état du bistable est par convention l'état de sortie Q . La sortie complémentaire \bar{P} de la sortie Q lorsque le bistable est au repos est généralement notée \bar{Q} . L'entrée S est appelée *mise à un* (*set* en anglais, d'où son nom). L'entrée R est appelée *mise à zéro* (*reset* en anglais, d'où son nom).

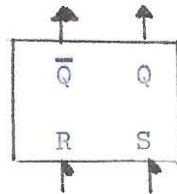


FIGURE 5.2 – Notation du bistable R.S.

Les flèches avec une demi-pointe rappellent que les entrées sont impulsionnelles, les flèches avec une pointe que les sorties sont des niveaux logiques.

5.1.2 Registres à bistables

Principe.- Un bistable R.S. permet de mettre en mémoire un chiffre binaire. Un ensemble formé de n bistables, comme montré à la figure 5.3, permet donc de constituer un registre pouvant contenir des entiers naturels compris entre 0 et $2^n - 1$.



FIGURE 5.3 – Principe d'un registre à bistables

Mise à zéro d'un registre.- Nous avons vu qu'il faut pouvoir mettre à zéro les registres. Cette opération est facile en envoyant une impulsion sur les entrées R de chaque bistable, comme montré à la figure 5.4.



FIGURE 5.4 – Mise à zéro d'un registre

Mise à un d'un registre.- Nous avons vu également qu'il faut pouvoir mettre à un les registres. Cette opération est facile en envoyant une impulsion sur les entrées correspondantes de chaque bistable : 0 pour les entrées qui ne représentent pas le bit de poids le plus faible et 1 pour ce dernier.

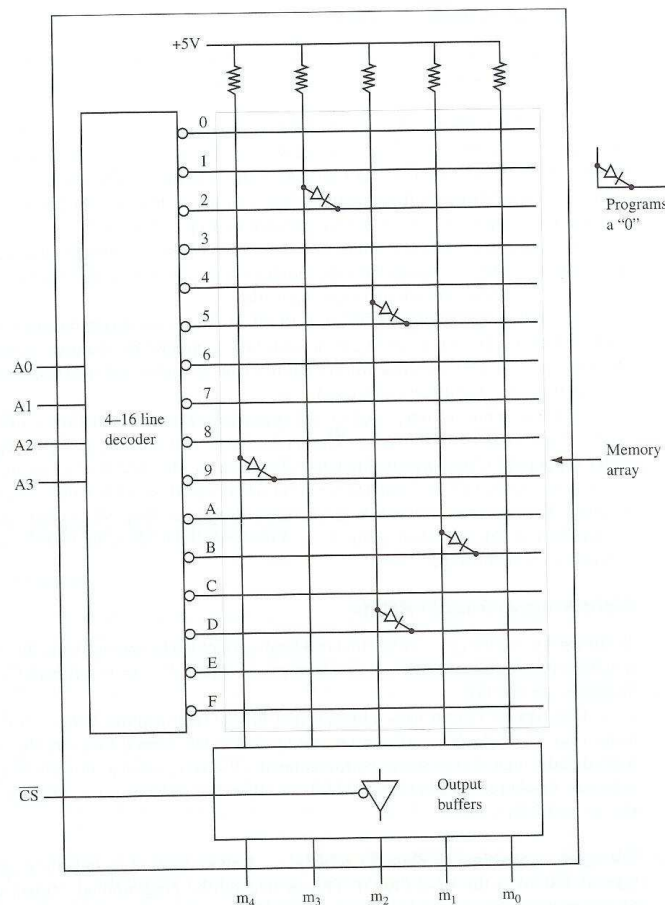
Récupération de la valeur d'un registre.-

5.2 Des registres à la mémoire vive

DÉFINITION.- On appelle **mémoire (informatique)** tout dispositif permettant de stocker des informations numériques.

Technologie d'un type de mémoire.- Les éléments de mémoire ont été historiquement constitués de façon diverse, depuis l'origine mécanique, électro-mécanique... Nous ne considérerons ici que les types de **mémoire électronique** (c'est-à-dire constituée de circuits électroniques) utilisés dans la réalisation de la mémoire centrale des micro-ordinateurs actuels.

Schéma d'un circuit intégré de mémoire.- On peut voir un circuit intégré de mémoire ROM (*Read Only Memory*) comme un élément ayant n broches d'entrée et m broches de sortie. Pour chacune des 2^n combinaisons possibles d'entrée il y a un mot de sortie de m bits.



A diode ROM illustrating the n -input address decoder, $2^n \times m$ memory array, and m output buffers. (From J. Ufflenbeck, *Microcomputers and Microprocessors: The 8080, 8085, and Z-80*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1991.)

FIGURE 5.5 – Schéma d'un élément de mémoire ROM

Comme montré à la figure 5.5, un circuit intégré de mémoire est constitué d'un **décodeur d'adresse**, d'une **matrice** de mémoire programmable et d'un ensemble de **tampons** de sortie. Sur la figure on a $n = 4$ et $m = 5$. Lorsqu'une adresse de 4 bits est appliquée, une des 16 lignes aura un niveau bas. Une diode connectée entre une ligne et une colonne donnera un bit de sortie de niveau bas. L'absence de ligne donnera un niveau haut.

Un circuit intégré de mémoire n'est rien d'autre qu'une table de vérité, donnant un mot en sortie (et non un seul bit). Une ROM peut d'ailleurs remplacer un réseau de circuits combinatoires.

Barettes de mémoire.- Pour minimiser la place occupée par toutes les puces de mémoire sur la carte mère, un certain nombre de puces sont soudées sur un circuit imprimé, appelé **barette de mémoire**.

5.3 Historique

La notion de registre de travail est essentielle pour les calculateurs, que ce soit des ordinateurs ou non, et la réalisation effective date de la *machine analytique* de Babbage. Cependant les technologies utilisées ont beaucoup varié et ce n'est qu'au début des années 1950 que la technologie s'est stabilisée avec les mémoires à tore puis en 1968 avec les mémoires à semi-conducteur, cette dernière étant la technologie encore utilisée de nos jours. Toutes ces technologies, à part la dernière, n'ont plus qu'un intérêt historique. Passons-les rapidement en revue, sans détailler leurs principes de fonctionnement.

5.3.1 Premières réalisations des registres

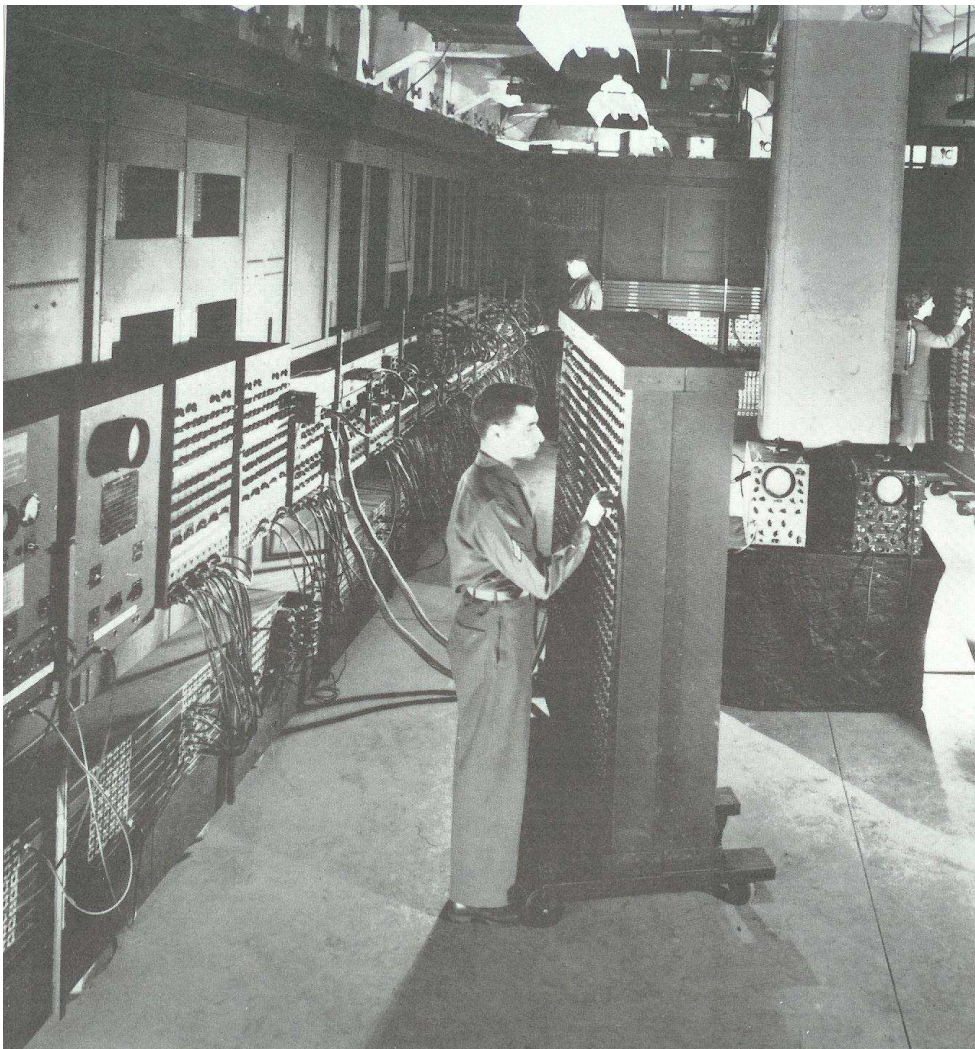


FIGURE 5.6 – Entrée d'un nombre bit par bit ([Aug-84], p. 126)

5.3.1.1 Registres d'entrée à interrupteurs

La célèbre photo 5.6 montre un technicien de la *Moore School* entrant un nombre sur l'ENIAC bit par bit grâce à une série d'interrupteurs.

5.3.1.2 Registres de sortie à ampoules

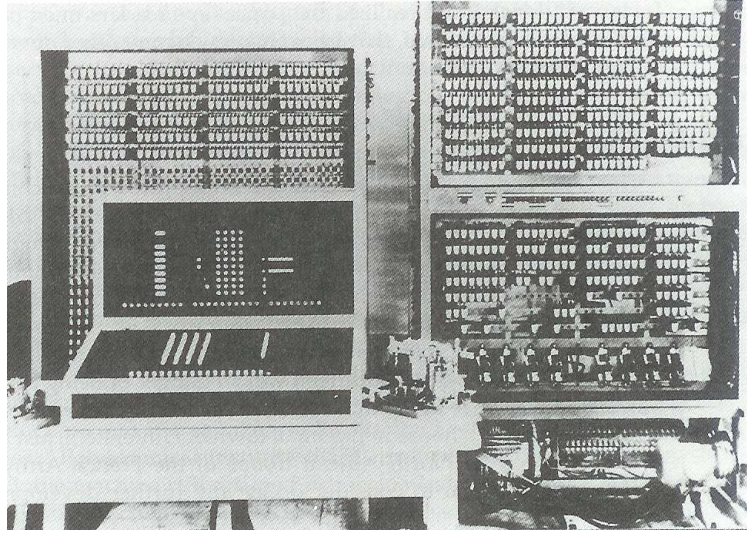


FIGURE 5.7 – Réplique de la machine Z3 de ZUSE ([Wil-85], p. 217)

La figure 5.7 montre une réplique de la machine Z3 de Konrad ZUSE, machine à relais construite de 1939 à 1941 et détruite lors d'un raid aérien en 1944. Le pupitre montre des registres de sortie à ampoules.



FIGURE 5.8 – Le micro-ordinateur Altair ([Aug-84], p. 274)

Puisque l'histoire se répète, l'ALTAIR de 1975, considéré comme le premier micro-ordinateur, montre sur la figure 5.8 ses organes d'entrée-sortie entièrement constitués d'interrupteurs et d'ampoules.

5.3.1.3 Les premiers registres électroniques de travail

Registres à condensateurs.- ATANASOFF utilise des condensateurs pour les registres de son premier calculateur électronique de 1939.

Registres à lignes de retard.- ECKERT, de la *Moore School*, propose d'utiliser pour l'EDVAC (*Electronic Discrete Variable Computer*, conçu en octobre 1944) des tubes à mercure à ligne de retard pour les registres : il s'agit d'un tube fin, rempli avec du mercure, qui stocke des impulsions électroniques, celles-ci venant et revenant périodiquement, entretenues par des composants placés aux extrémités du tube. Ces lignes de retard sont beaucoup plus lentes, plus grandes, plus onéreuses et plus difficiles à réaliser que les CRT dont nous allons parler mais plus fiables et peuvent contenir beaucoup plus d'information.

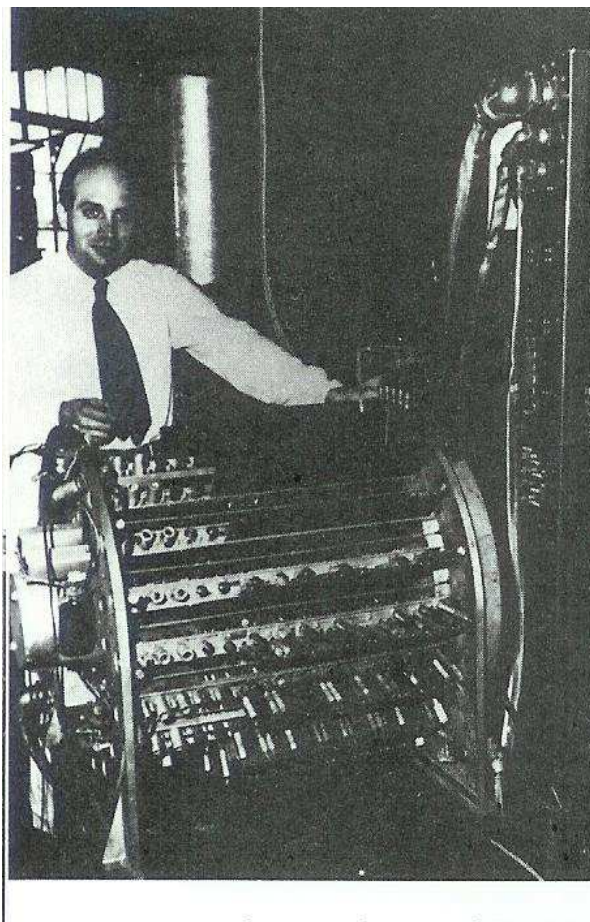


FIGURE 5.9 – Une unité de lignes à retard du BINAC ([Aug-84], p. 158)

La figure 5.9 montre ECKERT avec l'une des deux unités de lignes à retard, chaque ligne pouvant contenir 512 mots de 31 bits, du BINAC (pour *BINARY Automatic Computer*), petit calculateur construit entre octobre 1947 et août 1949 par ECKERT et MAUCHLY pour la *Northrop Aircraft Company*.

Registres à tubes cathodiques.- Dans le projet Manchester Mark I construit à Manchester en Angleterre sous la direction de Max NEWMAN en juin 1948, l'ingénieur en chef du projet, F. C. WILLIAMS, a l'idée d'employer les tubes cathodiques (CRT pour *Cathode Ray Tube*) employés pour les radars (et plus tard pour la télévision), ce qui évite de construire des organes spécifiques au projet. Ils peuvent retenir 1 024 ou même 2 048 bits mais malheureusement perdent un bit ou deux de temps en temps.

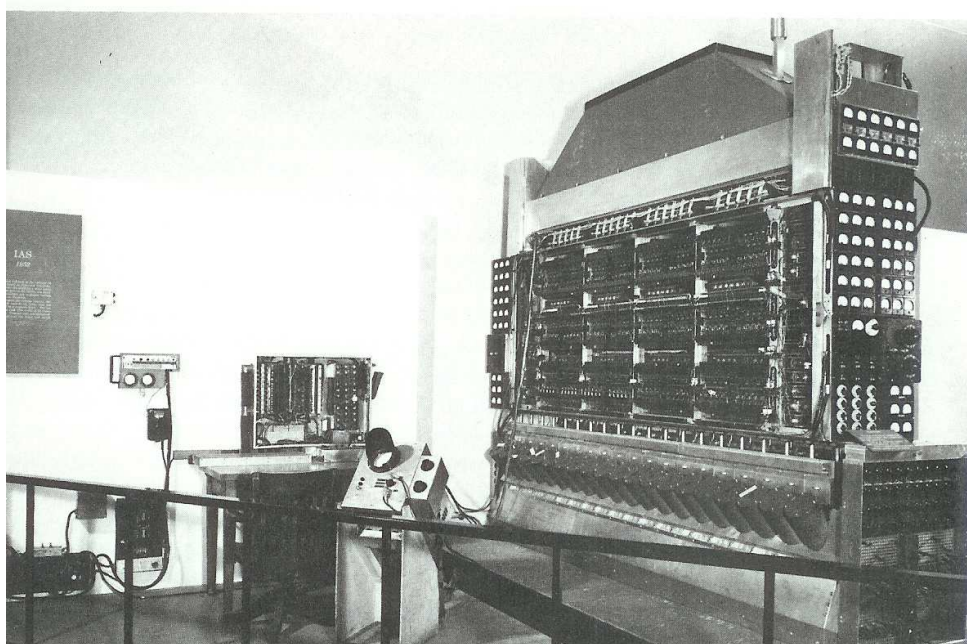


FIGURE 5.10 – Le calculateur IAS à la Smithsonian Institution à Washington ([Aug-84], p. 155)

La figure 5.10 montre le calculateur de l'*Institute for Advanced Study*, construit sous la direction de VON NEUMANN par RCA en s'inspirant de l'EDVAC, placé au musée de la Smithsonian Institution de Washington lors de son retrait en 1960. Les vingt cylindres à la base du calculateur sont des unités de stockage CRT capable de détenir chacun 1 024 bits. Il y a vingt tubes de chaque côté de la machine.

Mémoires à tores de ferrite.- Les CRT et les lignes à retard sont remplacés par les tores magnétiques au début des années 1950.

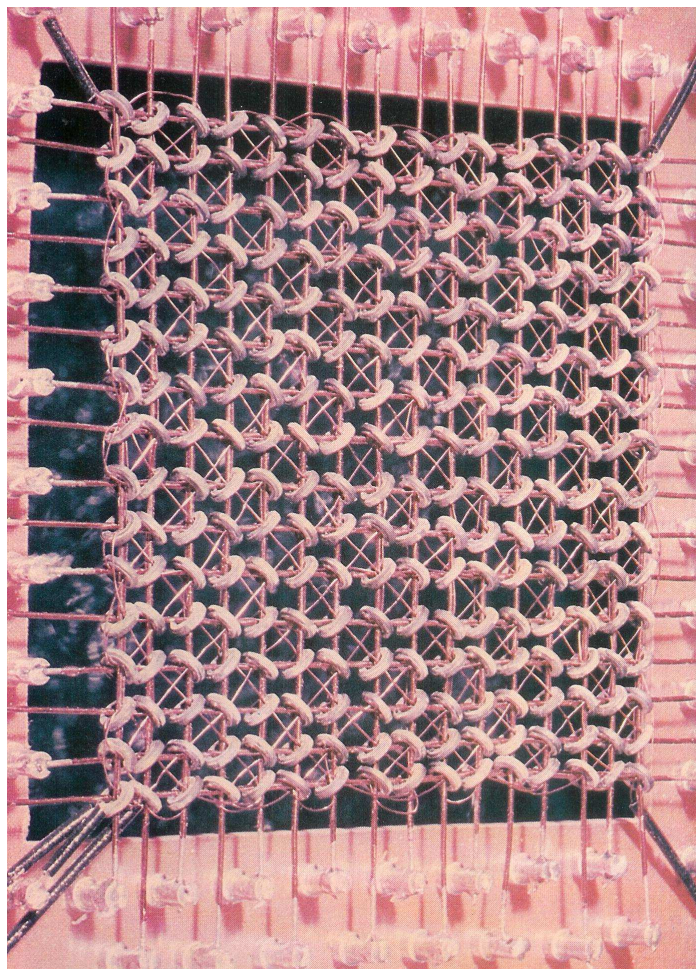


FIGURE 5.11 – Mémoire à tores de ferrite ([Aug-84], p. 194)

En décembre 1944 la marine américaine demande au MIT de concevoir un système d'entraînement pour les pilotes d'avion. Le laboratoire de servo-mécanisme du MIT confie ce projet à Jay W. FORRESTER, alors jeune ingénieur. Ce système comporte un cockpit et un contrôleur. FORRESTER pense d'abord à un calculateur analogique pour le contrôleur mais en 1947 il passe à un ordinateur électronique numérique, qui sera connu sous le nom de projet *Whirlwind*.

La mémoire interne consiste d'abord en 32 CRT, stockant un total de 2 048 mots de 16 bits mais leur durée de vie ne dépasse pas un mois. Au printemps 1949, FORRESTER remarque une publicité dans la revue *Electrical Engineering* pour un matériau métallique magnétique appelé *Deltamax*. Il en commande, en découpe de petits rubans qu'il tord pour obtenir de petits anneaux, fait passer un courant électrique pour les magnétiser dans un sens (nord, qui peut représenter un état binaire) puis dans l'autre (sud, qui représente l'autre état binaire). Ceci fonctionne mais le passage d'un état à l'autre est trop lent et trop sensible aux pressions physiques, ne serait-ce que de le toucher, pour en faire un élément de stockage pratique.

FORRESTER demande l'aide des autres ingénieurs pour trouver un autre matériau que le *Deltamax*. Il s'arrête sur les ferrites céramiques. Une petite machine de test pour *Whirlwind* est construite durant l'été 1953 en utilisant ce nouveau type de mémoire qui fonctionne bien. On peut voir sur la figure 5.11 à quoi ressemble un tel élément de mémoire (de 256 bits).

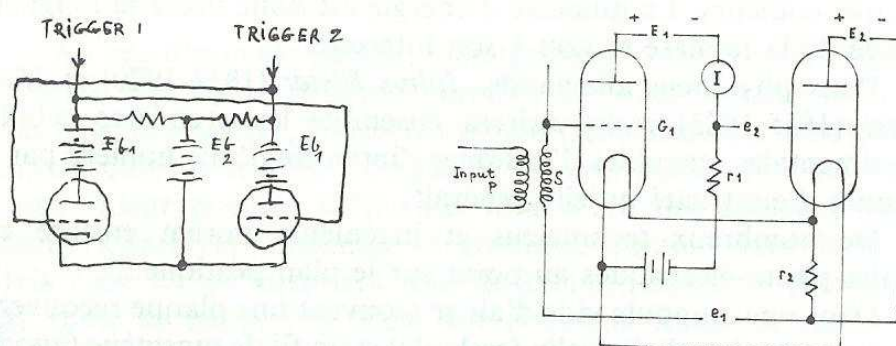
L'IBM 705 est le premier ordinateur commercial à utiliser des mémoires à tores de ferrite, en 1955. Ce type de mémoire est adopté pour tous les ordinateurs suivants jusqu'à l'apparition des mémoires à semi-conducteurs au début des années 1970.

5.3.2 Les registres à bascule

5.3.2.1 Le premier bistable

Les premiers registres de travail n'apparaissent pas à propos des calculateurs proprement dits mais des *compteurs électroniques* d'impulsions.

L'idée sur laquelle reposent les registres de travail électroniques date de 1919. En effet à cette date, W. H. ECCLES et F. W. JORDAN [EJ-19] décrivent la première bascule (*trigger* en anglais, *flip-flop* en américain), réalisée avec des lampes électroniques (figure 5.12) : ce petit texte de quatre pages décrit un dispositif bistable à deux triodes. Le but est alors de réaliser un compteur électronique rapide de rayons corpusculaires.



Le « basculeur » de W.H. Eccles et F.W. Jordan. À gauche, le croquis original du premier dispositif bistable à deux triodes (Breveté en 1918 par l'Amirauté britannique). À droite, le schéma qui illustrait l'article publié par les deux inventeurs dans la « Radio Review » d'octobre 1919.

FIGURE 5.12 – La première bascule ([Lig-87], p. 268)

La bascule d'Eccles-Jordan connaît un grand succès de curiosité durant la décennie 1920, dans le milieu des initiés. H. J. REICH, professeur à l'université de l'Illinois, qui publie des articles très suivis dans les revues américaines de radio et d'électricité, évoque à plusieurs reprises ce circuit électronique. En dépit de cette curiosité générale, aucune application pratique n'est alors imaginée pour cette bascule.

5.3.2.2 Dénombrement des corpuscules

De nombreux rayons de toutes sortes sont découverts à la fin du XIX^e siècle en physique : rayons X avec ROENTGEN, radio-activité avec BECQUEREL, rapidement raffinée en rayons α , β et γ , rayons cathodiques, rayons cosmiques et d'autres. Certains de ces rayons, comme les rayons X et les rayons γ sont de nature électromagnétiques (l'analogie de la lumière visible avec des longueurs d'onde différentes), d'autres des rayonnements corpusculaires, comme les rayons cathodiques et les rayons α . Pour ces derniers, on a besoin de dénombrer les corpuscules émis. Une première méthode consiste à compter le nombre d'impacts sur une surface fluorescente (l'analogie des tubes de télévision ou des CRT) à l'aide d'une loupe à fort grossissement. Outre la fatigue visuelle liée à ces observations, cette méthode ne s'applique pas dans le cas d'un bombardement trop intense.

L'anglais C.E. WYNN-WILLIAMS publie en 1931 et en 1932 [WW-31, WW-32] une description de compteurs électroniques à grande vitesse nécessités par les recherches en physique nucléaire, ayant la faculté de compter des impulsions séparées d'à peine $1/250^{\text{ème}}$ de seconde, dont le premier exemplaire est construit pour le *Cavendish Laboratory*.

En 1935, WYNN-WILLIAMS achève un autre compteur, associé à un ensemble de relais électromécaniques et de sélecteurs, de façon à disposer d'un convertisseur binaire-décimal capable d'imprimer automatiquement le résultat du dénombrement. En 1937 il publie un article [WW-37] d'une vingtaine de pages faisant le point des différents projets et des diverses réalisations de circuits électroniques de dénombrement ; il présente également des solutions pour le passage du binaire en décimal et vice-versa.

5.3.2.3 Première utilisation des bistables pour les calculateurs

Pour réaliser les registres de l'ENIAC (*panels* dans le vocabulaire de l'ENIAC), ECKERT étudie, sur une suggestion de MAUCHLY, les circuits utilisés pour comptabiliser les rayons cosmiques mais il les trouve trop lents. Il conçoit donc un système fondé sur les bistables de ECCLES et JORDAN. Il installe vingt tubes électroniques, deux pour chacun des dix chiffres binaires.

En juin 1944, à peu près un an après le commencement du projet ENIAC, les deux premiers *accumulateurs* sont prêts. Chacun a une hauteur de 2,5 m, une largeur de 60 cm et une profondeur de 1 m et contient dix des registres de ECKERT. Chacun permet d'additionner, de soustraire ou de stocker un nombre décimal à dix chiffres. Ils opèrent à la vitesse de 200 000 impulsions par seconde.

Mais, comme nous l'avons vu, ces mémoires à lampe électronique ne connaissent pas vraiment de succès devant celles à tores de ferrite. Il faut attendre leur miniaturisation pour vraiment émerger.

5.3.2.4 L'arrivée des circuits intégrés

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment KILBY invente le circuit intégré et comment HOERNI et NOYCE l'améliorent pour obtenir des circuits intégrés planaires. *Fairchild* commence la production industrielle en mars 1961, dont le seul acheteur est la NASA. Le premier circuit intégré produit est le bistable de la figure 5.13.

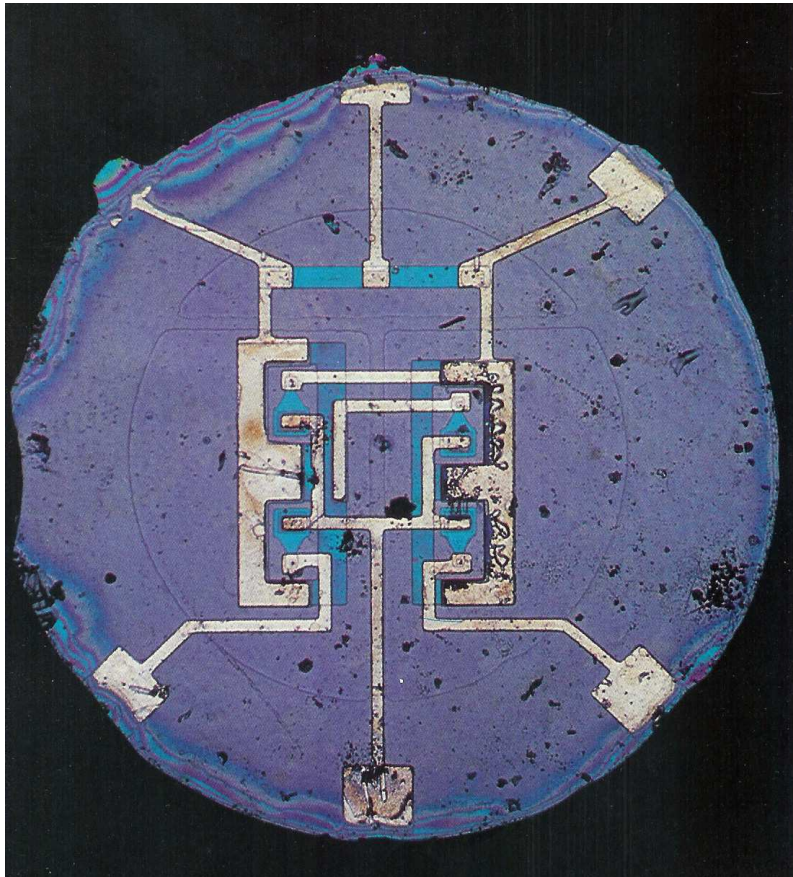


FIGURE 5.13 – Le premier bistable sur circuit intégré ([Aug-83], p. 11)

5.3.2.5 Les mémoires RAM statiques

La première barette de mémoire RAM (*Random Access Memory*) statique, de 256 bits, fabriquée par *Fairchild* en 1970, est montrée à la figure 5.14.

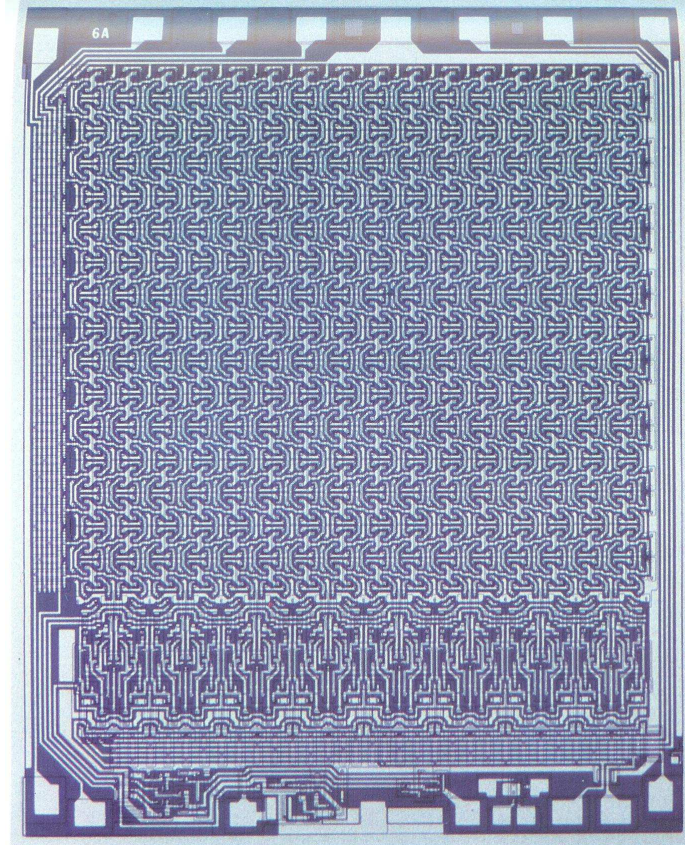


FIGURE 5.14 – La première RAM : le 4100 de *Fairchild* ([Aug-83], p. 25)

5.3.2.6 Les mémoires RAM dynamiques

En 1968 les physiciens Robert NOYCE, Gordon MOORE et Andrew GROVE quittent *Fairchild* pour établir leur propre entreprise de semi-conducteurs à Santa Clara en Californie : *Intel* pour *INTEGRATED ELECTRONICS*. *Intel* commence par concurrencer *Fairchild* en produisant des RAM statiques de 64 bits (le 3101), puis de 256 bits (le 1101). En 1970 elle commence à dépasser ses deux concurrents, *Fairchild* et *Texas Instruments*, en produisant la première barette RAM dynamique, de 1 024 bits (figure 5.15), conçue par Joel KARP et Bill REGITZ : les **RAM dynamiques** exigent un rafraîchissement permanent pour conserver les charges en mémoire alors que les **RAM statiques** sont plus onéreuses mais plus faciles à utiliser.

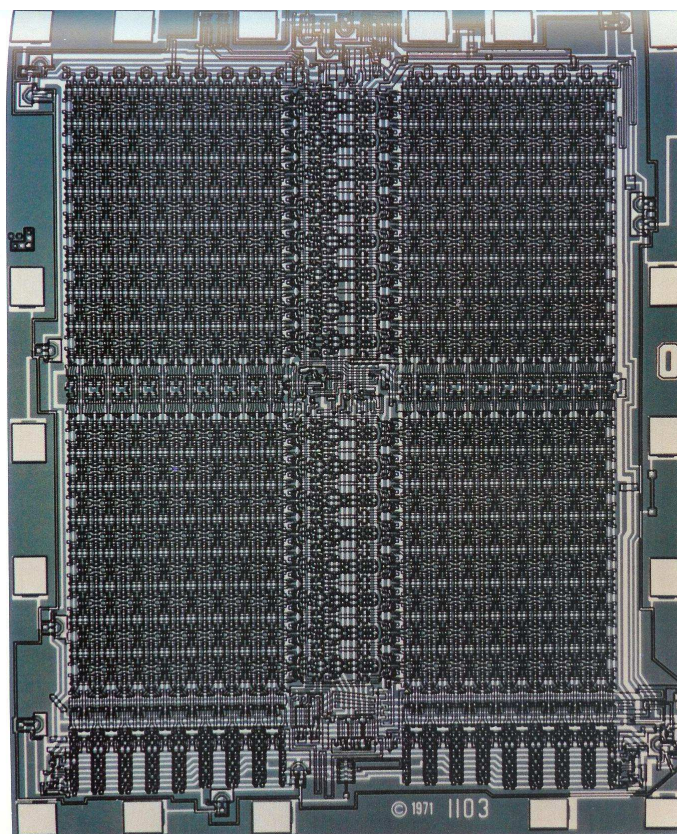


FIGURE 5.15 – La première RAM dynamique, de 1024 bits : le 1103 de *Intel* ([Aug-83], p. 27)

Cette dernière capacité permet de remplacer les mémoires à tores de ferrite.

5.4 Bibliographie

- [Aug-83] AUGARTEN, Stan, **State of the Art : A Photographic History of the Integrated Circuit**, Ticknor & Fields, New-York, 1983, XV + 79 p., ISBN 0-89919-195-9.
- [Aug-84] AUGARTEN, Stan, **Bit by bit : an illustrated history of computers**, Ticknor & Fields, New-York, 1984, IX + 324 p., ISBN 0-89919-268-8.
- [EJ-19] ECCLES, W. H. and JORDAN, F. W., *A trigger relay utilising three-electrode thermionic vacuum tubes*, **Radio Review**, vol. 1, décembre 1919, pp. 143–146. Reproduit dans [Swa-76], pp. 298–300.
- [Lig-87] LIGONNIÈRE, Robert, **Préhistoire et histoire des ordinateurs**, Robert Laffont, 1987, 356 p.
- [Swa-76] SWARTZLANDER, Earl E., Jr, **Computer Design Development : Principal Papers**, Hayden, 1976, 310 p., ISBN 0-8104-5988-4.
- [WW-31] WYNN-WILLIAMS, C.E., *The Use of Thyatron for High Speed Automatic Counting of Physical Phenomena*, **Proceedings of the Royal Society of London**, series A, vol. 132, pp. 295–310, 1931.
- [WW-32] WYNN-WILLIAMS, C.E., *A Thyatron “Scale of Two” Automatic Counter*, **Proceedings of the Royal Society of London**, series A, vol. 136, pp. 312–324, 1932.
- [WW-37] WYNN-WILLIAMS, C.E., *Electrical Methods of Counting*, **Reports on Progress in Physics**, vol. 3, pp. 239–261, 1937.