

Evolution de l'électronique moderne

Autor(en): **Hemmer, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles =
Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg**

Band (Jahr): **63 (1974)**

Heft 1

PDF erstellt am: **18.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-308504>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Evolution de l'électronique moderne

par F. HEMMER,

Technicum cantonal, Fribourg

Parmi les différentes techniques actuelles, l'électronique est certainement l'une de celles dont les progrès ont été les plus rapides et les plus spectaculaires. Le grand public lui-même a pu suivre cette évolution au fur et à mesure que se répandaient sur le marché les applications les plus populaires de l'électronique telles que les radio-transistors, la télévision noir-blanc, la télévision couleur, les machines à calculer de toutes catégories, etc. Cet étonnant progrès est avant tout d'ordre technologique et, pour s'en rendre compte, il suffit de constater qu'en 1948 on mettait un transistor sur un mm² tandis qu'en 1974 le même mm² en contient 10 000. Il est impossible de décrire en quelques pages l'évolution d'un domaine aussi vaste que celui de l'électronique. C'est pourquoi le sujet est limité à l'évolution des composants électroniques à semi-conducteurs, de 1948 à 1974, c'est-à-dire de la naissance du transistor jusqu'à celle du microprocesseur. Cet article passe en revue, en respectant l'ordre chronologique, les éléments de base dont dispose l'électronicien moderne et laisse de côté le champ immense des applications et des systèmes réalisés à l'aide de ces composants.

L'invention du transistor

Le 1^{er} juillet 1948, les lecteurs du «New York Times» pouvaient lire dans la rubrique «The News of Radio» à la suite des quelques annonces de changements de programme le paragraphe suivant: «A device called a transistor, which has several applications in radio where a vacuum tube ordinarily is employed, was demonstrated for the first time yesterday at Bell Telephone Laboratories... where it was invented». Ces quelques lignes apparemment très anodines et noyées dans le flot de l'information quotidienne annonçaient effectivement l'invention la plus prodigieuse de l'après-guerre dans le domaine de l'électronique. Elles apprenaient aux lecteurs qu'un élément appelé transistor et ayant de multiples applications en radio a été montré pour la première fois dans les laboratoires de la «Bell Telephone» où il fut inventé. Effectivement le premier circuit utilisant un transistor a fonctionné pour la première fois quelque six mois auparavant exactement le 23 décembre 1947, et l'un des inventeurs, W. Brattain, a pu consigner dans son carnet de laboratoire: Ce circuit fonctionne actuellement et une amplification certaine peut être constatée soit par l'écoute du niveau sonore soit par l'observation des signaux électriques sur l'oscilloscope sans modification détectable de la qualité de ces signaux.

Cette invention est le résultat de deux ans et demi de recherches des trois physiciens J. Bardeen, W. Shockley et W. Brattain qui reçurent le prix Nobel en 1956, mais elle est aussi le fruit de toute une organisation scientifique et technologique qui s'est développée au cours des deux décades précédant 1945, année au cours de laquelle la «Bell Telephone» entreprit des recherches fondamentales en physique des corps solides et en particulier sur les semi-conducteurs.

Puisque tout le développement de l'électronique de ces dernières années a comme point de départ l'invention du transistor, il est nécessaire de dire brièvement ce qu'est le transistor et quelle est sa fonction. Son nom vient de la contraction des deux mots «Transfert Resistor» ce qui signifie résistance de transfert. Comme le tube de radio, le transistor est un élément amplificateur. A la différence du tube électronique qui est un assemblage de plaques et de grilles séparées par du vide et enfermées dans un tube de verre, le transistor est un corps solide et compact formé d'une matière semi-conductrice, le silicium ou le germanium. Extérieurement, il se présente sous la forme d'une petite capsule métallique ou plastique, d'où sortent trois fils, appelés base, émetteur et collecteur. Si un petit courant est injecté dans le transistor par la base, ce petit courant provoque un appel de courant relativement grand par le collecteur: c'est l'effet «transistor». Bien entendu, le transistor ne produit pas de courant; il faut obligatoirement qu'une alimentation se trouve dans le circuit du collecteur, puisqu'avec le courant de la base on se borne à contrôler le courant du circuit du collecteur, c'est-à-dire à varier la résistance que représente le transistor, d'où son nom: résistance de transfert. De même, il ne suffit pas d'ouvrir un robinet pour avoir de l'eau, il faut encore que ce robinet soit relié par des conduites à un réservoir.

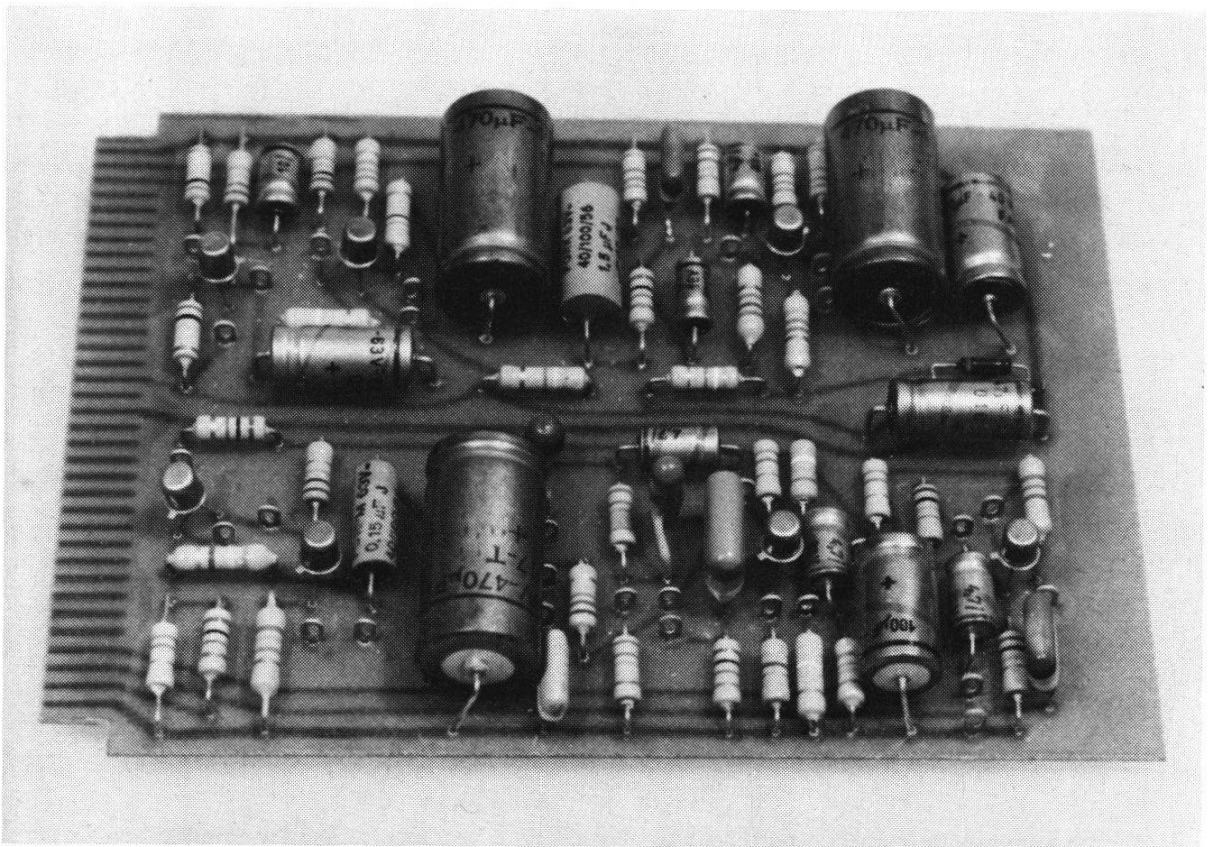


Fig. 1: Cet amplificateur est un exemple de circuit à éléments discrets puisque tous les composants sont montés les uns à côté des autres, le câblage étant assuré ici par un circuit imprimé; les transistors sont parmi les plus petits éléments du circuit.

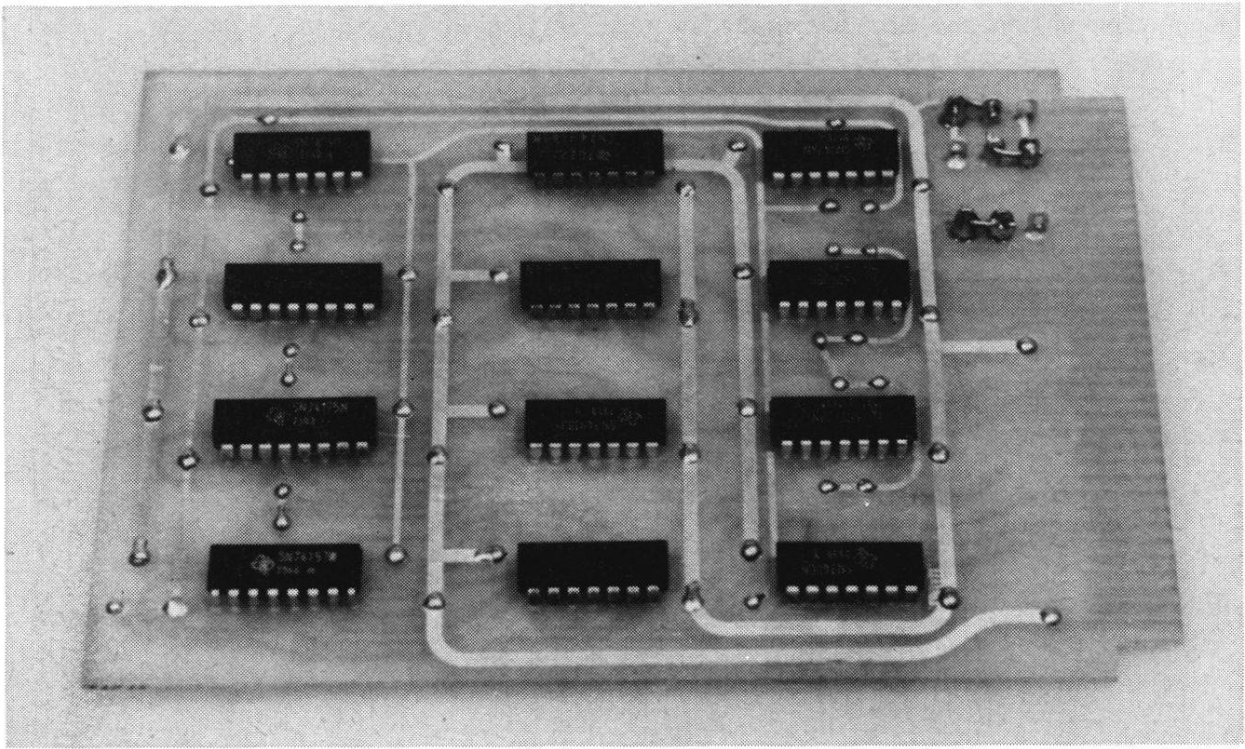


Fig. 2: Dans les montages à circuits intégrés, les transistors et autres composants ne sont plus visibles puisqu'ils sont intégrés sur une pastille de silicium noyée dans un boîtier plastique ou céramique.

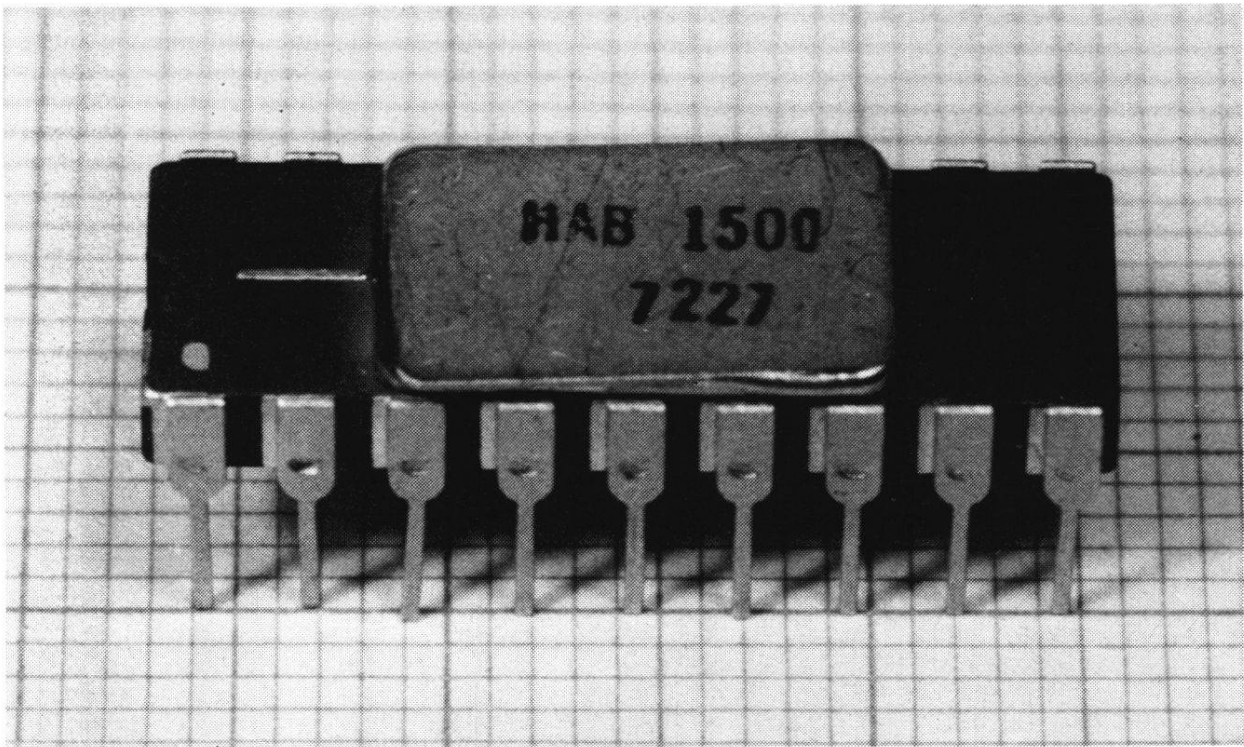


Fig. 3: Le circuit intégré représenté sur cette figure est une mémoire vive (mémoire RAM) de 1024 bits constituée de plus de 4000 transistors répartis dans un carré de moins de 2 mm de côté. Extérieurement, tous les circuits intégrés se présentent comme celui-ci, seul le nombre de «pattes» peut varier suivant les besoins.

Développement des semi-conducteurs

Aussitôt après la naissance du premier transistor, les recherches s'intensifient dans le domaine de la technologie des semi-conducteurs et les résultats ne se font pas attendre. Les transistors à points de contact ont très vite été remplacés par les transistors à jonction dont la fabrication est beaucoup plus économique (1950–1951) et en 1954 est apparu le transistor commercial du type transistor à jonction au silicium. Il s'agit là des dates de la mise au point des procédés de fabrication; il faut attendre que les industries s'équipent et que la production de masse s'organise pour trouver ces transistors dans le commerce.

Le développement des applications pratiques suit évidemment le progrès technologique. On a constaté que le transistor est un élément facile à utiliser surtout parce qu'il est petit et qu'il se contente d'une faible tension d'alimentation (pile de lampe de poche). C'est ainsi que le transistor remplace les tubes dans les appareils radio qui sont dès lors devenus beaucoup plus petits. C'est le début d'un phénomène qui ira en s'accroissant toujours davantage de façon spectaculaire: celui de la miniaturisation introduite par l'électronique nouvelle.

Pendant les années qui suivirent la commercialisation du transistor (1954–1964), on ne s'est pas contenté de remplacer les tubes par des transistors dans les appareils existant déjà. Le transistor, en effet, ouvrait la voie à de nouvelles applications utilisant un grand nombre de transistors et qui, de ce fait, étaient impensables auparavant. Il s'agit surtout des applications dans le domaine de l'électronique digitale qui comprend le développement des circuits logiques et des calculatrices numériques de toutes sortes. On assiste ainsi, à partir des années 60, à une orientation très nette de la recherche du côté des circuits digitaux utilisés en logique. Le résultat de ces recherches est extraordinaire puisque la miniaturisation des circuits électroniques atteint un degré inconnu jusqu'alors. Jusqu'à ce moment-là, les transistors et les autres composants utilisés dans un circuit étaient placés les uns à côté des autres sur un circuit imprimé qui assurait les liaisons des éléments entr'eux. De tels montages sont dits à *éléments discrets*. Mais dès que les techniques de fabrication des transistors ont été suffisamment maîtrisées, on s'est aperçu qu'il était possible de placer plusieurs transistors, et même un grand nombre, sur la même pastille de silicium. C'est ainsi qu'est née une nouvelle technique, la technique d'intégration et les circuits ainsi obtenus sont appelés *circuits intégrés*. Selon leur complexité, les circuits intégrés sont divisés en trois niveaux d'intégration :

- SSI Intégration à petite échelle (Small-Scale-Integration), ce qui correspond à l'équivalent de 1 à 12 portes
- MSI Intégration à moyenne échelle (Medium-Scale-Integration) ce qui correspond à l'équivalent de 13 à 99 portes
- LSI Intégration à grande échelle (Large-Scale-Integration) ce qui correspond à l'équivalent de 100 portes et plus.

La porte (gate) est le circuit de base en technique digitale et comporte environ 4 à 5 transistors.

Selon leur technologie, les circuits intégrés se divisent en deux familles :

– *Technologie bipolaire* . Cette famille technologique est issue du transistor à jonction bipolaire qui met en jeu des porteurs des deux polarités, soit des porteurs du type n et des porteurs du type p. Des différentes logiques intégrées, c'est la logique TTL qui est actuellement de loin la plus répandue. TTL vient de « Transistor-Transistor-Logic » et signifie que les transistors sont directement liés entr'eux sans l'intermédiaire de résistances (RTL de « Resistor-Transistor-Logic ») ou de diodes (DTL de « Diode-Transistor-Logic »).

– *Technologie MOS* (Abréviation de Metal-Oxide-Semiconductor). Cette famille de circuits intégrés est issue du transistor à effet de champ (FET de Field Effect Transistor) ou plus précisément du transistor à effet de champ à grille isolée (MOS-FET). Ces transistors sont unipolaires puisqu'ils n'ont des porteurs de charge que d'une seule polarité, p ou n.

Ces deux familles, actuellement également utilisées, se distinguent par les propriétés suivantes :

– *Vitesse* : la logique bipolaire est plus rapide que la logique MOS.

– *Consommation ou dissipation de puissance* : la consommation, et par conséquent la puissance dissipée, est nettement plus faible en logique MOS et surtout CMOS (de MOS complémentaires) qu'en logique bipolaire.

– *Degré d'intégration* : la logique MOS permet d'obtenir des densités d'intégration très élevées soit de l'ordre de plus de 10000 transistors par mm², ce qui est encore impossible avec la logique TTL.

Ces circuits ont commencé à être disponibles chez nous au cours des années 1967–1968–1969. D'abord très cher, leur prix a vite baissé ce qui a permis à l'industrie d'en faire un très large usage. C'est à partir de ce moment-là que la plupart des appareils se sont « digitalisés » : les voltmètres sont devenus des voltmètres digitaux, les multimètres sont devenus des multimètres numériques, bref en un mot les chiffres ont remplacé les aiguilles dans les cadrans. On trouve ces circuits jusque dans les montres-bracelets où ils divisent digitalement la fréquence d'un quartz et commandent l'affichage numérique.

Leur emploi n'a pas toujours été sans difficultés. Etant extrêmement rapides, ces circuits réagissent à la moindre impulsion indésirée, aussi courte soit-elle, et surtout fonctionnent de façon intempestive dans le voisinage de courants forts comme dans les commandes de machines-outils par exemple. Pour assurer un bon fonctionnement, il faut prendre certaines précautions puisque même le temps de propagation des impulsions dans des fils pourtant courts peut être à l'origine d'erreurs.

Les mémoires

L'usage des circuits intégrés a donné à l'électronicien l'habitude de manipuler des bits et le besoin de pouvoir stocker ces bits dans des mémoires rapides de capacité relativement grande s'est rapidement fait sentir. Le bit est la plus

petite unité d'information binaire; il indique, par 0 ou 1, l'état d'un élément binaire, un élément binaire étant un élément qui n'a que deux états possibles. On disposait déjà d'excellents moyens de mémorisation à long terme comme les cartes et les bandes perforées ou les bandes et les disques magnétiques mais le temps d'accès de ces mémoires est long comparé à la vitesse de travail des circuits intégrés. Dans certains cas, comme par exemple pour la mémorisation des résultats intermédiaires dans les calculatrices (Scratch Pad Memories), il devenait nécessaire de disposer de mémoires à court terme suffisamment rapides pour ne pas perdre les avantages de rapidité introduits par les circuits intégrés. Pour ce genre d'applications, ce sont des mémoires à anneaux de ferrite qui ont été utilisés pendant ces dernières années, mais elles présentent le désavantage d'occuper un volume plus grand et d'avoir un temps d'accès plus long que les mémoires à semi-conducteurs introduites dernièrement; de plus, les mémoires à tores ont une lecture destructive si bien qu'après chaque opération de lecture l'information doit être réécrite ce qui allonge d'autant le cycle mémoire.

Toutes ces raisons expliquent pourquoi on a cherché à développer des mémoires à semi-conducteurs ayant la même technologie que les circuits intégrés et des temps de travail comparables. Ces mémoires, que l'on trouve progressivement sur le marché depuis 1971, se divisent suivant le mode de mémorisation en trois catégories: mémoires à accès séquentiel, mémoires à accès aléatoire et mémoires à programme fixe. Ce classement est évidemment indépendant du type de technologie.

Mémoires à accès séquentiel ou registres à décalage

Ces mémoires sont constituées d'une chaîne de cellules connectées en série, chaque cellule faisant office de mémoire pour un mot de un bit. Plusieurs registres à décalage, parallèles peuvent être intégrés sur la même pastille, ce qui permet de mémoriser des mots de plusieurs bits, deux ou quatre par exemple. A chaque impulsion d'horloge, chaque mot de chaque cellule est transféré dans la cellule suivante, tandis qu'un nouveau mot est lu à l'entrée. Ainsi, dans le cas d'un registre à décalage organisé en 1024 mots de un bit, il faut donner 1024 impulsions d'horloge pour qu'un même bit passe de l'entrée à la sortie du circuit. De plus, les différents mots sont accessibles à la sortie du circuit dans le même ordre qu'ils y sont entrés, d'où le nom de mémoire à accès séquentiel. En plus des registres à décalage de quelques bits, les registres les plus utilisés ont 1024 bits et sont organisés en 1024 mots de un bit ou 512 mots de deux bits ou encore en 256 mots de quatre bits. Comme il faut quatre bits pour mémoriser les chiffres décimaux de 0 à 9, il est donc possible de mémoriser dans un seul circuit intégré 256 chiffres décimaux rangés les uns à côté des autres. Ce type de mémoire est utilisé lorsque les mots mémorisés sont toujours utilisés dans le même ordre, comme par exemple dans le cas de mémoires pour affichage.

Mémoires à accès aléatoire ou mémoire RAM

Lorsque les mots inscrits dans une mémoire doivent pouvoir être lus dans un ordre quelconque, c'est-à-dire dans un ordre qui diffère de l'ordre d'entrée, il faut utiliser une *mémoire vive* ou mémoire à accès aléatoire, plus connue sous le nom de mémoire RAM (abréviation de *Random Acces Memory*). Chaque mot de un bit est mémorisé dans une cellule dont le circuit rappelle celui du flip-flop, du moins dans le cas des mémoires vives statiques. Toutes ces cellules sont reliées par des connections horizontales et verticales en formant un réseau carré appelé matrice. Un mot est identifié par une adresse. Par exemple dix bits d'adresse sont nécessaires pour identifier un mot dans une mémoire de 1024 bits formant une matrice carré de 32 cellules de côté. De ces dix bits d'adresse, cinq servent à déterminer sur laquelle des 32 (2^5) lignes horizontales se trouve la cellule recherchée tandis que les cinq autres bits d'adresse permettent de dire sur laquelle des 32 colonnes se trouve cette cellule. L'opération qui consiste à activer une ligne parmi $2n$ à partir de n bits d'adresse s'appelle décodage d'adresse. Ainsi lorsque les bits d'adresse sont précisés, les circuits de décodage horizontaux et verticaux localisent une cellule déterminée de la mémoire et la relie au circuit d'écriture et de lecture. Dans le cas d'une opération d'écriture, l'information présente sur le circuit d'entrée est aiguillée vers la cellule déterminée par l'adresse. Au contraire, une opération de lecture consiste à transférer le bit d'une cellule vers le circuit de sortie. A noter que l'opération de lecture est non destructive et, qu'à la différence des registres à décalage, aucune impulsion d'horloge n'est nécessaire.

Ces mémoires sont utilisées pour conserver momentanément des résultats intermédiaires ou pour mémoriser des instructions (microprogrammation) dans les systèmes à microprocesseurs.

Mémoires à programme fixe ou mémoires ROM

Ces mémoires sont organisées comme les mémoires RAM dont elles ont la même configuration. La grande différence entre ces deux types de mémoires est que les mémoires à programme fixe n'ont pas de circuit d'écriture, ce qui simplifie beaucoup le circuit de la cellule. L'information est inscrite définitivement lors de la fabrication du circuit, d'où leur nom de mémoires à programme fixe ou de *mémoires mortes*, connues également sous le nom de mémoires ROM (abréviation de *Read Only Memories*). Leur emploi est simple: il suffit de donner une adresse pour recevoir le mot correspondant à la sortie après l'écoulement du temps d'accès (ordre de grandeur 100 nS). Du fait de la simplicité de la cellule (un transistor par bit), l'information mémorisée peut être importante. Les mémoires ROM actuellement disponibles vont jusqu'à 4096 bits (2^{12}) sur la même pastille.

Le domaine d'utilisation de ces mémoires s'étend à toutes les applications qui nécessitent un programme ou une information fixe, par exemple:

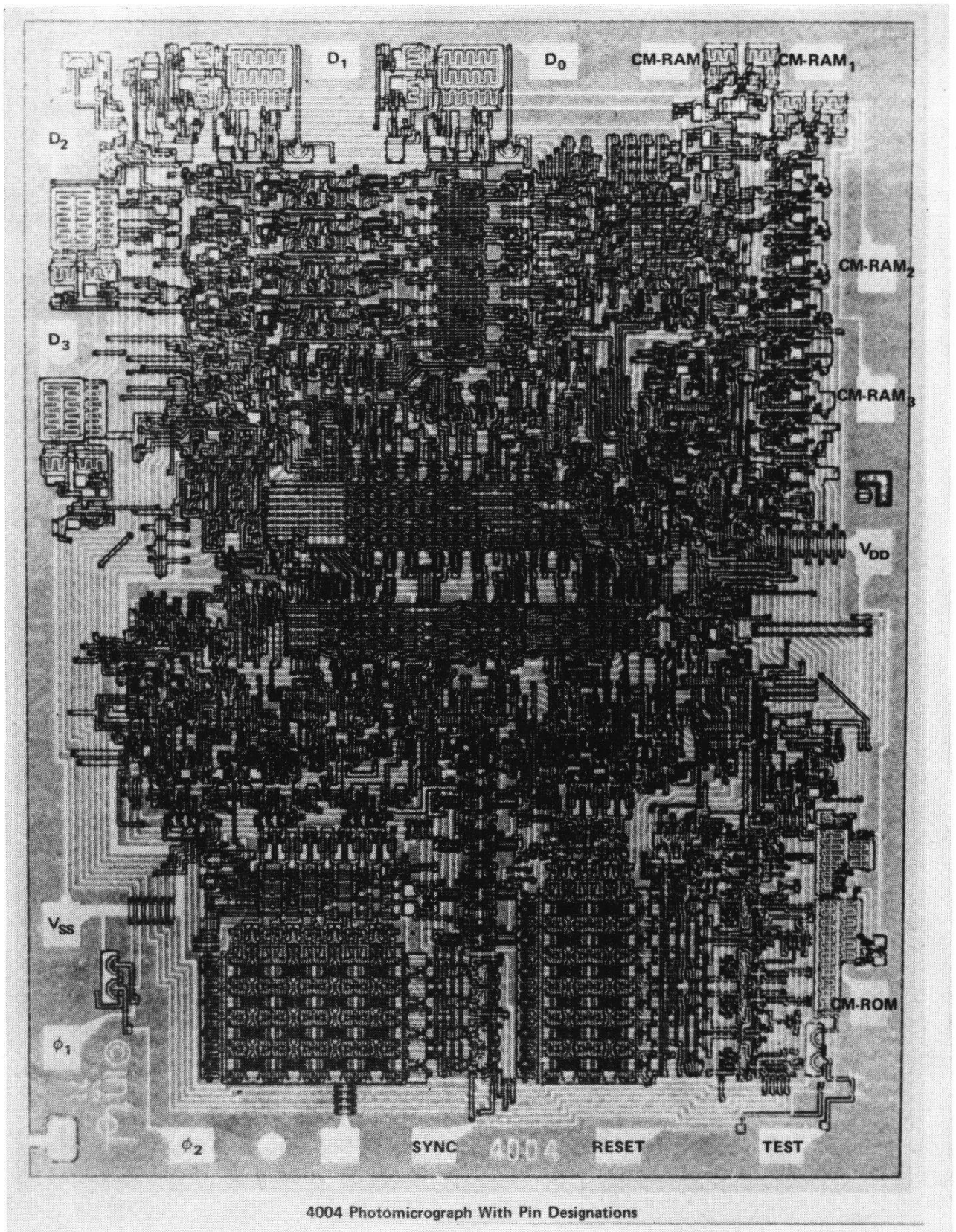


Fig. 4: Cette photographie, de l'intérieur d'un circuit intégré, ici un microprocesseur, montre bien que les transistors ne peuvent plus être isolés les uns des autres; la densité d'intégration de ce circuit est particulièrement grande.

- convertisseurs de code
- microprogramme
- générateur de caractères
- table numérique.

On peut acheter pour moins de 40 fr. une mémoire ROM de 4096 bits, organisée en 512 mots de 8 bits, contenant toute une table de sinus. L'angle droit est gradué en 512 parties définies par les 9 bits d'adresse ($2^9 = 512$). Pour chacune de ces 512 parties de l'angle droit, le circuit donne la valeur du sinus avec une précision de 8 bits (précision meilleure que 0,4 %).

Les derniers-nés de l'électronique: les microprocesseurs

Depuis deux ans environ de profondes modifications se font jour en électronique au niveau de la conception des circuits logiques. Ces modifications sont essentiellement dues à l'introduction sur le marché d'un nouveau type de circuits: les microprocesseurs. Ce sont des circuits intégrés qui ont la taille des circuits intégrés ordinaires mais qui jouissent du plus haut degré d'intégration actuel, ce qui signifie que ce sont, pour leur grandeur, les circuits les plus complexes et les plus perfectionnés que nous ayons. Qu'ont-ils de particulier? Pour répondre, il faut savoir que les systèmes électroniques peuvent se diviser en deux classes bien distinctes selon qu'ils sont programmables ou non programmables. La différence est très grande. Les systèmes logiques habituels ont toujours été jusqu'à aujourd'hui des systèmes non programmables. Leur programme est fixe et déterminé par le câblage des circuits. Ces systèmes ne peuvent faire que ce pour quoi ils sont faits. Ce sont des machines spécialisées à programme câblé et on parle dans ce cas de *logique câblée* (Hardware).

Par contre, les ordinateurs sont des systèmes programmables par excellence puisqu'ils ont été développés dans ce but. Avant de faire exécuter un travail à l'ordinateur, il faut lui donner le programme (Software) correspondant à ce travail. Une modification de programme ne donne lieu à aucune modification de câblage de la machine puisque le programme est en «software» et a comme support des cartes, une bande perforée ou une bande magnétique.

Les ordinateurs sont des machines puissantes et rapides mais sont évidemment très chers. Jusqu'à maintenant les machines programmables les moins chères étaient les mini-ordinateurs, mais ces derniers sont encore très chers surtout si le travail à exécuter est toujours relativement simple.

En résumé, avant les microprocesseurs, les systèmes logiques simples sont des systèmes non programmables dont le prix augmente rapidement en fonction de la complexité et les systèmes programmables sont toujours des systèmes relativement grands et par conséquent chers.

On peut maintenant essayer de donner une définition du microprocesseur. C'est un nouveau composant électronique que l'ingénieur a à sa disposition et qui, associé à des mémoires, devient un *système logique programmable*. Ce microprocesseur joue le rôle de l'unité centrale d'un computer et il est capable de recevoir des instructions et d'effectuer des opérations logiques et arithmétiques.

Les instructions du programme, ainsi que les données, sont contenues dans des mémoires RAM et ROM qu'il est nécessaire d'adjoindre au microprocesseur pour obtenir un système complet. Avec les microprocesseurs, il devient possible de réaliser des systèmes logiques programmables avec un nombre très restreint de circuits intégrés donc avec un minimum d'argent. Même pour des systèmes relativement simples, on dispose maintenant à peu de frais des avantages de l'ordinateur, le principal de ces avantages étant la flexibilité du système. Avec le même montage, ou le même «hardware», des tâches absolument différentes peuvent être remplies, il suffit de modifier le programme (software) du système, c'est-à-dire l'état de la mémoire. C'est pourquoi le microprocesseur va progressivement s'introduire, au cours des années prochaines, dans tous les systèmes logiques de petite et moyenne importance.