

Chapitre 9

Architecture des ordinateurs

On appelle **architecture d'un ordinateur** la façon dont les composants élémentaires sont reliés entre eux pour former l'ordinateur.

Au début de l'informatique, les composants (mécaniques, puis électro-mécaniques, puis électroniques) étaient assez rudimentaires. De nos jours les composants peuvent être d'une complexité extrême, c'est le cas du microprocesseur, le composant essentiel mais non exclusif.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux notions fondamentales (la synchronisation) puis aux composants des ordinateurs modernes que sont les micro-ordinateurs : microprocesseur, coupleurs, barrettes de mémoire et périphériques.

9.1 Vue d'ensemble

9.1.1 Le microprocesseur

L'essentiel d'un ordinateur, reprenant presque tout ce que nous avons vu jusqu'ici, tient de nos jours sur un circuit intégré appelé **microprocesseur** (*microprocessor* en anglais).

Pour relier ce microprocesseur aux autres composants, afin d'obtenir un ordinateur, nous avons besoin d'un **modèle matériel** du microprocesseur, indiquant en particulier la disposition et la fonction de chacune de ses **broches**.

Pour le concepteur d'un ordinateur il faut également en connaître les *caractéristiques physiques* telles que les dimensions du boîtier et les tensions électriques à appliquer aux broches. Mais cet aspect physique ne concerne pas le programmeur.

9.1.2 Architecture primaire

L'**architecture primaire** d'un (micro-)ordinateur est celle de la figure 9.1 : le microprocesseur comporte un certain nombre de broches pour déterminer à quel élément mémoire accéder, un certain nombre de broches pour permettre le transfert des données vers/de la mémoire, un certain nombre de broches pour le relier aux divers périphériques (les ports) et évidemment des liens entre ces divers éléments.

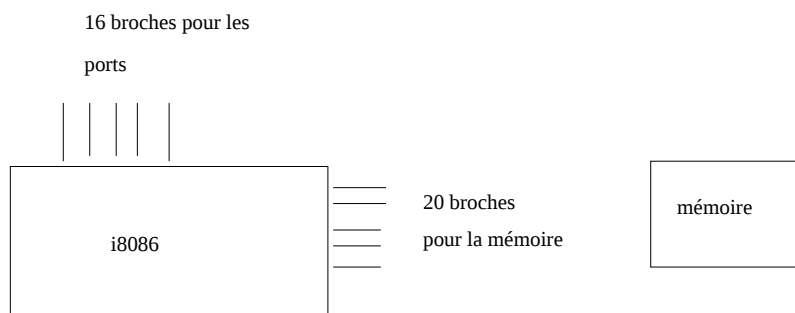


FIGURE 9.1 – Architecture primaire d'un ordinateur

9.2 Synchronisation et horloge

Il faut synchroniser le microprocesseur et ses coupleurs.

DÉFINITION 1.- Dans un **circuit logique asynchrone**, les sorties du circuit changent lorsque les entrées changent.

Le modèle du circuit logique asynchrone s'applique en général bien au cas des circuits combinatoires. Bien entendu ceci est un modèle théorique, en pratique il y a nécessairement un délai pour obtenir les signaux de sortie stabilisés. Lorsque ces délais sont tous à peu près de la même durée, cela n'a pas une grande importance. Considérons cependant un cas où cela a de l'importance.

Exemple.- Considérons le circuit combinatoire de la figure 9.2, formé d'un inverseur et d'une porte AND.

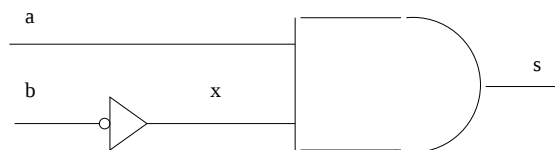


FIGURE 9.2 – Circuit non asynchrone

Supposons que le délai de propagation de l'inverseur soit le double de celui de la porte AND. Représentons le diagramme temporel à la figure 9.3 lorsque a et b passent simultanément de 0 à 1.

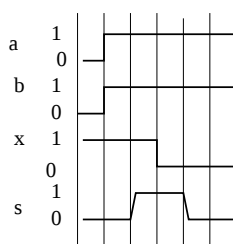


FIGURE 9.3 – Délai de propagation

On voit que durant deux unités de temps, le signal de sortie s est à 1 alors que a et b ont toujours la même valeur. On a donc une sortie erronée.

DÉFINITION 2.- Dans un **circuit logique synchrone**, les sorties sont synchronisées avec un signal d'horloge, c'est-à-dire qu'elles peuvent seulement changer lors d'une impulsion de celle-ci.

Exemple.- Modifions le circuit vu dans l'exemple ci-dessus selon la figure 9.4, de façon à ce que les sorties ne soient pas erronées après une impulsion d'horloge. La sortie à prendre en considération est ss , la sortie synchronisée.

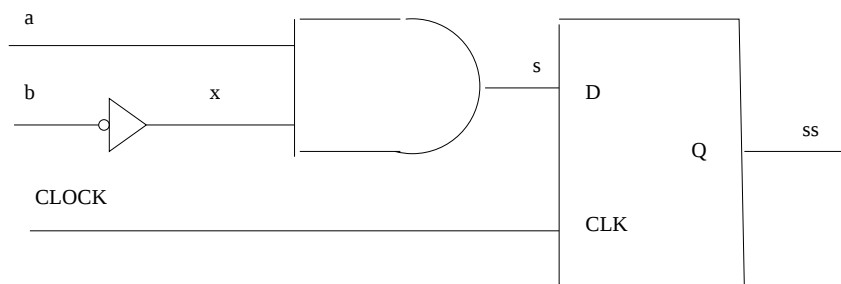


FIGURE 9.4 – Circuit synchrone

On choisit la période de l'horloge suffisamment longue de façon à ce qu'elle soit supérieure à tous les délais de propagation, ce qui évite les sorties erronées, ici cinq unités. Le diagramme temporel est alors celui de la figure 9.5. On remarque que ss a toujours la valeur voulue.

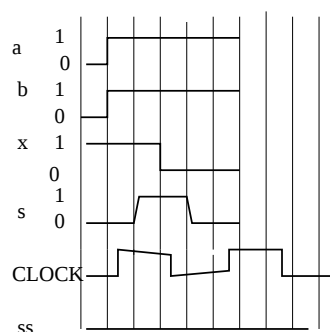


FIGURE 9.5 – Délai synchrone

Détermination de la fréquence d'horloge.- La fréquence de l'horloge est déterminée par les délais de propagation des portes. Ceux-ci sont eux-mêmes déterminés par le type de technologie utilisé pour fabriquer le microprocesseur.

Remarque.- On ne peut pas réellement passer à une fréquence très différente de celle qui est garantie par le constructeur : sortie erronée en cas de fréquence plus élevée (comme nous venons de le voir), perte de signal pour atteindre la mémoire en cas de fréquence pas assez élevée.

Signal de synchronisation.- Les microprocesseurs utilisent des circuits logiques synchrones. Ils ont donc besoin d'un **signal d'horloge**, ou **signal de synchronisation**. Ce signal n'est rien d'autre qu'une impulsion donnée à intervalle régulier sur la broche concernée.

Génération du signal de synchronisation.- Les circuits de générateur d'horloge emploient un oscillateur à cristal pour assurer une fréquence relativement stable. En fait celle-ci n'a pas besoin d'être très précise : vous avez certainement déjà remarqué que l'horloge de votre ordinateur n'est pas exactement à l'heure.

9.3 Les bus

9.3.1 Notion

La liaison entre le microprocesseur, la mémoire et les périphériques est laissée dans le flou le plus complet jusqu'à maintenant. Celle-ci s'effectue grâce à des *bus*.

DÉFINITION.- On appelle **bus** un ensemble de lignes de signaux assignées à un but commun.

Architecture à trois bus.- Les ordinateurs modernes se conforment à une architecture à trois bus, dont le schéma est montré à la figure 9.6 :

- le **bus des adresses** permet au microprocesseur de communiquer une adresse afin de lire un élément de mémoire ou d'accéder à un port donné ;
- les données elles-mêmes, provenant ou allant vers la mémoire ou un périphérique, transitent par le **bus des données** ;
- le **bus de contrôle** permet au microprocesseur d'indiquer s'il veut lire ou écrire, par exemple.

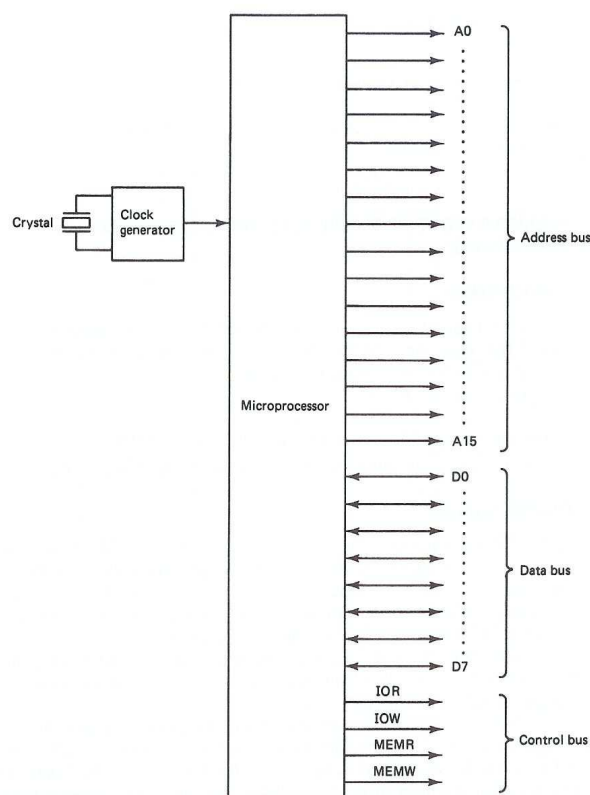


FIGURE 9.6 – Architecture à trois bus

Quatre cycles d'instruction.- Du point de vue de l'architecture à trois bus, il y a seulement quatre **cycles d'instruction** possible :

Type d'instruction	Bus des adresses	Bus de contrôle	Bus des données
Lecture mémoire	Adresse de l'élément mémoire	Sélectionner mémoire et lire	Valeur de l'élément mémoire
Écriture mémoire	Adresse de l'élément mémoire	Sélectionner mémoire et écrire	Donnée à écrire dans la mémoire
Lecture I/O	Adresse du périphérique	Sélectionner I/O et lire	Donnée du périphérique sélectionné
Écriture I/O	Adresse du périphérique	Sélectionner I/O et écrire	Donnée à écrire sur le périphérique

Toutes les instructions du microprocesseur sont des combinaisons de ces quatre cycles (appelés **cycles machine**).

9.3.2 Carte mère

Sur la plupart des micro-ordinateurs, les bus sont imprimés sur une plaque, appelée **carte mère** (*system board* ou *motherboard* en anglais).

Cette carte comprend également des **fiches** (*slot* en anglais) soudées pour y placer les différents circuits intégrés (microprocesseur, coupleurs, mémoire ROM, mémoire RAM...) et la liaison avec les périphériques (carte graphique, carte son...).

On parle alors de **bus système** pour les bus sur cette carte mère et de **bus d'extension** pour la façon dont sont conçus les fiches des cartes d'extension.

9.4 Interfaçage de la mémoire

9.4.1 Hiérarchie des mémoires

Notion de hiérarchie.- Nous avons vu l'intérêt de la **mémoire** pour obtenir un ordinateur. D'un point de vue du programmeur, il n'y a aucune raison *a priori* de distinguer tel type de mémoire par rapport à tel autre. Pour l'**interfaçage** des unités de mémoire au microprocesseur, par contre, c'est essentiel. Puisqu'il y a plusieurs **types de mémoire**, on crée une **hiérarchie de mémoire**.

Premier niveau de la hiérarchie.- Le premier niveau de hiérarchie permet de distinguer trois types de mémoire :

- la **mémoire primaire** (dite aussi **mémoire principale**, ou **mémoire centrale** ou **mémoire vive**) s'interface directement avec le microprocesseur dans l'architecture à trois bus ;
- la **mémoire secondaire**, ou **mémoire de masse**, permet de conserver les fichiers ; on utilise des périphériques pour cela (disquette, disque dur...) ;
- la **mémoire d'archive** permet de faire des sauvegardes ; on utilise d'autres périphériques pour cela (bandes magnétiques par exemple).

Mémoire centrale.- Le principe de chargement-exécution du microprocesseur impose que la mémoire directement interfacée au microprocesseur possède certaines caractéristiques :

- elle doit être capable de communiquer avec le microprocesseur à la fréquence du système ; ceci signifie qu'un microprocesseur à 6 MHz, par exemple nécessite des éléments de mémoire réagissant plus vite qu'un microprocesseur à 1 MHz ;
- chaque élément de mémoire doit pouvoir être accessible par son adresse ;

De nos jours, la mémoire centrale est presque exclusivement construite en utilisant la technologie des semi-conducteurs, se présentant comme des circuits intégrés (ce fut d'ailleurs la première grande réussite industrielle des circuits intégrés).

Mémoire secondaire.- Les caractéristiques de la mémoire secondaire sont les suivantes :

- elle doit être d'accès relativement rapide ; un programme doit être chargé en 1 à 30 s ;
- l'accès peut être direct (comme dans le cas des tambours puis des disques) ou séquentiel (comme dans le cas des bandes) ;
- le support de mémoire doit être transportable, de façon à ce que les fichiers de programme et de données puissent passer d'une machine à une autre ou sauvegardés ;
- elle doit être non volatile.

De nos jours les éléments essentiels de mémoire secondaire sont les disquettes, les disques durs (bien que non transportables au début), les CD-ROM et les clés USB.

Mémoire d'archive.- Les disques durs ne sont pas (facilement) transportables, ce qui nécessite les mémoires d'archive. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- elles doivent être non volatiles ;
- on n'y a pas accès fréquemment ;
- une grande vitesse d'accès et un accès direct ne sont pas essentiels ;
- elles doivent être transportables.

On utilise pour cela des rubans magnétiques, des **DAT** (pour *Digital AudioTape*) plus onéreux et autres.

Les mémoires d'archive sont utilisées pour les copies de sauvegarde des fichiers importants. Elles permettent la protection contre la perte de données consécutives à des erreurs de l'opérateur ou due aux « plantages » divers.

Conclusion.- Le type de mémoire utilisé dans un système informatique donné dépend des applications en vue. Les micro-contrôleurs, par exemple, n'utilisent souvent que de la mémoire principale. Par contre, un système dédié aux applications de gestion exigera une mémoire secondaire et une mémoire d'archive importantes.

Nous ne nous intéresserons dans la suite de ce chapitre qu'à la mémoire centrale, les autres types utilisant les ports d'entrée-sortie.

9.4.2 Éléments de mémoire centrale

Deux types de mémoire centrale.- De nos jours la mémoire centrale est presque entièrement constituée de circuits intégrés reposant sur la technologie des semi-conducteurs. Nous ne nous intéresserons donc ici qu'à ce type de mémoire centrale. Pour des raisons technologiques, on doit distinguer deux grands types de tels éléments de mémoire :

- la **mémoire ROM** (pour *Read Only Memory*) est non volatile mais il est plus difficile d'y écrire, d'où son nom ; en général on n'y écrit qu'une seule fois, en usine ;
- la **mémoire RAM** (pour *Random Access Memory*, nom choisi car RWM pour *Read Write Memory* est trop difficile à prononcer) est volatile (ce qui est dû aux technologies utilisées) mais, par contre, on peut écrire et lire autant de fois que l'on veut tant que l'ordinateur est sous tension.

Mémoire ROM.- La mémoire ROM est utilisée pour stocker les programmes de démarrage, les logiciels des micro-contrôleurs et, éventuellement, les programmes souvent utilisés (tels que l'interpréteur BASIC ou le traitement de textes des premiers micro-ordinateurs).

L'avantage de la mémoire ROM est qu'elle est disponible dès qu'on allume l'ordinateur. L'inconvénient est qu'elle occupe de la place mémoire sur laquelle on ne peut pas écrire, alors que les programmes de démarrage deviennent inutiles une fois l'ordinateur démarré, et l'écriture y est difficile (le plus souvent cela doit être fait en usine).

Mémoire RAM.- Les programmes et les données peuvent être rapidement chargés en mémoire RAM depuis le disque dur ou une disquette. L'inconvénient principal est qu'elle est **volatile**, c'est-à-dire que tout le contenu disparaît dès que l'ordinateur est éteint (même si c'est accidentel).

Organisation matérielle de la mémoire.- Un micro-ordinateur comprend en général à la fois de la mémoire ROM et de la mémoire RAM. Pour développer les logiciels d'un tel système, il peut être

important de savoir quelle partie est constituée de mémoire ROM et quelle partie est constituée de mémoire RAM, de façon à ne pas essayer d'écrire sur de la mémoire ROM.

L'indication de ce paramétrage est l'objet de l'**organisation matérielle** de la mémoire (en anglais *memory map*).

Caractéristiques idéales d'une mémoire.- Si nous voulions construire un circuit intégré de mémoire idéale, quelles caractéristiques devrait-il posséder ? Son **temps d'accès**, c'est-à-dire le temps requis pour lire ou écrire une donnée sur la puce, devrait être très court. La donnée, une fois écrite, ne devrait jamais être perdue, même lorsque l'alimentation électrique est interrompue, c'est-à-dire qu'elle devrait être **non volatile**. Le circuit intégré devrait être très dense, occupant seulement une petite surface du circuit imprimé sur lequel elle est mise. Et enfin la consommation électrique devrait être très faible.

9.5 Démarrage d'un micro-ordinateur

Notion.- Lors de la mise sous tension d'un microprocesseur, celui-ci initialise ses registres puis entre dans une boucle infinie de chargement/exécution d'instructions. En général la seule façon de sortir de cette boucle infinie est de couper l'alimentation électrique ou d'exécuter une instruction HALT. La valeur initiale du registre d'instruction spécifie l'endroit où le microprocesseur va chercher la première instruction.

La mémoire ROM.- Une question fondamentale se pose alors :

Où aller chercher cette instruction ?

À l'adresse initiale bien sûr. Mais à quoi correspond cette adresse ? Il ne peut pas s'agir de mémoire vive, puisque celle-ci est mise à zéro lors du démarrage (plus exactement elle ne conserve pas les données). Il ne peut pas s'agir non plus de mémoire de masse (disquette, disque dur, CD-ROM,...) puisque le microprocesseur ne sait pas accéder par lui-même à la mémoire de masse.

La seule possibilité est donc de fournir à cette adresse (et autour de cette adresse) un premier programme. On peut évidemment concevoir un ensemble d'interrupteurs permettant de programmer pour le début, mais ceci n'est pas très convivial.

On se sert donc d'un circuit intégré de mémoire permanente, nécessairement de la mémoire ROM. Cette ROM peut contenir le système d'exploitation (cas des premiers micro-ordinateurs tel que le CPC d'Amstrad) mais alors celui-ci est figé pour une machine donnée. Cette façon de faire n'est pas très intéressante de nos jours, puisque le système d'exploitation évolue très rapidement.

9.6 Historique

9.6.1 Synchronisation

Dès le début des années 1900 il y eut de nombreuses tentatives pour construire des substituts électriques puis électroniques aux orgues classiques. Vers 1935 Laurens HAMMOND construit son *Novachord* qui possède 72 notes avec deux lampes électroniques par note : la première sert à générer le son, la seconde module le niveau du signal sonore. 92 autres petites lampes agissent en tant que générateurs miniatures. Ce qui nous intéresse ici est que le fonctionnement des éléments électroniques du *Novachord* est subordonné aux battements d'une horloge électrique synchrone.

John ECKERT, qui utilise un *Novachord*, se souvient de cette idée lorsqu'il passe à la réalisation de l'ENIAC (conçu en 1942), le premier ordinateur électronique à avoir marqué l'histoire.

9.6.2 Apparition des microprocesseurs

Nous avons vu comment on est passé des tubes électroniques aux transistors puis aux circuits intégrés. Nous avons vu également que les circuits intégrés ont d'abord connu un succès commercial, à la toute fin des années 1960, avec la mémoire à semi-conducteur. *Intel* est rapidement devenu l'un des plus gros fournisseurs de ce type de mémoire. Cette firme a produit le premier microprocesseur en 1971.

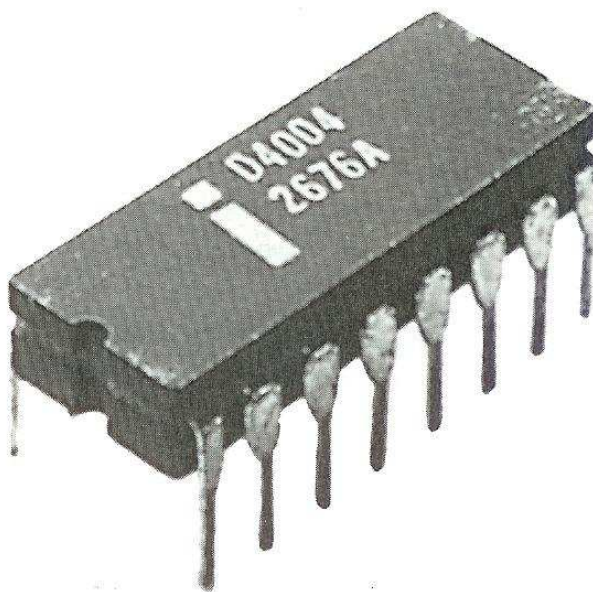
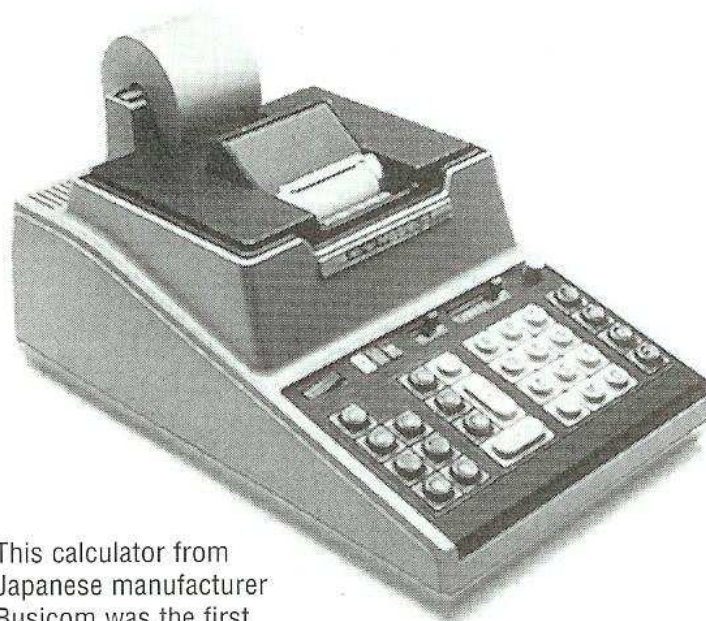


FIGURE 9.7 – Aspect extérieur du microprocesseur 4004 ([Mal-95], p. 11)

9.6.2.1 Le développement des circuits intégrés



This calculator from Japanese manufacturer Busicom was the first microprocessor application.
(Courtesy of Intel Corp.)

FIGURE 9.8 – La première calculatrice avec microprocesseur ([Mal-95], p. 4)

9.6.2.2 Le contexte : les calculatrices électroniques (1963)

Nous avons parlé de *calculateur électronique* pour les premières grosses machines électronique de la fin des années 1939 à la fin des années 1940. Ce n'était pas des ordinateurs car ils n'étaient pas programmables avec possibilité de rupture de séquence. Ils permettaient par contre d'effectuer très rapidement des opérations arithmétiques. Ils étaient gros et avaient des entrées-sorties assez imposantes, genre bandes magnétiques ou cartes perforées. Leur utilisation assez complexe était réservée à des spécialistes. On appelle **calculatrice électronique** toute machine capable d'effectuer rapidement les opérations arithmétiques avec une interface homme-machine simplifiée constituée de touches pour entrer les données et le type d'opération et d'un écran uniligne (*display* en anglais) pour afficher le résultat.

En 1962, l'entreprise britannique *Sumlock Computer* commence à construire un calculateur de bureau, appelé *Comptometer Mark IV*, qui connaît un succès commercial au Japon. Tadashi SASAKI propose de remplacer les tubes à vide par des transistors. Il quitte *Fujitsu* pour *Sharp* en 1964, qui, sous sa direction, produit le premier calculateur à transistors [Asp-97]. Il a la taille d'une caisse enregistreuse.

En 1967 *Texas Instrument* sort une calculatrice nettement plus petite, constituée de circuits

intégrés et de deux types de mémoires : de la mémoire RAM pour stocker les nombres entrés par l'utilisateur ou calculés par la machine et de la mémoire ROM pour les instructions internes, telles que celle pour calculer la racine carrée.

D'autres sociétés suivent le mouvement. Les calculatrices de poche (ou **calculettes**) remplacent les règles à calcul au début des années 1970.

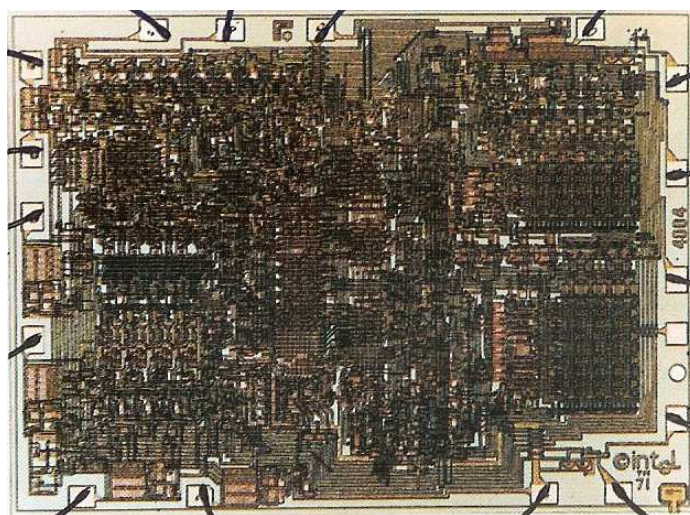


FIGURE 9.9 – Vue interne du microprocesseur 4004 ([Aug-84], p. 266)

9.6.2.3 Le premier microprocesseur (1971)

En 1969 *Busicom* (pour *BUSINESS COMputer*), fabricant japonais de calculatrices mécaniques et électroniques depuis 1967, veut développer une nouvelle ligne de calculatrices électroniques, programmées par logiciel et non plus en dur : chaque modèle de calculatrice doit posséder une ROM spécifique à ses fonctionnalités, un des modèles devant contenir par exemple une imprimante intégrée. Les ingénieurs de *Busicom* travaillent sur un projet comprenant douze circuits intégrés contenant chacun trois à cinq mille transistors. Cependant, à cette époque, les circuits intégrés courants comprennent un millier de transistors. *Intel* a récemment développé une technique pour fabriquer des circuits intégrés de deux mille transistors. Lors de l'été 1969 *Busicom* demande donc à *Intel* de développer un ensemble de circuits intégrés pour sa ligne de calculatrices électroniques [NH-81].

Intel confie la commande de *Busicom* à Marcian E. HOFF, ingénieur de trente-deux ans, Ted pour ses amis. Ted HOFF étudie le projet préliminaire de *Busicom* et trouve qu'il est trop compliqué : d'une part, le circuit intégré qui contrôle l'imprimante, par exemple, ne peut rien faire d'autre ; d'autre part, le taux de rejet pour des circuits intégrés d'une telle complexité est très élevé.

Les Japonais lui expliquent la conception des calculatrices électroniques, en particulier le fonctionnement et le contrôle des imprimantes, du clavier, de l'afficheur et du lecteur de cartes, sujet qu'il ne connaît pas.

HOFF trouve une solution : d'une part, développer un circuit intégré généraliste, un peu comme le processeur central d'un ordinateur, plus exactement du PDP-8 qu'il connaît bien, celui-ci utilisant un compromis entre un jeu réduit d'instructions au détriment d'un programme

plus grand ; d'autre part, placer le contrôle des périphériques sur des unités séparées. Le *microprocesseur* pourrait être programmable, allant chercher ses instructions en RAM et en ROM. Si un client, tel que *Busicom*, veut concevoir une calculatrice, il devra écrire un programme qu'*Intel* câblera dans une ROM. Chaque calculatrice exige donc le microprocesseur, une ROM et quelques circuits intégrés supplémentaires (appelés **coupleurs**).

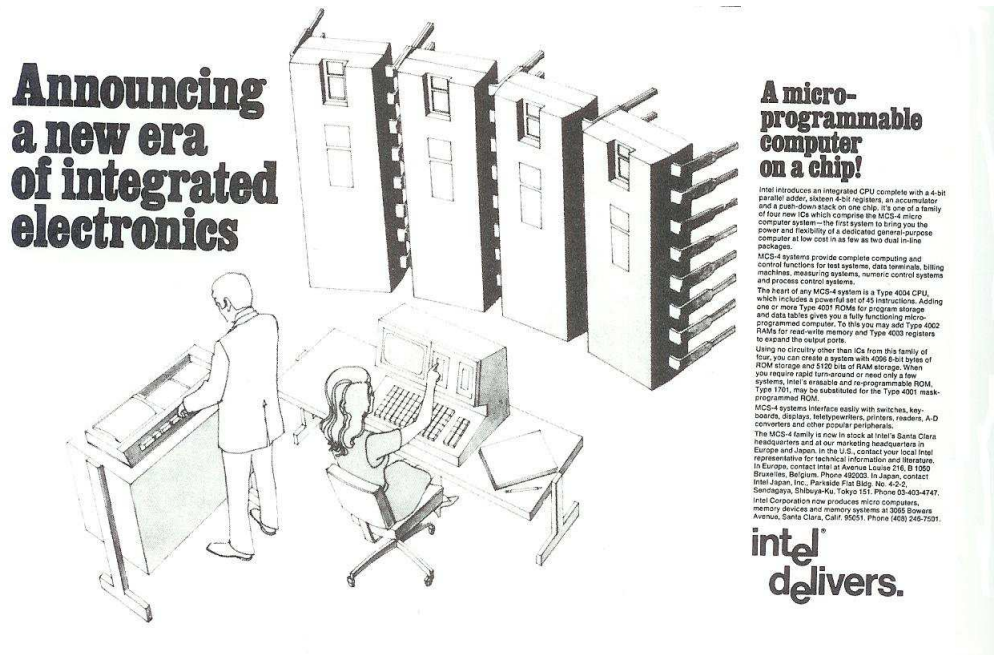


FIGURE 9.10 – Publicité pour le microprocesseur 4004 ([Aug-84], p. 264)

Busicom accepte cette proposition alors qu'*Intel* confie un autre projet à Ted HOFF, si bien que rien ne se passe durant un an, c'est-à-dire jusqu'à l'embauche par *Intel* de Federico FAGGIN en avril 1970. L'architecture et la conception logique sont presque terminés mais il reste à concevoir les différentes couches du circuit intégré. Le premier microprocesseur, appelé 4004 est produit en 1971 ainsi que trois coupleurs associés. Avec 2 250 transistors, le 4004 peut traiter des données sur 4 bits à une vitesse de 60 000 opérations par seconde. Les trois autres circuits intégrés sont le 4001, une ROM de 2 KiO pour stocker le programme, le 4002, une RAM de 320 octets pour stocker les données, et le 4003, un registre à décalage de 10 bits. Le nombre de transistors présents sur le 4004 est nettement moins grand que celui du projet initial de *Busicom*.

9.6.2.4 Le marché des microprocesseurs

Puisqu'*Intel* a développé le 4004 (la figure 9.9 montre la complexité d'un tel circuit intégré) sous contrat avec *Busicom*, l'entreprise japonaise a un droit exclusif sur celui-ci. En 1971, *Busicom* demande à *Intel* d'abaisser son prix de fabrication. Ce que fait *Intel* en échange du droit de commercialiser le 4004, sous le nom de MCS-4 (pour *MicroComputer System four-bit*). La figure 9.10 montre la première publicité parue dans le numéro du 15 novembre 1975 de *Electronics News*. *Intel* s'aperçoit rapidement que la commercialisation d'un microprocesseur est plus compliquée que celle d'un autre circuit intégré : outre le schéma (*datasheet*) fournissant les spécifications, il faut fournir un manuel de programmation, des notes montrant comment utiliser

les composants, une carte de développement capable d'implémenter un prototype fonctionnel du matériel et un assembleur croisé tournant sur un mini-ordinateur.

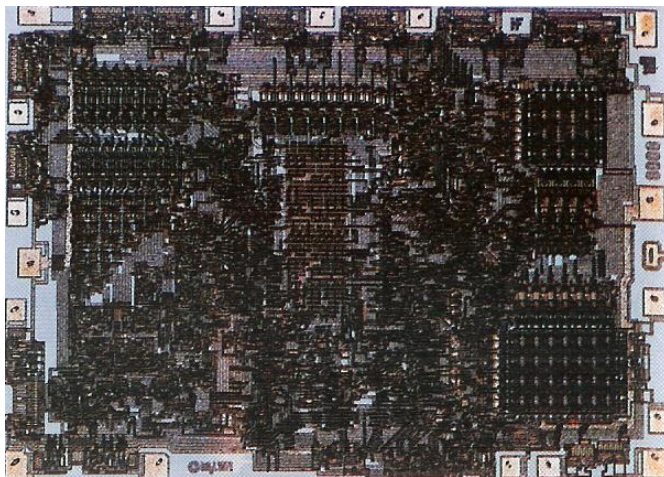


FIGURE 9.11 – Vue interne du microprocesseur 8008 ([Aug-84], p. 266)

Le 4004 se vend très lentement au début. En avril 1972, *Intel* introduit le premier microprocesseur huit bits, appelé 8008 (figure 9.11), qui est assez puissant pour devenir le cœur d'un mini-ordinateur : résultat du retrait de Ted HOFF du projet du 4004 en 1970 pour travailler sur un autre contrat, à savoir développer un circuit intégré pour un terminal intelligent (le *Datapoint 2200*) pour *Computer Terminal Corporation*, ce qui donne lieu à ce nouveau microprocesseur.

En 1974 sort le 8080 (figure 9.12).

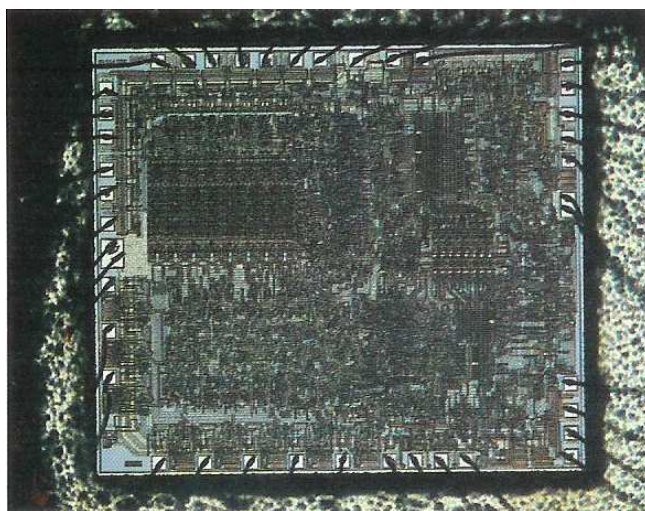


FIGURE 9.12 – Vue interne du microprocesseur 8080 ([Aug-84], p. 266)

9.6.3 Apparition des micro-ordinateurs

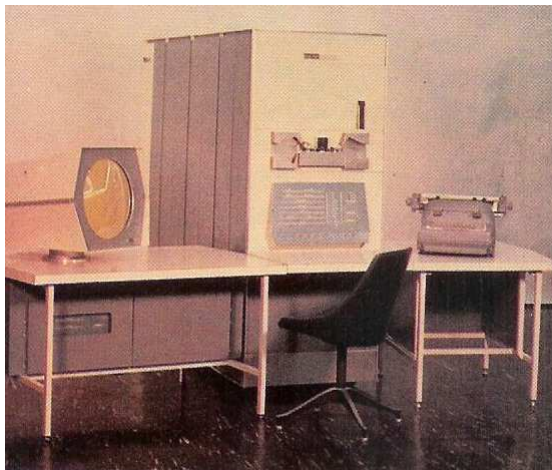


FIGURE 9.13 – PDP-1 ([Aug-84], p. 256)

9.6.3.1 Le contexte : accès à l'ordinateur

Lors de la phase expérimentale des ordinateurs, les programmeurs, suffisamment rares à cette époque, peuvent y accéder sans problème. Après le déploiement de ceux-ci, cela change. Comme le dit le mathématicien John KEMENY, l'un des inventeurs du langage BASIC :

Durant les deux premières décades de l'existence des calculateurs rapides, les machines étaient si rares et si onéreuses que l'homme s'approchait de l'ordinateur de la même façon que les anciens Grecs s'approchaient d'un oracle. [...] Un homme soumettait sa requête [...] et attendait alors patiemment jusqu'à ce qu'il soit commode pour la machine de s'occuper du problème. Seuls quelques acolytes sélectionnés pouvaient avoir des communications directes avec l'ordinateur. Dans le mode d'origine pour utiliser les ordinateurs, connu comme traitement par lots, des centaines de requêtes de calculs étaient collectées par le personnel d'un centre de calcul qui l'envoyait à la machine en un seul lot.

[Kem-72], p. 21

Une première solution pour résoudre ce problème est développée au MIT au début des années soixante : l'utilisation des ordinateurs en **temps partagé**. La vitesse atteinte par les ordinateurs, couplée avec la possibilité de faire transiter des informations par le réseau téléphonique, permettent d'imaginer une nouvelle philosophie d'utilisation. Plusieurs utilisateurs peuvent commander, en apparence simultanément, l'exécution de programmes distincts, chacun sur un **terminal** qui lui est propre. Le terminal, permettant la mise en œuvre de travaux de moindre ampleur sur un site éloigné du centre de calcul, met l'ordinateur à la portée des utilisateurs individuels.

Pourquoi ne pas rendre ce terminal *indépendant* et ne pas concevoir des machines beaucoup moins puissantes, certes, mais qui permettent l'exécution de multiples petits travaux pour lesquels un « gros » ordinateur est une solution lourde ? Ceci conduit à l'apparition des **ordinateurs personnels**, le plus souvent appelés **micro-ordinateurs** car ils utilisent un microprocesseur, au milieu des années 1970. Une première étape fut celle des **mini-ordinateurs**, introduits par DEC en 1963.

9.6.3.2 Les mini-ordinateurs (1963)



FIGURE 9.14 – PDP-8 ([Aug-84], p. 256)

Le premier mini-ordinateur est le PDP-1 de *Digital Equipment Corporation*, conçu à partir de 1957 par Kenneth H. OLSEN.

Kenneth H. OLSEN grandit à Stratford, Connecticut, centre de production de machines-outils, et étudie le génie électrique au MIT. En 1950, à l'âge de 24 ans, OLSEN rejoint le *Forrester's Digital Computer Lab* au MIT comme assistant chercheur et contribue au *Whirlwind*. Il est chargé de construire un petit ordinateur pour tester les premières mémoires à tores de ferrite. Travaillant nuit et jour, son équipe construit la machine en seulement neuf mois.

Lorsque les ordinateurs du système SAGE sont mis en production dans l'usine de Poughkeepsie d'IBM, le *Digital Computer Lab* envoie OLSEN et quelques autres pour garder un œil sur le projet. Norman TAYLOR, le chef d'OLSEN, se souvient :

Lorsque IBM commença à construire ce monstre, je demandais à Olsen de garder le contrôle sur lui ; nous étions concernés par la fiabilité de ses circuits. Ken alla vivre à Poughkeepsie durant deux ans et demi. [...] Un jour Olsen me dit « Norm, je peux battre ces gens à leur propre jeu ». La tâche suivante que je lui donnais fut un ordinateur de recherche transistorisé.

[Fis-81], p. 211

Voulant entrer dans les affaires, OLSEN, son frère cadet Stan et un collègue, Harlan E. ANDERSON, mettent plusieurs milliers de dollars de leur poche pour fonder *Digital Equipment Corporation* (plus tard connu sous son acronyme de DEC) dans un moulin de briques à Maynard, dans le Massachusetts, une banlieue de Boston. DEC commence par être un sous-traitant d'une entreprise au capital de 70 000 \$ située à Boston, *American Research and Development Corporation* (ARD). Son premier produit est un ensemble de modules électroniques servant à tester les ordinateurs.

Trois ans après sa fondation, DEC sort un petit ordinateur vendu 120 000 \$, le *Programmed Data Processor* model 1, ou PDP-1 montré à la figure 9.13.

Celui-ci connaît un échec mais tout change en 1963 avec le PDP-8, montré à la figure 9.14 ouvert pour révéler son intérieur. À peu près de la taille d'un réfrigérateur, le PDP-8 est constitué de transistors et de mémoires à tores de ferrite, vendu 18 000 \$. Il ne peut exécuter qu'un

programme à la fois, les mots ont une taille de douze bits (au lieu des vingt bits habituels à l'époque) et il ne contient que 4 Ki mots de mémoire mais il coûte beaucoup moins cher qu'un ordinateur de l'époque. Des scientifiques commandent des PDP-8 pour leurs laboratoires, des ingénieurs pour leurs bureaux, la marine américaine en installe dans des sous-marins, les raffineries peuvent contrôler les opérations chimiques et ainsi de suite.

Le PDP-8 sonne le glas de l'ordinateur-diva, entouré d'une nuée de techniciens inabordables et enchâssé dans un environnement climatisé. Des dizaines d'autres entreprises se lancent alors sur le marché des mini-ordinateurs.

9.6.3.3 Les ordinateurs personnels (1974)

Les ordinateurs personnels connaissent un succès avec l'arrivée des micro-ordinateurs, dont le cœur est un microprocesseur. Ceux-ci sont précédés par des ordinateurs personnels dont le cœur n'est pas un microprocesseur et qui ne connurent pas de succès commercial à cause de leur prix. Il s'agit essentiellement de celui conçu par David AHL chez DEC en 1974 et celui de *Hewlett-Packard* à Palo Alto en Californie.

David Ahl

David AHL rejoint DEC en 1969. Sa formation d'ingénieur est complétée par un master de gestion et un master en psychologie de l'éducation. En 1970, il conçoit un groupe de produits éducatifs, comprenant à la fois le matériel et les logiciels, destiné aux lycées et aux universités, ce qui marche bien.

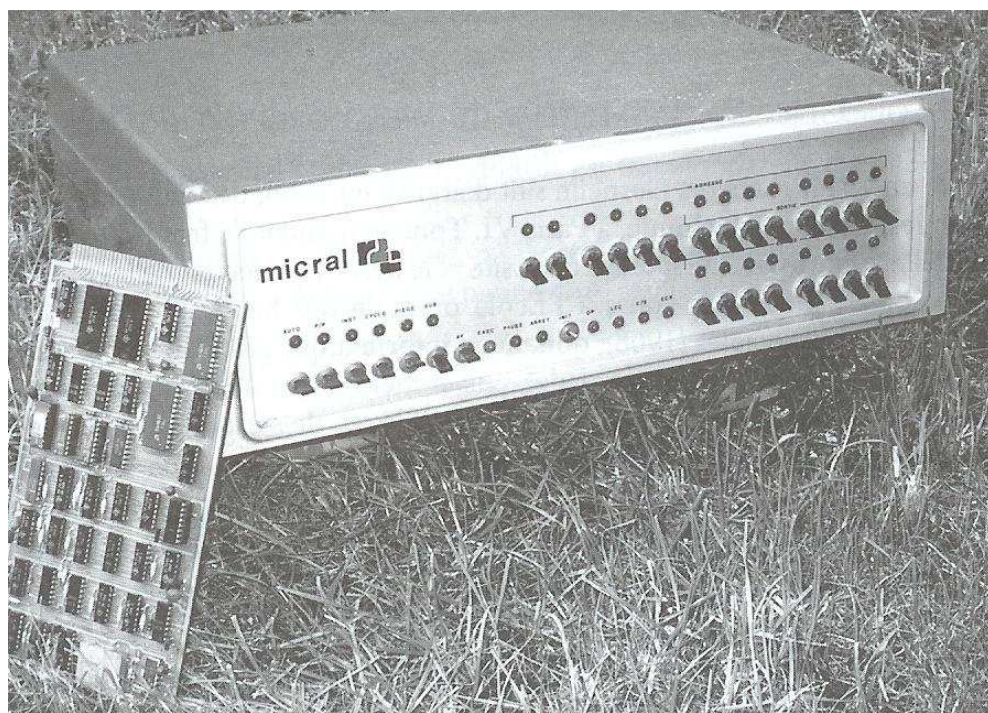


FIGURE 9.15 – Le premier Micral photographié à côté de sa carte mère ([Lil-03], p. 93)

Le groupe de AHL commence à recevoir des commandes de la part d'individus, et non plus seulement d'entreprises, en général des ingénieurs consultants. Il se demande alors si un marché pour les ordinateurs personnels pourrait exister. Il explore celui-ci en faisant développer deux

prototypes. L'un est un terminal (contenant des circuits intégrés de mémoire mais pas de microprocesseur), version édulcorée du célèbre PDP-8. L'autre est un ordinateur portable, de la taille d'une malette, contenant un moniteur, un clavier et un lecteur de disquette.

AHL veut vendre ses machines aux écoles et à tous ceux qui sont intéressés, pour 5 000 \$. Il contacte des revendeurs qui pourraient le proposer en kit. Ceux-ci sont intéressés. En mai 1974 il propose son plan devant le comité de DEC, présidé par OLSEN. Celui-ci est partagé mais finit par refuser de poursuivre l'expérience. Déçu, AHL quitte DEC quelques mois plus tard. Il créera plus tard un magazine, *Creative Computing*, consacré aux micro-ordinateurs.

9.6.3.4 Naissance des micro-ordinateurs (1972)

Le micro-ordinateur est inventé en 1972 par François GERNELLE dans la petite société R2E Micral (*Réalisations Études Électroniques*), implantée dans la banlieue parisienne, créée et animée par André TRUONG. Cette machine est commercialisée en 1973 sous le nom de **Micral**.

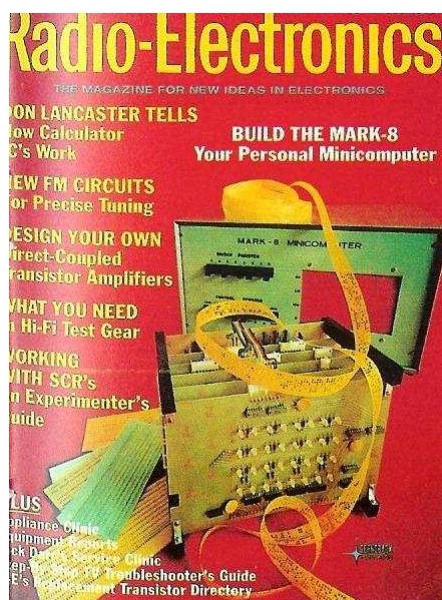


FIGURE 9.16 – La couverture de *Radio-Electronics* de juillet 1974 ([Aug-84], p. 269)

En 1972, M. PERRIER, de l'INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*) demande à la jeune société R2E de mettre au point un système informatique à moindre coût, destiné à la recherche agricole, qui puisse être transportable. François GERNELLE, directeur de la *Recherche et Développement* de la R2E, lui répond : « Si j'ai bien compris votre application de contrôle de processus, vous estimez que le prix d'un mini-ordinateur PDP 8 4K de DEC (45 000 FF) est trop élevé pour votre budget. Aussi je vous propose de vous faire un calculateur pour la moitié de ce prix », ce qu'accepte M. PERRIER.

André TRUONG et François GERNELLE, sachant qu'*Intel* vient de lancer le microprocesseur 8008, le commandent et François GERNELLE met son équipe sur le projet. Cinq mois plus tard, en avril 1973, le *Micral* est vendu 8 450 F. Il fonctionne avec une fréquence d'horloge de 0,5 MHz, son processeur dispose de 51 instructions, il ne possède ni écran, ni clavier : les entrées sont assurées à l'aide de commutateurs et l'affichage s'effectue sur des voyants, le tout placé sur la face avant.

J'ai appris à connaître les mini-ordinateurs à Intertechnique, et notamment les Multi 8 et Varian 620 I. La partie processeur de ces minis, c'est-à-dire la logique qui décode et exécute les instructions, représentait 7 à 10 cartes bourrées de composants (900 sur le Varian 620 I). Lorsque, à l'automne 1971, j'ai découvert la « Preliminary Data Sheet » du microprocesseur 8008 d'Intel, j'ai réalisé qu'on pouvait remplacer tout ça par un seul circuit en technologie MOS, et j'ai commencé à rêver. C'était peut-être l'occasion de réaliser un ordinateur, certes très peu puissant, mais à un prix tellement plus bas que cela marquera une rupture et permettrait à l'informatique d'envahir de nombreux nouveaux domaines, là où elle serait utile, mais pour lesquels elle était, à l'époque, beaucoup trop chère et pas suffisamment fiable.

[...]



FIGURE 9.17 – La couverture de *Popular Electronics* de janvier 1975 ([Aug-84], p. 273)

À cette époque, les minis disposaient tous de mémoires à tores de ferrite, chères, peu fiables et très gourmandes en énergie. Ces mémoires, prétendument permanentes, s'écroulaient tout le temps pour plein de raisons, et il fallait disposer d'un périphérique de chargement et rester l'arme au pied devant l'ordinateur (lecteur de carte, de ruban, lecteur de bande, etc.) pour pallier les défaillances. Ce périphérique était forcément cher, peu fiable et également gros consommateur d'énergie.

J'ai donc pris le pari d'utiliser les mémoires à semiconducteur, 100% MOS, et je crois bien avoir été le premier à le faire. Les chips (les puces) EPROM 1702 (de 256 octets, à l'époque) étaient dédiées aux programmes permanents, et les puces RAM 1101 (256 bits) spécialisées aux données et aux programmes chargés dynamiquement (de petits programmes, par force).

François GERNELLE dans [Lil-03], pp. 95–96

Les clients potentiels français, bien qu'intéressés, n'accordent pas leur confiance à une nouvelle machine ne provenant pas des États-Unis. André TRUONG présente donc le *Micral* à la grande messe américaine de l'époque, l'exposition NCC (*National Computer Conference*), où il recueille des appréciations favorables et des articles élogieux, dont la revue *Electronics*, la référence à l'époque. C'est d'ailleurs une revue américaine qui qualifiera cette machine de *microcomputer*,

donnant ainsi naissance au mot *micro-ordinateur*. Une première production de 500 *Micral* trouve, dès la première année, une application dans les péages d'autoroute. Le dix-millième sortira en 1981.

Le deuxième micro-ordinateur est conçu fin 1973 aux États-Unis.

Mark-8

Jonathan A. TITUS prépare son doctorat en chimie au *Virginia Polytechnic Institute* à Blacksburg et occupe son temps libre à des montages électroniques. Lorsqu'*Intel* introduit son micro-processeur huit bits 8008, il étudie ses spécifications et prend conscience qu'il est assez puissant pour faire tourner un mini-ordinateur. Il en commande un et reçoit également un manuel d'applications, plein de diagrammes de circuits. S'inspirant de ceux-ci, il construit un prototype d'ordinateur fin 1973. La machine a la taille d'un mini-four et consiste en six cartes dont l'une contient le 8008 et ses coupleurs et une autre les barrettes de mémoire RAM (256 octets que l'on peut étendre jusqu'à 16 KiO). Il n'y a évidemment pas de ROM, qu'il aurait fallu payer quelques milliers de dollars à un fondeur. Il faut donc entrer toutes les instructions à la main, bit par bit à l'aide d'interrupteurs situés à l'avant de l'appareil. Les résultats sont affichés sur un panneau d'ampoules situé à côté des interrupteurs.



FIGURE 9.18 – IMSAI 8080 ([Lil-03], p. 114)

Voulant faire partager son expérience, il écrit deux lettres pour *Popular Electronics* et *Radio-Electronics*, deux magazines bien connus, leur demandant s'ils seraient intéressés par un article sur la construction de son Mark-8 comme il l'appelle. Un article paraît dans le numéro de juillet 1974 de *Radio-Electronics* avec une couverture très alléchante (voir figure 9.16). L'article est technique mais fait seulement quatre pages. Si on veut plus de détails, on peut commander un livret de quarante-huit pages, écrit par TITUS et publié par *Radio-Electronics* pour 5,50 \$. Dix mille livrets furent vendus mais on ne sait pas combien de Mark-8 ont été construits.

9.6.3.5 L'adoption des micro-ordinateurs (1975)

Altair

En janvier 1975 *Popular Electronics* publie la première partie d'un article en deux parties d'un ordinateur plus sophistiqué, l'**Altair 8800** (figure 9.17), proposé par une petite entreprise de matériels électroniques, *Micro Instrumentation and Telemetry Systems* (MITS) située à Albuquerque au Nouveau Mexique, au prix de 395 \$ en kit ou de 650 \$ tout assemblé. Des milliers de commandes affluent à MITS dans les mois qui suivent la parution de l'article.

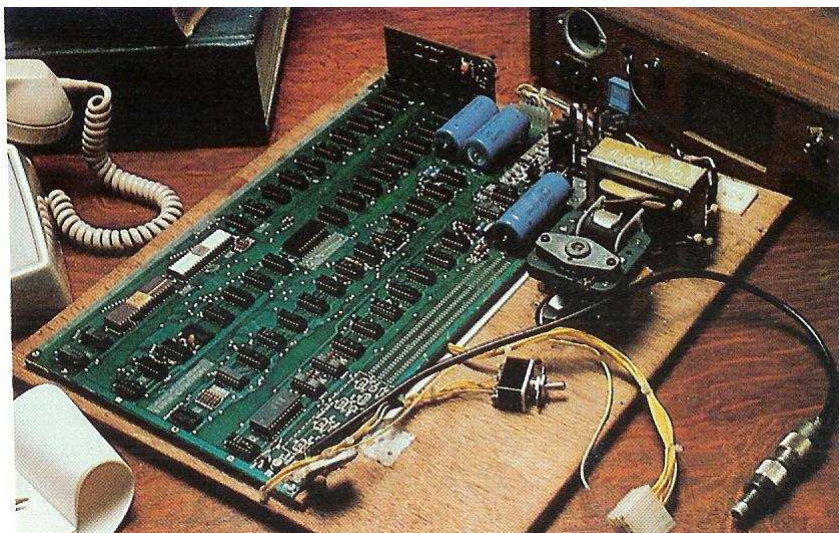


FIGURE 9.19 – Apple I ([Aug-84], p. 278)

Créée en 1969, MITS commence par proposer une calculatrice en kit au prix de 169 \$ et en vend 10 à 15 milles entre 1972 et 1974 mais il y a peu de marge sur ce produit et la société est rapidement en difficulté financière. Edward ROBERTS, ingénieur électronicien et un des quatre fondateurs de MITS, étudie les spécifications du microprocesseur 8080 et en conclut qu'il est suffisamment puissant pour être le cœur d'un mini-ordinateur. Il en discute avec le directeur éditorial de *Popular Electronics*, Arthur SALSBERG, et son éditeur technique, Leslie SOLOMON, qui l'encouragent à poursuivre son projet. MITS décide la construction de l'*Altair* en 1974 dans un effort désespéré de sauver l'entreprise.

ROBERTS conçoit le plan général de l'ordinateur, en n'oubliant pas 16 connecteurs d'extension. William YATES, ingénieur aéronautique précédemment officier de l'Armée de l'air conçoit la carte, dont le chemin pour chacun des signaux électriques. Sa capacité de traitement est de 65 000 mots de 8 bits.

IMSAI

Une autre société américaine, *IMS Associates*, développe à ce moment un micro-ordinateur très proche de l'*Altair*, appelé *Imsai 8080*, sorti fin 1975. Bâti autour d'un 8080, ce micro-ordinateur offre une façade avant plus évoluée (figure 9.18), équipée d'interrupteurs plus résistants et livrée toute montée, prête à l'emploi.

Apple I

Stephen G. WOZNAK est très tôt passionné par l'électronique. À treize ans, il construit un calculateur transistorisé qui gagne un prix. L'été 1971, alors qu'il travaille comme programmeur, lui est présenté Steve JOBS, qui a seize ans à l'époque. Ils découvrent qu'on peut obtenir des communications à longue distance gratuitement en émettant un certain son. WOZ, comme on

l'appelle, conçoit un appareil électronique pour les produire, JOBS s'approvisionne en matériel électronique et ils en vendent, en toute illégalité, 150 entre 40 \$ et 150 \$ pièce à des amis et connaissances.



FIGURE 9.20 – Apple II ([Lil-03], p. 116)

L'introduction de l'*Altair* a conduit à la formation de clubs d'ordinateurs à travers les États-Unis, dont le *Homebrew Computer Club* dans la Silicon Valley. WOZ entend parler de ce club et assiste à son premier meeting en mars 1975 ; il en devient un des membres les plus actifs.

Cette même année 1975, il achète pour 20 \$ un nouveau microprocesseur 8 bits, le 6502, conçu par une petite entreprise de la Silicon Valley appelée *MOS Technology*, et commence à construire son propre micro-ordinateur. C'est une simple carte mère avec 4 Kib de RAM (figure 9.19), moins puissant que l'*Altair* et l'*IMSAI* mais moins cher, moins compliqué et pouvant se connecter directement à un moniteur. Il conçoit le premier interpréteur BASIC pour le 6502. JOBS lui fait beaucoup de suggestions.

WOZ effectue la démonstration de sa machine devant une audience enthousiaste du *Homebrew club* et essaye alors d'intéresser *Hewlett-Packard*, son employeur. Cependant l'entreprise doute qu'il existe un marché pour de telles machines. JOBS pense autrement et comence à rechercher des revendeurs. Il en trouve un en la personne de Paul TERRELL, membre du *Homebrew club* et propriétaire du nouveau magasin *Byte Shop*. Celui-ci commande cent cartes à 500 \$ l'une. Ils en vendent 175.

9.6.3.6 Les premiers succès commerciaux : Apple II et Pet (1977)

Nous venons de voir l'apparition des premiers micro-ordinateurs. Les premiers succès commerciaux concernent l'*Apple II* et le *PET*.

Apple II

WOZ et JOBS, âgés de 21 et 24 ans, revendent en 1976 un minibus Volkswagen qu'ils possèdent et démarrent dans le garage des parents de JOBS la société *Apple Computer Company* avec un capital de 1 350 dollars. Devant le succès (relatif) de l'*Apple I*, ils se disent qu'il y a un marché. WOZ conçoit un micro-ordinateur plus sophistiqué, appelé *Apple II*. JOBS s'occupe du côté commercial de l'opération. Il demande à Nolan BUSHNELL, le fondateur d'*Atari*, une aide financière, qui le renvoie à Don VALENTINE, qui lui-même lui suggère de contacter A. C. MARKULLA, le directeur commercial d'*Intel* entre 1970 et 1974, au moment où l'entreprise a introduit le microprocesseur. MARKULLA visite le garage de JOBS en octobre 1976, aide WOZ et JOBS à construire leur plan commercial, achète le tiers de *Apple Computer Company* pour 91 000 \$ et trouve des crédits pour 900 000 \$.



FIGURE 9.21 – KIM-I (Bolo's Computer Museum, <http://www.bolo.ch>)

L'*Apple II* est introduit en avril 1977, lors de la *First West Coast Computer Fair*. Bâti autour du microprocesseur 6502, l'*Apple II* tourne à un MHz et dispose de 4 KiO de mémoire vive, extensible, et de 12 KiO de mémoire morte ROM contenant le Basic de *Microsoft*. Il est vendu 1 195 \$ sans moniteur et est idéal pour jouer aux jeux vidéo. Une campagne de publicité imaginative fait d'*Apple* l'entreprise à la croissance la plus rapide dans l'histoire américaine.

La grande inspiration a consisté à en faire une machine ouverte, capable de recevoir des extensions grâce à ses connecteurs incorporés. Une autre nouveauté : le boîtier est en plastique beige. Les programmes sont stockés sur des cassettes.

PET

À la même époque qu'*Apple*, *Commodore* entre en lice avec le *Pet*.

Jack TRAMIEL crée *Commodore* en 1957, dans le Bronx d'abord puis au Canada, société de

réparation puis de fabrication de machines à écrire portables. En 1969 il construit de petites calculatrices puis rachète, en 1977, le fabricant de semiconducteurs *MOS Technology*, créé par Chuck PEDDLE, le concepteur du microprocesseur 6502.

MOS Technology développe en 1977 une carte micro-ordinateur (figure 9.21) appelée KIM-1 : c'est une simple carte équipée d'un microprocesseur 6502 qui se prête bien à l'enseignement du matériel et de la programmation (en hexadécimal), des afficheurs 7 segments servant à l'affichage.



FIGURE 9.22 – Le Pet de Commodore ([Lil-03], p. 124)

Lors du rachat de *MOS Technology* par *Commodore*, Chuck PEDDLE propose de concevoir un micro-ordinateur utilisant son propre microprocesseur, le 6502, appelé **Pet** (un jeu de mots puisqu'il signifie à la fois *Personal Electronic Transactor* et animal familier en anglais, figure 9.22). Il dispose de 8 KiO de mémoire vive et de 16 KiO de ROM. Son affichage s'effectue sur 25 lignes de 40 colonnes et il dispose d'un lecteur-enregistreur de cassettes interne. Il est présenté en 1977 à la foire de Hanovre, en Allemagne.

9.6.3.7 Un marché diversifié

Devant le succès de l'*Apple II* et du *PET*, de très nombreuses entreprises se lancent sur le marché des micro-ordinateurs. On peut renvoyer à [Lil-03] où LILEN fait une synthèse de ses chroniques dans diverses revues d'électronique et d'informatique, pour une première vue d'ensemble.

9.6.3.8 Une standardisation : le PC d'IBM (1981)

Au début des années 1980, le choix pour un micro-ordinateur est immense. Cependant ils sont incompatibles entre eux, tant en ce qui concerne les extensions que du point de vue des logiciels. Ils sont considérés comme des jeux d'enfants par les informaticiens professionnels de l'époque, qui freinent des quatre fers leur introduction dans les entreprises.

En 1981, la plus grande entreprise d'informatique, IBM, sort un micro-ordinateur, tout simplement appelé PC (pour *Personal Computer*), qui connaît un succès immédiat auprès des entreprises malgré son prix. Contrairement à *Apple*, IBM rend public les spécifications du PC et surtout du BIOS (la partie du logiciel utilisée lors du démarrage de l'ordinateur). Ceci permet à de nombreuses sociétés de sortir des *compatibles PC* et à IBM d'introduire un standard de fait.



FIGURE 9.23 – IBM PC (1981)

John OPEL préside IBM à la fin des années 1970. S'inquiétant de voir surgir un nouveau marché avec le développement des micro-ordinateurs, il délègue à une équipe spéciale le soin d'en développer un. Cette équipe est dirigée par Bill LOWE et regroupe quelques passionnés dont Don ESTRIDGE. Travaillant dans un laboratoire IBM de la ville de Boca Raton, en Floride, cette

équipe réalise un tour de force en concevant un ordinateur en moins d'un an. Le projet de PC est présenté en 1980 au comité exécutif d'IBM.

Cet ordinateur résulte de l'assemblage de composants standard du marché : le microprocesseur 16 bits 8088 d'Intel cadencé à 4,77 MHz ; mémoire ROM de 40 KiO ; mémoire RAM de 16 KiO, extensible à 256 KiO ; un connecteur pour lecteur de cassette ; deux unités de disquettes de 160 KiO chacune ; clavier de 83 touches ; écran monochrome 11 pouces.

Quelques années après, les compatibles PC et l'*Apple* couvrent une très grande part du marché, reléguant petit à petit les autres aux oubliettes.

9.7 Bibliographie

- [Asp-97] William ASPRAY, *The Intel 4004 Microprocessor : What Constituted Invention ?*, **IEEE Annals of the History of Computing**, vol. 19, 1997, pp. 4–15.
[Naissance du microprocesseur, y compris l'apport des Japonais Tadashi SASAKI et Masatoshi SHIMA.]
- [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.
- [Fag-72] Federico FAGGIN, M. SHIMA, M. E. HOFF, Jr., H. FEENEY, and S. MAZOR, *The MCS-4 – an LSI Micro Computer System*, **IEEE '72 Region Six Conf. Proc.**, pp. 1–6.
[La bibliographie liste les présentations techniques majeures.]
- [Fag-92] Federico FAGGIN, *The Birth of the Microprocessor*, **Byte**, March 1992, pp. 145–150.
- [Fis-81] FISHMAN, Katherine, **The Computer Establishment**, McGraw-Hill, 1981.
- [Kem-72] KEMENY, John, **Man and the Computer**, Charles Scribner's Sons, 1972.
- [Lil-03] LILEN, Henri, **La saga du micro-ordinateur : une invention française**, Vuibert, 2003, 271 p.
- [Mal-95] MALONE, Michael S., **The Microprocessor : A Biography**, Springer, 1995, XVII + 333 p., ISBN 0-387-94342-0.
- [NH-81] NOYCE, Robert N. and HOFF, Marcian E. Jr, *A History of Microprocessor Development at Intel*, **IEEE Micro**, vol. 1, n° 1, 1981.