

# INITIATION AUX MICROPROCESSEURS ET AUX MICROCONTRÔLEURS

Architecture, fonctionnement,  
programmation et  
mise en œuvre pratique

2<sup>e</sup> éd.

Cours et  
exercices  
corrigés

Joseph Haggège

# Chapitre 1

## Historique et évolution des calculateurs

### 1.1 Étapes majeures

La nécessité de disposer de moyens permettant d'effectuer des calculs longs et répétitifs, avec un faible risque d'erreur, a conduit à concevoir des instruments et des machines de plus en plus complexes dont la liste suivante résume, de manière très incomplète, les principales évolutions.

#### **Machines mécaniques**

- Premiers instruments de calcul, développés depuis l'Antiquité et utilisés jusqu'au début du  $xx^e$  siècle : bouliers, abaques, règles à calculer, compas de proportion.
- Première vraie machine à calculer : Blaise Pascal, 1642, machine à additionner.
- Machine à multiplier : Gottfried Wilhelm Leibniz, 1694, basée sur les travaux de John Neper (1617, logarithmes).
- Première machine programmable : métier à tisser, Joseph Marie Jacquard,  $xviii^e$  siècle, machine à cartes perforées.
- Machine programmable universelle : Charles Babbage,  $xviii^e$  siècle, non réalisable avec les technologies de l'époque (machines à vapeur), principe des machines actuelles.

#### **Machines électromécaniques**

- Machine à calculer à cartes perforées : Hermann Hollerith, 1885, facilite le recensement américain.
- Machines industrielles à base de relais électromécaniques pour la comptabilité et les statistiques, Howard Aiken et George Stibitz, 1936-1939.

## Machines électroniques

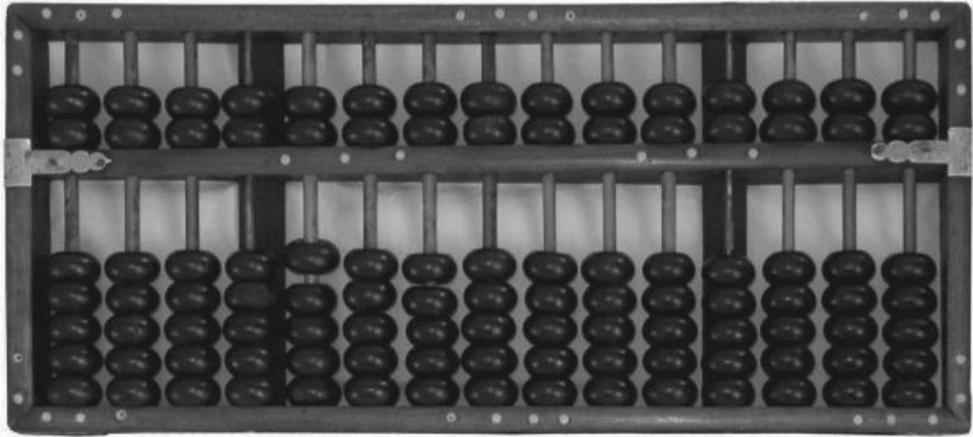
- Première machine à calculer électronique : ENIAC, 1944, John Eckert et John William Mauchly, 18000 tubes électroniques, machine à programme câblé.
- Concept de machine universelle à programme enregistré : Alan Turing, John Von Neumann, 1946, instructions stockées dans la mémoire du calculateur : ordinateur.
- Premier ordinateur commercialisé : SSEC d'IBM, 1948.
- Ordinateur à transistors : 1963, PDP5 de Digital Equipment Corporation (DEC), introduction des mémoires à ferrites : mini-ordinateurs.
- Micro-ordinateurs : 1969-70, utilisation des circuits intégrés LSI.
- Premier microprocesseur : Intel, 1971, microprocesseur 4004, puis 8008, premier micro-ordinateur : le Micral, 1973, France, puis l'Altair, 1975, États-Unis.
- Autres microprocesseurs : 8080 et 8085 d'Intel, 6800 de Motorola, Z80 de Zilog : microprocesseurs 8 bits, début des années 1980.
- Microprocesseurs 16 bits : 8086/8088 d'Intel, 68000 de Motorola.
- Microprocesseurs 32 bits en 1986 : 80386 d'Intel et 68020 de Motorola.
- Fabrication en grandes séries des micro-ordinateurs : 1977, Apple, Commodore, Tandy, IBM PC + MS-DOS (Microsoft) en 1981.

## Machines actuelles

- Ordinateurs de plus en plus puissants, basés sur des microprocesseurs performants : Pentium, Power PC, Core i7.
- Nouvelles architectures de microprocesseurs : superscalaires, vectorielles, RISC, VLIW, Dataflow.
- Applications multimédia, réseaux, téléphonie mobile.
- Systèmes embarqués : microcontrôleurs, processeurs de traitement de signal (DSP, DSC).

## 1.2 Galerie de portraits

Les figures suivantes illustrent les différentes générations de calculateurs évoqués dans la section précédente, afin de montrer les étapes franchies depuis l'Antiquité et l'accélération remarquable qui a eu lieu à partir de la deuxième moitié du siècle dernier.



Le boulier chinois : un des plus anciens instruments d'aide au calcul de l'histoire de l'humanité.

FIGURE 1.1 – Le boulier chinois

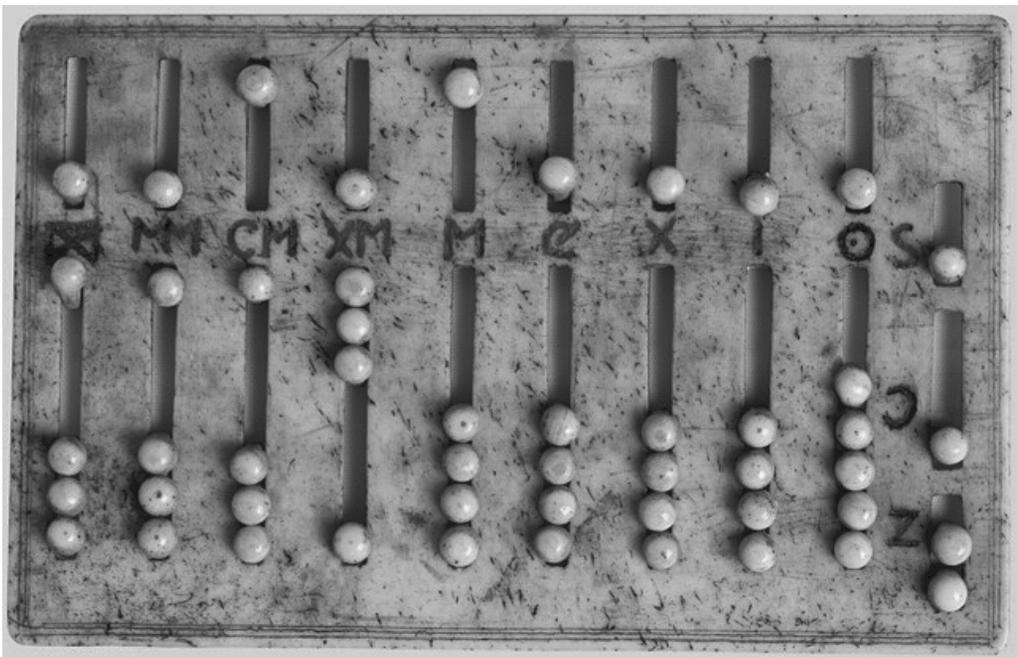


FIGURE 1.2 – L'abaque romain



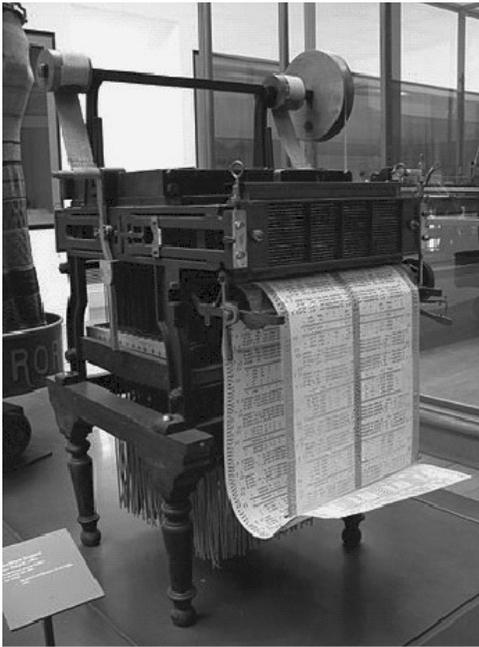
Première « vraie » machine à calculer, 1642.

FIGURE 1.3 – La machine à additionner de Pascal



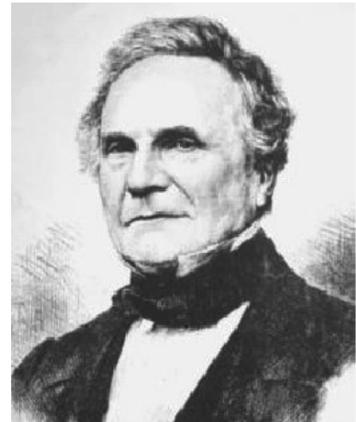
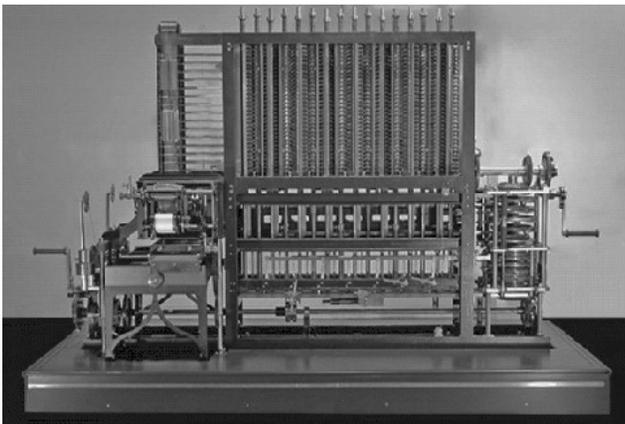
Fabriquée en 1694, basée sur les travaux de John Neper (1617, logarithmes).

FIGURE 1.4 – La machine à multiplier de Leibniz



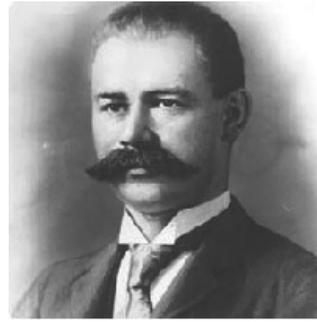
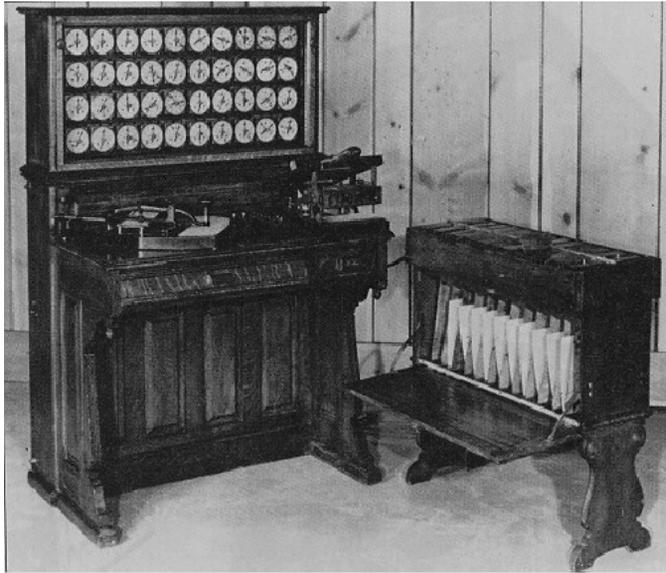
Première machine programmable : XVIII<sup>e</sup> siècle, machine à cartes perforées.

FIGURE 1.5 – Le métier à tisser de Jacquard



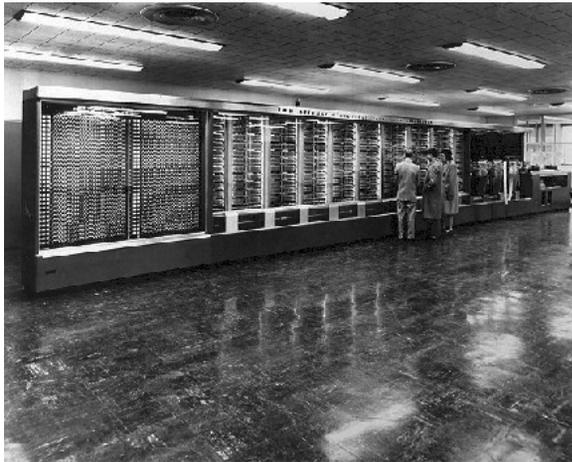
Machine programmable universelle : XVIII<sup>e</sup> siècle, non réalisable avec les technologies de l'époque (machines à vapeur), principe des machines actuelles.

FIGURE 1.6 – La machine à intégrer de Babbage



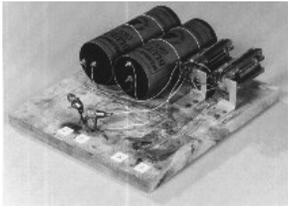
Machine à cartes perforées : 1885, facilite le recensement américain.

FIGURE 1.7 – La machine à calculer de Hollerith

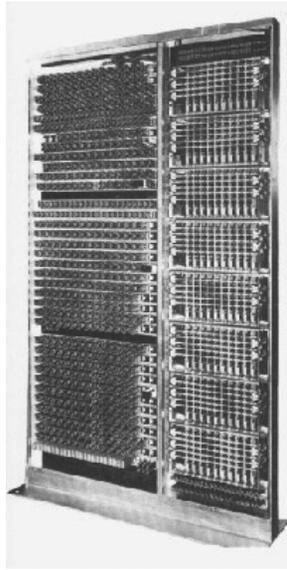


Machine à base de relais électromécaniques, 1936-1939.

FIGURE 1.8 – L'ordinateur d'Aiken

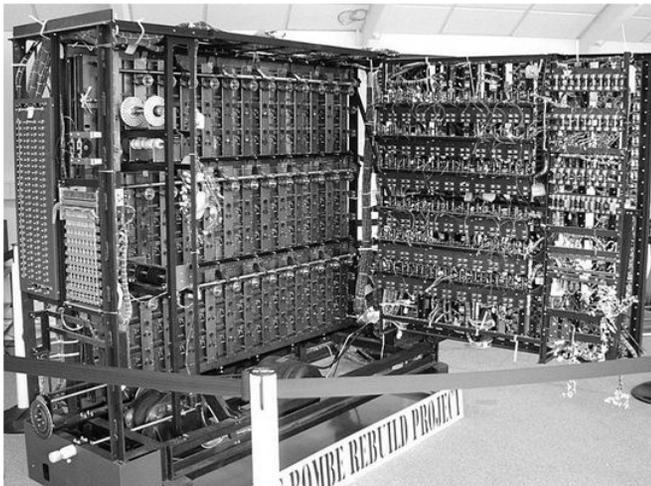


Additionneur binaire



Machine industrielle pour la comptabilité et les statistiques.

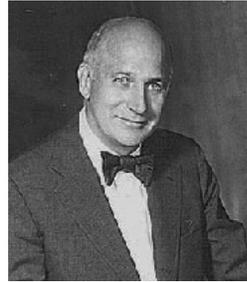
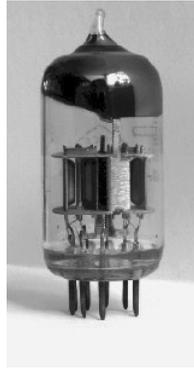
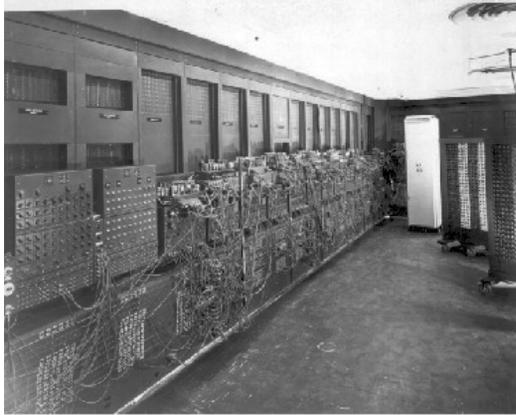
FIGURE 1.9 – L'ordinateur de Stibitz



Machine développée pendant la seconde guerre mondiale pour casser les codes allemands de la machine Enigma (photographie ci-contre). Alan Turing est considéré comme le père de l'informatique moderne et un précurseur dans le domaine de l'intelligence artificielle.

FIGURE 1.10 – La « bombe » de Turing

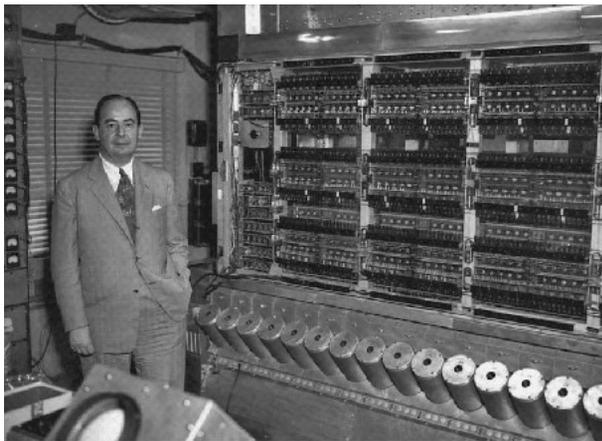
Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer



Première machine à calculer électronique : 1944, 18000 tubes électroniques, machine à programme câblé.

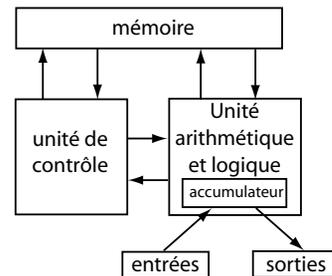
FIGURE 1.11 – L'ENIAC d'Eckert et Mauchly

Electronic Discrete Variable Automatic Computer, 1951.



Ordinateur à tubes comme l'ENIAC, mais utilise le système de numération binaire alors que l'ENIAC opérait en décimal.

Première mise en œuvre de l'architecture de Von Neumann (1946).



Machine à programme enregistré : les instructions sont stockées dans la mémoire du calculateur et non plus câblées : ordinateur.

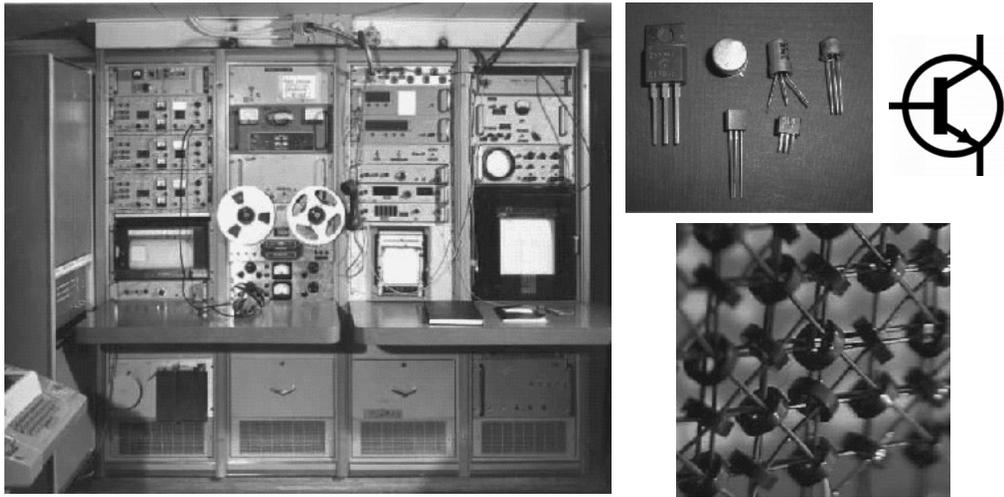
FIGURE 1.12 – L'EDVAC de Von Neumann

## Selective Sequence Electronic Calculator



Premier ordinateur commercialisé : 1948, non entièrement électronique.

FIGURE 1.13 – Le SSEC d'IBM



1963, premier ordinateur à transistors, introduction des mémoires à tores de ferrite, concept de « mini-ordinateur »

FIGURE 1.14 – Le PDP 5 de DEC



1977, utilisation de circuits intégrés.

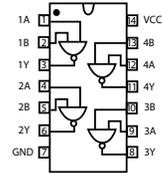
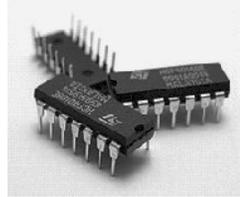
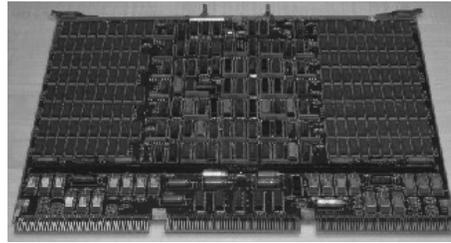


FIGURE 1.15 – Le VAX de DEC

1971, invention du microprocesseur

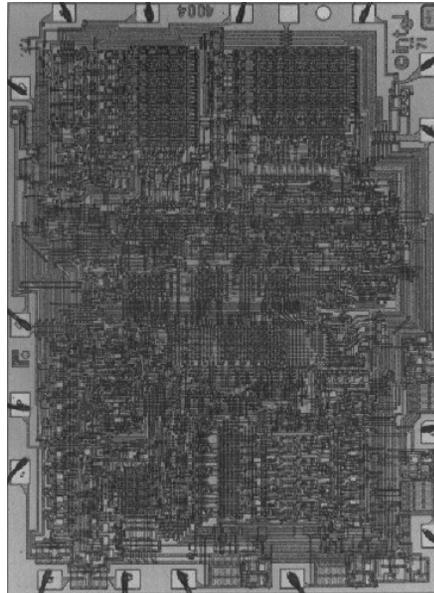
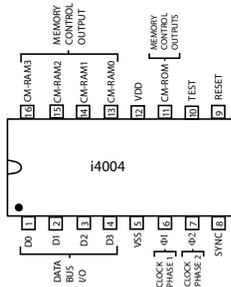
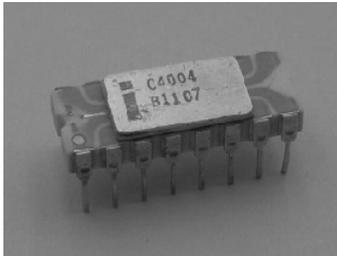
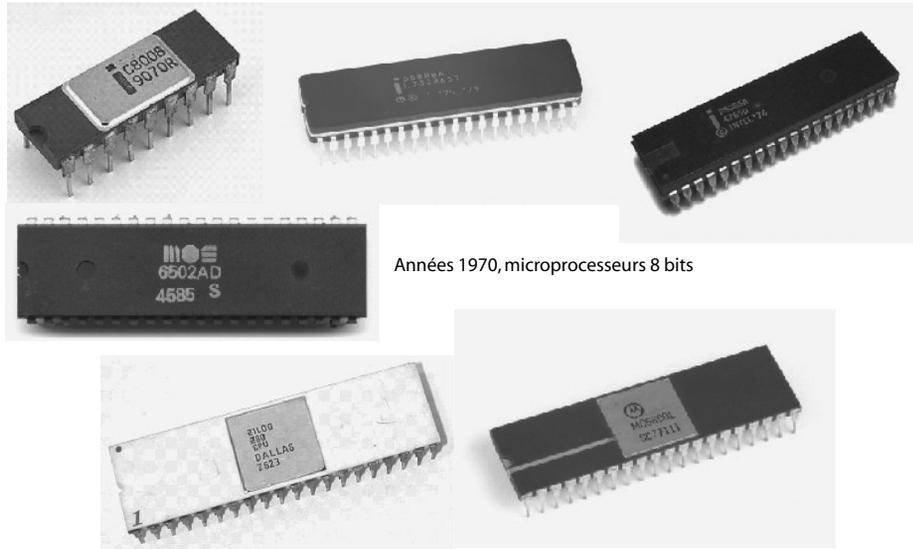


FIGURE 1.16 – Le microprocesseur 4004 d'Intel



Années 1970, microprocesseurs 8 bits

FIGURE 1.17 – Les successeurs du 4004



Construits autour de microprocesseurs 8 bits, années 1980.



FIGURE 1.18 – Les micro-ordinateurs

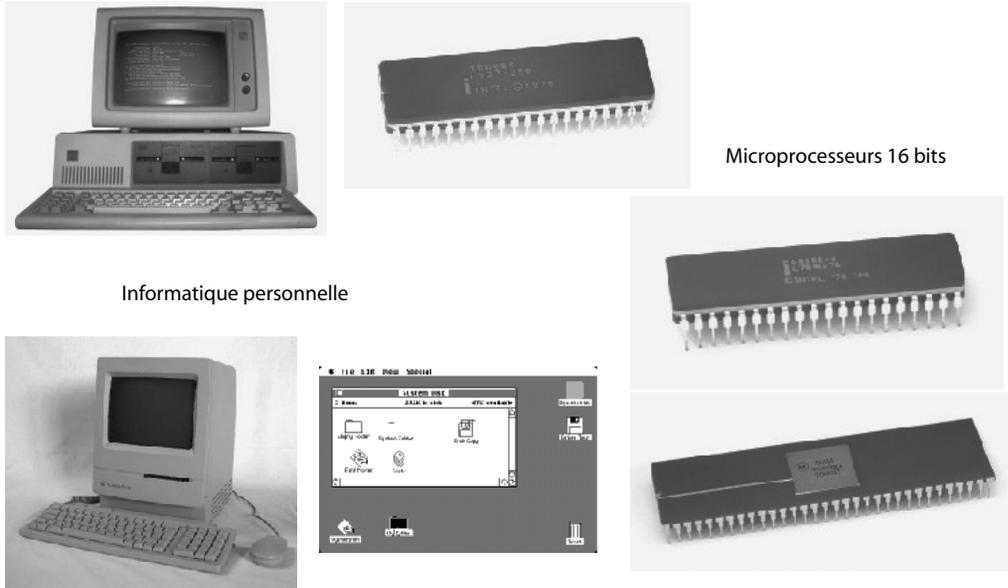


FIGURE 1.19 – L'IBM PC et l'Apple Macintosh



Microprocesseurs 32 et 64 bits.

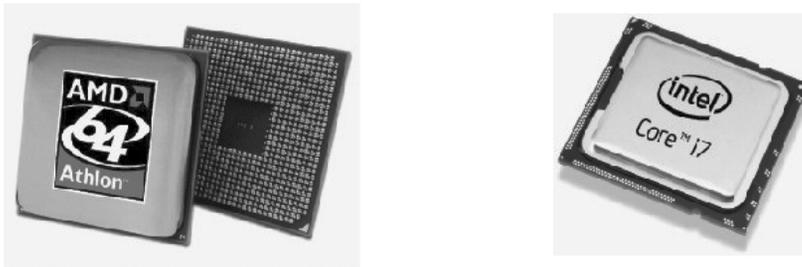


FIGURE 1.20 – Les microprocesseurs « modernes »



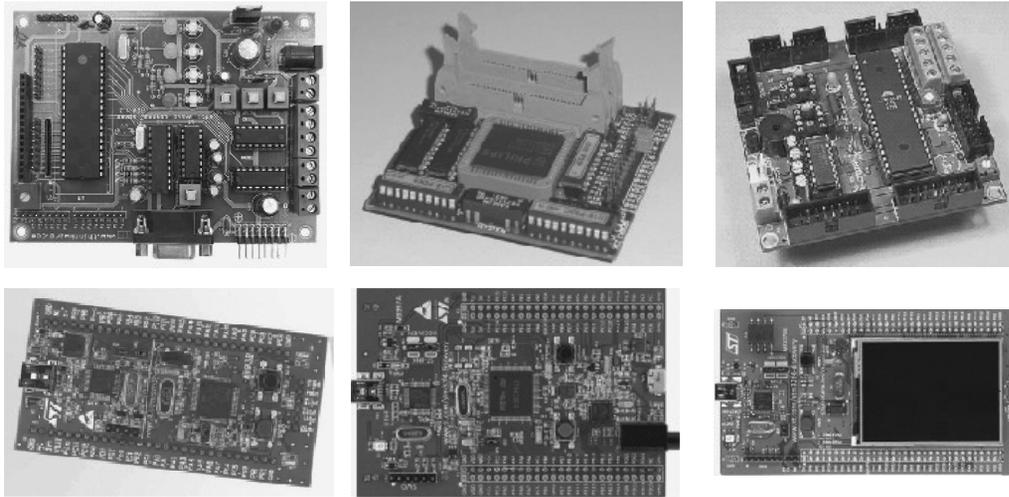
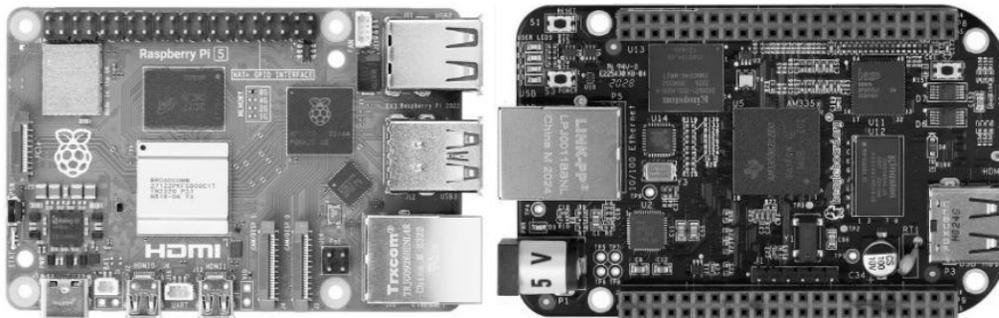


FIGURE 1.23 – Cartes de développement et d'évaluation



Raspberry Pi

BeagleBone



Jetson Nano

FIGURE 1.24 – Nano-ordinateurs au format « carte de crédit »

# Chapitre 2

## Structure et réalisation des calculateurs numériques

### 2.1 Architecture et organisation d'un ordinateur

Un ordinateur est un système constitué d'un ensemble complexe de circuits électroniques numériques permettant d'effectuer une suite de traitements, tels que des opérations arithmétiques et logiques, sur des données binaires. Le séquençement de ces opérations doit pouvoir être imposé arbitrairement à l'aide d'un programme enregistré dans une mémoire, à l'exclusion de toute modification matérielle des circuits.

L'architecture d'un ordinateur [2], [3], [5], [6], [7], [9] représentée sur la figure 2.1, montre que l'élément de base de celui-ci est le processeur, appelé également unité centrale de traitement, (UCT ou CPU, Central Processing Unit).

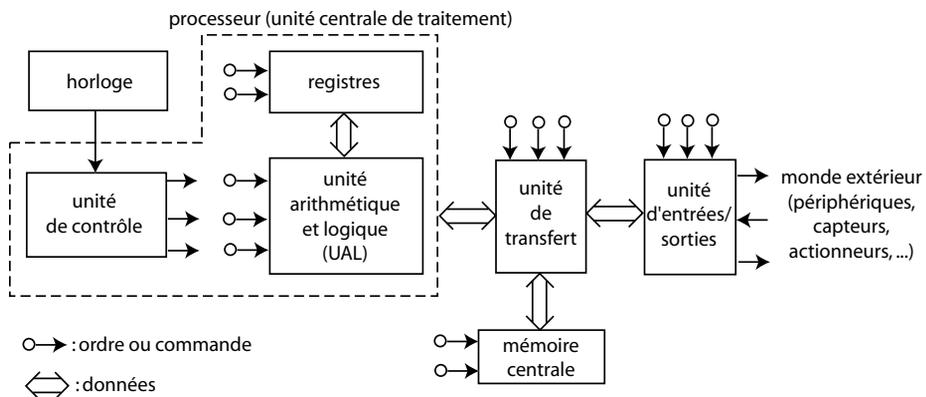


FIGURE 2.1 – Architecture d'un ordinateur

Le processeur est réalisé autour des trois éléments suivants [1], [4], [8] :

- l'unité arithmétique et logique (UAL, ALU : Arithmetic and Logic Unit) qui représente l'organe de calcul du ordinateur ;

- les registres qui sont des zones de stockage pour les données de travail de l'UAL tels que les opérandes ou les résultats intermédiaires ;
- l'unité de contrôle (UC, CU : Control Unit) qui envoie les ordres, sous la forme de signaux de commande, à tous les autres éléments du calculateur afin d'exécuter le programme.

Le support matériel de la circulation des signaux électriques à l'intérieur et à l'extérieur du calculateur est appelé unité de transfert. Il s'agit d'un ensemble de circuits logiques permettant d'aiguiller les différents signaux entre les éléments du calculateur, comme par exemple le transfert de données entre les registres et la mémoire centrale ou l'UAL.

Les échanges de données entre le calculateur et le monde extérieur se font par l'intermédiaire d'une unité d'entrées/sorties contenant les circuits électroniques permettant d'adapter les informations qui se présentent sous forme de signaux analogiques ou numériques en provenance ou à destination, respectivement, de capteurs ou d'actionneurs, ainsi que de tout autre périphérique (interface de communication, interface homme/machine, ...)

Finalement, les échanges d'ordres et de données dans le calculateur sont synchronisés par un circuit d'horloge qui délivre des impulsions, constituant le signal d'horloge, à des intervalles de temps fixes.

## 2.2 Constituants du processeur

### 2.2.1 Registres

Un registre, tel que celui représenté sur la figure 2.2 est un ensemble de bascules mémoires, généralement des bascules D munies un signal d'horloge commun, permettant de mémoriser les états binaires présents sur leurs entrées. L'écriture d'une donnée dans un tel registre consiste à présenter celle-ci sur les entrées puis à appliquer une impulsion sur l'entrée d'horloge du registre. La lecture d'une donnée se fait en reliant, à l'aide d'un circuit de multiplexage, les sorties du registre aux entrées de l'élément qui va utiliser ces données (mémoire, registre ou UAL). Un processeur contient, en général, un nombre plus ou moins important de registres. La sélection d'un registre particulier en vue de sa lecture ou de son écriture se fait à l'aide d'un circuit de décodage.

### 2.2.2 Unité arithmétique et logique

L'unité arithmétique et logique, dont la représentation est donnée par la figure 2.3, est un circuit numérique combinatoire recevant en entrée deux mots binaires  $A$  et  $B$  sur  $n$  bits, appelés opérandes, et fournissant en sortie un mot binaire  $R$ , également sur  $n$  bits, résultat d'une opération effectuée sur les opérandes. La sélection de l'opération se fait en appliquant à une autre entrée, notée  $F$ , un mot binaire sur  $p$  bits permettant de choisir une opération parmi  $2^p$ .

Les opérations généralement effectuées par une UAL sont les fonctions logiques combinatoires élémentaires (ET, OU, NON, ...) ainsi que l'addition et la soustraction sur des nombres entiers signés. Certaines UAL peuvent également effectuer des multiplications et des divisions. En plus du résultat, l'UAL élabore un ensemble de variables booléennes, appelées indicateurs (flags), dont l'état est fonction du résultat obtenu suite à la dernière opération effectuée (résultat positif ou nul, débordement arithmétique, présence d'une retenue, division par zéro, etc.). Ces indicateurs sont mémorisés dans un registre appelé registre d'état du processeur, afin de pouvoir être éventuellement utilisés par l'instruction suivante du programme.

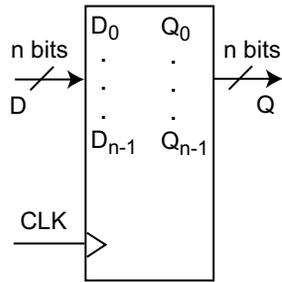


FIGURE 2.2 – Registre de mémorisation

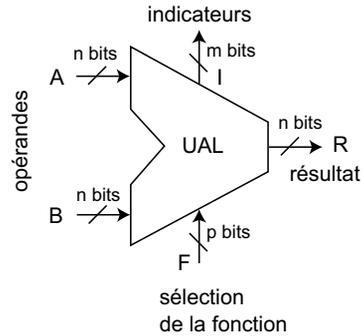


FIGURE 2.3 – Unité arithmétique et logique

### 2.2.3 Unité de contrôle

L'unité de contrôle est un circuit numérique séquentiel, ou séquenceur, pouvant être modélisé par le schéma de la figure 2.4, dont le rôle est d'activer les signaux de commande des différents éléments du calculateur, dans l'ordre nécessaire à l'exécution d'une instruction du programme, celle-ci étant codée sous la forme d'un mot binaire propre à chaque instruction.

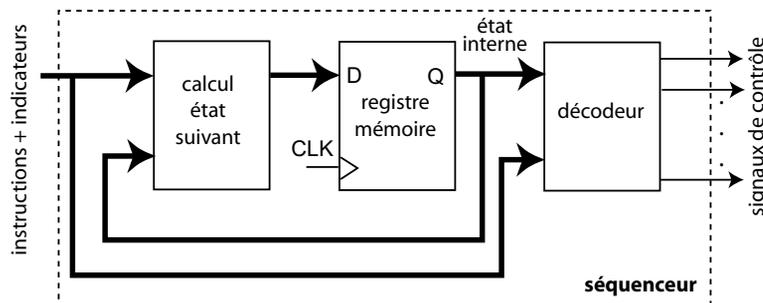


FIGURE 2.4 – Représentation de l'unité de contrôle

Un tel circuit est construit autour d'un registre de mémorisation qui maintient une valeur binaire, représentant l'état interne du séquenceur (à ne pas confondre avec le registre d'état du processeur). Cet état est actualisé à chaque front d'horloge par une fonction combinatoire admettant comme entrées :

- l'état interne actuel ;
- l'état des indicateurs ;
- le code binaire symbolisant l'instruction en cours d'exécution.

Les signaux de contrôle sont élaborés à l'aide d'une fonction combinatoire de décodage, à partir de la valeur actuelle de l'état interne, des indicateurs ainsi que du code binaire représentant l'instruction.

## 2.3 Organisation des registres et de la mémoire

### 2.3.1 Structure des registres

Les registres contenus dans le processeur sont en nombre généralement réduit, ne dépassant pas une vingtaine dans la plupart des cas. Chacun d'entre eux possède un numéro, codé sur un nombre  $m$  de bits, qui permet de l'identifier et de le désigner parmi l'ensemble des  $N = 2^m$  registres, comme le montre la figure 2.5. Un même processeur peut contenir des registres de différentes tailles (8 bits, 16 bits, 32 bits, etc.). Certains registres, dits à usage général, peuvent contenir les opérandes des instructions alors que d'autres ne sont accessibles que par les circuits internes du processeur. Dans certains cas, le processeur doit pouvoir lire simultanément plusieurs registres (deux, le plus souvent), mais ne peut écrire qu'un seul registre à la fois, d'où le schéma fonctionnel représenté sur la figure 2.6, comportant :

- deux entrées sur  $m$  bits pour les numéros des deux registres à lire et/ou écrire ;
- deux sorties sur  $n$  bits présentant les données contenues dans ces deux registres ;
- une entrée sur  $n$  bits pour la donnée à écrire dans l'un des registres sélectionnés ;
- une entrée permettant d'appliquer l'impulsion d'écriture à ce registre.

### 2.3.2 Constitution de la mémoire

La mémoire centrale est constituée d'un nombre relativement élevé de registres de mémorisation, appelés cases mémoires. La différence entre les registres contenus dans le processeur et les cases mémoires se situe essentiellement au niveau de leurs nombres ainsi que de la technologie utilisée lors de la réalisation de ces circuits, ainsi que des temps d'accès aux informations qui y sont stockées.

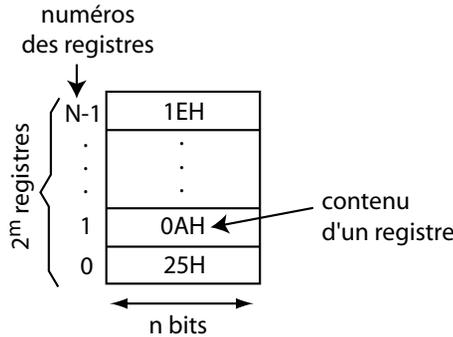


FIGURE 2.5 – Registres du proces-  
sieur

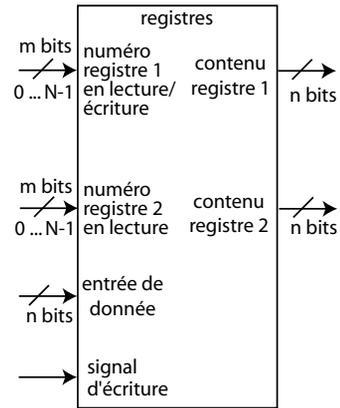


FIGURE 2.6 – Schéma fonction-  
nel des registres

Cette mémoire, organisée selon le schéma de la figure 2.7, contient :

- les instructions du programme sous forme de mots binaires qui seront décodés dans l'unité de contrôle afin d'élaborer les signaux de commande ;
- les données à traiter par le calculateur, également stockées sous forme binaire.

Données et instructions peuvent parfois être stockées dans deux mémoires distinctes.

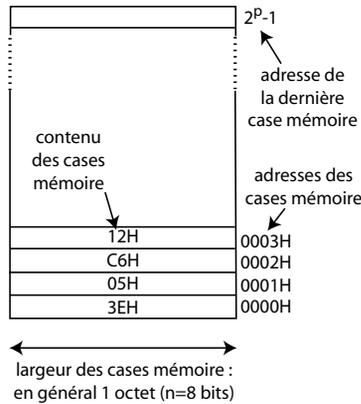


FIGURE 2.7 – Mémoire centrale

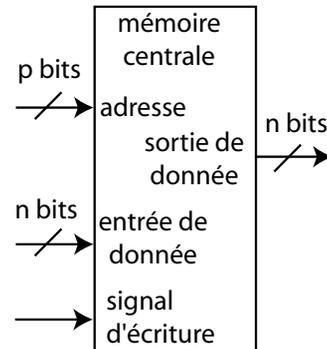


FIGURE 2.8 – Schéma fonctionnel de  
la mémoire

La mémoire peut être vue comme un ensemble de cellules ou cases mémoires, contenant les instructions et les données. Ces informations sont accessibles par mots de  $n$  bits, le plus souvent  $n = 8$ , ce qui constitue l'unité élémentaire d'adressage de la mémoire. Chaque case mémoire est repérée par un numéro d'ordre unique qui représente son adresse. Le nombre de cases mémoire ainsi adressables dépend du nombre de bits utilisés pour coder les adresses. Ainsi, avec  $p$  bits, il

est possible de sélectionner une case mémoire parmi  $2^p$ . La figure 2.8 représente le schéma fonctionnel de la mémoire centrale, comportant :

- une entrées d'adresse sur  $p$  bits où est présentée l'adresse de la case mémoire à lire ou écrire ;
- les entrées/sorties de données sur  $n$  bits où est présentée la donnée à lire ou à écrire dans la case mémoire adressée ;
- le signal d'écriture qui permet de charger dans la case mémoire adressée la donnée présentée sur les entrées de données.

Une case mémoire peut être :

- lue ou écrite par le processeur s'il s'agit d'une mémoire vive ;
- seulement lue dans le cas d'une mémoire morte.

### 2.3.3 Représentation des données en mémoire

La mémoire peut être vue sous la forme d'un tableau dont chaque case contient un octet, comme indiqué sur le schéma de la figure 2.7. Pour le stockage en mémoire de mots sur plusieurs octets, il existe deux types de rangement :

- le format *Little Endian* dans lequel l'octet de poids faible du mot est rangé dans la case mémoire d'adresse la plus basse ;
- le format *Big Endian* dans lequel l'octet de poids faible est rangé dans la case mémoire d'adresse la plus élevée.

La figure 2.9 montre le stockage d'une donnée sur quatre octets selon les deux formats de rangement.

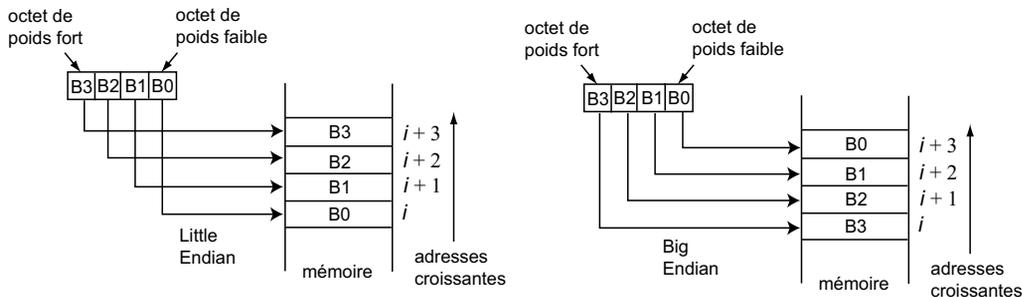


FIGURE 2.9 – Rangement en mémoire de données sur plusieurs octets

## 2.4 Microprocesseurs et microcontrôleurs

### 2.4.1 Implémentations matérielles d'un calculateur

L'implémentation matérielle d'un calculateur peut se faire à l'aide de circuits logiques combinatoires et séquentiels élémentaires [10], toutefois cette méthode

est actuellement obsolète car un ordinateur est généralement construit autour d'un microprocesseur [11], [12], [13], [14] qui regroupe, en un seul circuit intégré, tous les éléments d'un processeur : UAL, registres et unité de contrôle. Si ce circuit intégré inclut, en plus du processeur, la mémoire centrale et des périphériques, il devient alors un microcontrôleur.

### 2.4.2 Applications des microprocesseurs et microcontrôleurs

Les microprocesseurs sont généralement utilisés pour la réalisation d'ordinateurs à usage général tels que les PC de bureau ou les PC portables, les stations de travail, les serveurs réseau, et toute autre application informatique. Par contre, les microcontrôleurs sont plutôt destinés à la réalisation d'applications embarquées à usage domestique ou industriel telles que les appareils électroménagers, les télécommunications, la commande de machines, l'automatisation et la régulation numérique de procédés, les appareils de mesure, et bien d'autres applications.

### 2.4.3 Exemples de microprocesseurs et microcontrôleurs

Les microprocesseurs suivants figurent parmi les plus connus : Intel x86, Motorola 68K, Hitachi SuperH, IBM PowerPC, Sun SPARC, MIPS, ARM. Quant aux microcontrôleurs, on peut citer : Intel 8051, Microchip PIC, Atmel AVR, ST Microelectronics STM8 et STM32. Chacune de ces références désigne en fait toute une famille de microprocesseurs ou de microcontrôleurs, basée sur une architecture commune et comportant des différences au niveau des fonctionnalités qu'ils proposent et qui évoluent au cours du temps, d'une génération à l'autre [40], [41], [43], [44], [45], [46], [47], [48].

L'intégration peut être étendue en incluant dans un même circuit intégré, un microcontrôleur associé à des capteurs, des dispositifs mécaniques, des circuits radio, ou encore des composants optiques afin de former des systèmes sur puce (System on chip, SoC).

## 2.5 Interconnexion des éléments d'un ordinateur

### 2.5.1 Architectures Von Neumann et Harvard

La réalisation matérielle des ordinateurs est généralement basée sur l'architecture de Von Neumann représentée sur la figure 2.10 ou bien l'architecture Harvard apparaissant sur la figure 2.11. La différence entre les deux architectures se traduit principalement par l'existence d'une mémoire unique, pouvant contenir indifféremment le programme et les données dans le cas de la première, alors que la deuxième architecture distingue deux types de mémoires, l'une contenant le programme et l'autre les données. L'architecture de Von Neumann est typique des microprocesseurs, alors que celle de type Harvard est plutôt mise en œuvre dans les microcontrôleurs.

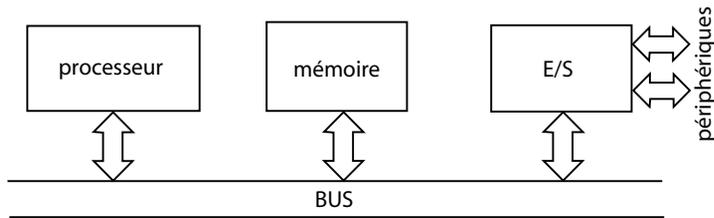


FIGURE 2.10 – Architecture de Von Neumann

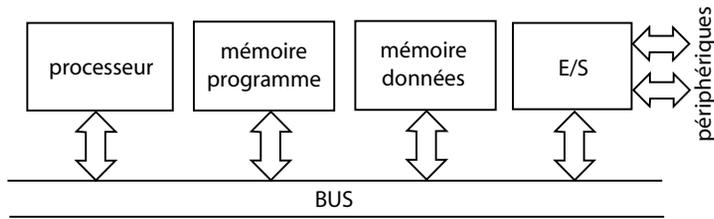


FIGURE 2.11 – Architecture Harvard

Les instructions et les données d'un programme sont enregistrées dans la mémoire centrale selon le schéma de la figure 2.12 dans le cas de l'architecture de Von Neumann. Dans le cas de l'architecture Harvard, les instructions et les données sont rangées dans deux espaces mémoire différents : la mémoire programme et la mémoire données.

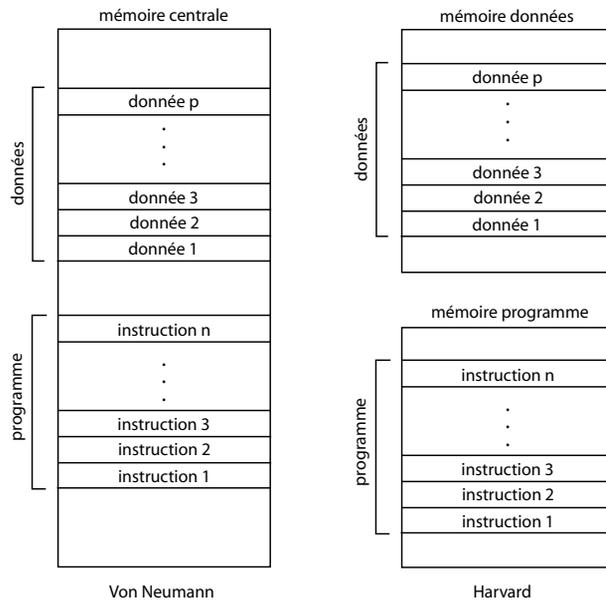


FIGURE 2.12 – Rangement d'un programme en mémoire

Les instructions et les données sont généralement codées sur un nombre variable d'octets. L'adresse d'une instruction ou d'une donnée désigne l'octet de poids faible de celle-ci dans le cas du rangement en mémoire selon le format little endian, l'octet de poids fort dans le cas où c'est le format big endian qui est utilisé.

### 2.5.2 Circulation de l'information dans un ordinateur

Le processeur échange des informations avec la mémoire et l'unité d'entrée/sortie, sous forme de mots binaires, au moyen d'un ensemble de connexions appelé bus. Un bus permet de transférer des données sous forme parallèle, c'est-à-dire en faisant circuler  $n$  bits simultanément.

Les microprocesseurs et les microcontrôleurs peuvent être classés selon la longueur maximale des mots binaires qu'ils peuvent échanger au cours d'une même opération de transfert avec la mémoire et les périphériques. Il existe ainsi des microprocesseurs et des microcontrôleurs 8 bits, 16 bits, 32 bits, etc.

Le bus peut être décomposé en trois bus distincts, selon le schéma de la figure 2.13 :

- le bus d'adresses qui permet au microprocesseur de spécifier l'adresse de la case mémoire ou du périphérique à lire ou à écrire ;
- le bus de données qui sert de support aux transferts entre le microprocesseur et la mémoire ou les E/S ;
- le bus de commande dont le rôle est de transmettre les ordres de lecture et d'écriture de la mémoire et des E/S.

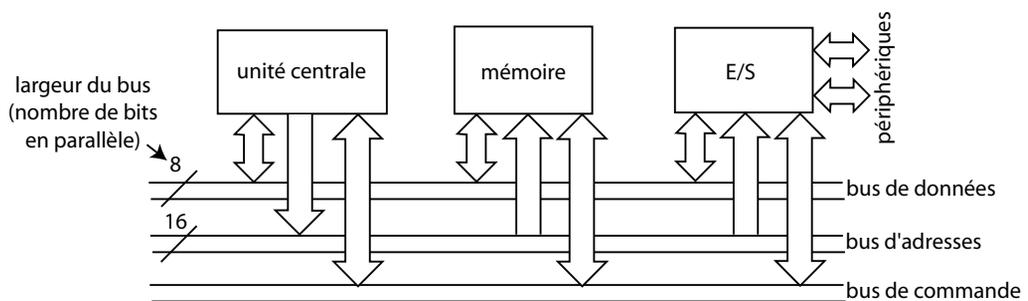


FIGURE 2.13 – Bus d'un ordinateur

Il convient de noter que les bus de données et de commande sont bidirectionnels alors que le bus d'adresse est unidirectionnel car seul le microprocesseur peut délivrer des adresses, bien qu'il existe une dérogation pour certains circuits qui peuvent accéder directement à la mémoire, sans passer par le processeur (DMA : Direct Memory Access).

## 2.6 Aspects matériels et représentation fonctionnelle

Du point de vue matériel, les microprocesseurs et les microcontrôleurs se présentent sous la forme de circuits intégrés à très fort taux d'intégration, munis d'un nombre plus ou moins important de broches, et en divers boîtiers dont certains sont représentés sur la figure 2.14 : Dual In-line Package (DIP), Small-Outline Integrated Circuit (SOIC), Quad Flat Pack (QFP), Pin Grid Array (PGA), Ball Grid Array (BGA), Micro Lead-Frame Package (MLP), etc. Initialement réalisés en technologies NMOS et PMOS avec une finesse de gravure de l'ordre de la dizaine de micromètres, les microprocesseurs et microcontrôleurs sont actuellement réalisés exclusivement en technologie CMOS, avec une finesse pouvant descendre jusqu'à quelques dizaines de nanomètres.

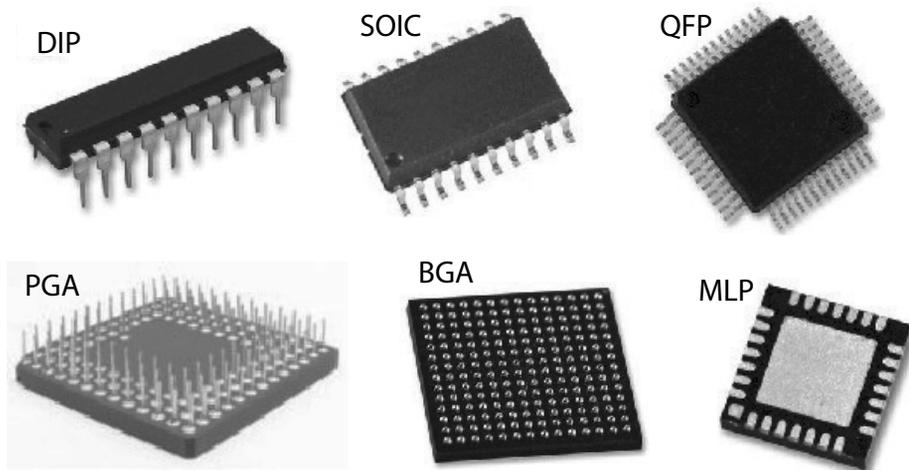


FIGURE 2.14 – Exemples de boîtiers pour les microprocesseurs et microcontrôleurs

On peut représenter un microprocesseur par un schéma fonctionnel tel que celui de la figure 2.15 et un microcontrôleur par le schéma fonctionnel de la figure 2.16. Du fait que les microcontrôleurs intègrent une certaine quantité de mémoire ainsi que des périphériques, il n'ont pas besoin de disposer de bus d'adresses, de données et de commande externes. Par conséquent, un microcontrôleur dispose de lignes d'entrées sorties banalisées, regroupées en un ensemble de ports et pouvant être utilisées comme entrées ou sorties binaires. Toutefois, une ou plusieurs fonctions particulières peuvent être associées à ces lignes qui servent alors d'entrées ou de sorties aux périphériques contenus dans le microcontrôleur. Dans certaines familles de microcontrôleurs, des ports peuvent être utilisés comme bus d'adresses, de données et de commandes externes afin d'étendre la mémoire interne du microcontrôleur ou d'ajouter des périphériques externes.

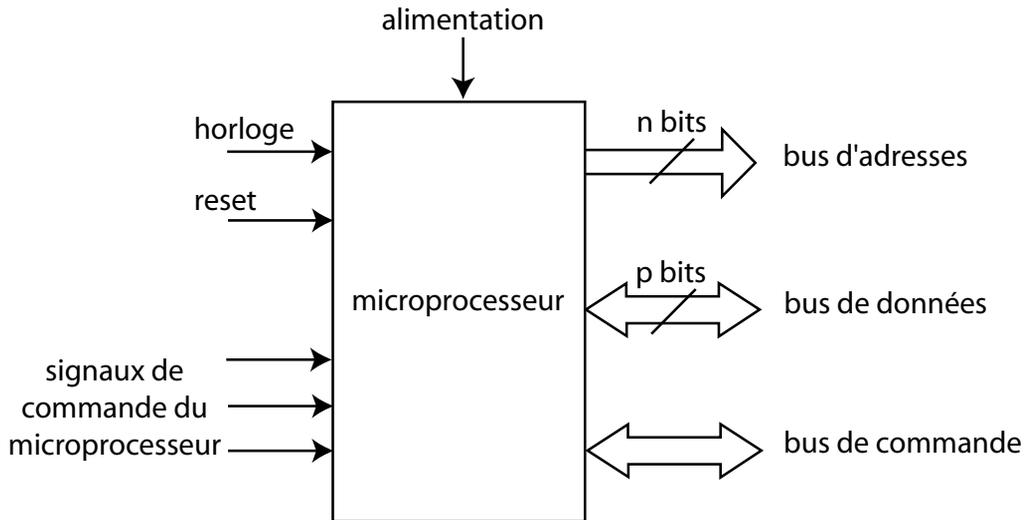


FIGURE 2.15 – Schéma fonctionnel d'un microprocesseur

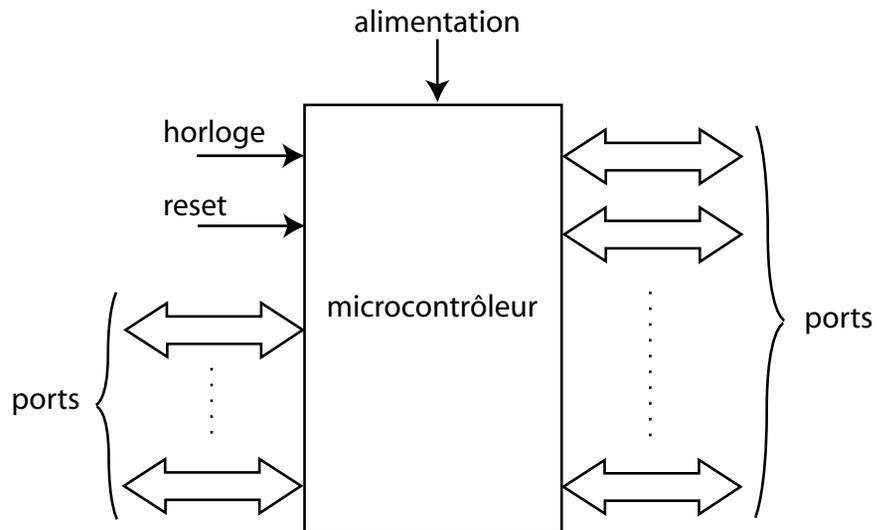


FIGURE 2.16 – Schéma fonctionnel d'un microcontrôleur

## 2.7 Exercices

### 2.7.1

On considère l'UAL dont le schéma fonctionnel est donné sur la figure 2.17. Cette UAL est capable d'effectuer les huit opérations arithmétiques et logiques décrites dans le tableau 2.1. Les opérandes A et B sont des mots de 4 bits et peuvent être considérés comme des nombres non signés ou signés lors de la réalisation des opérations arithmétiques. Dans le cas des opérations sur des nombres signés, les nombres négatifs sont codés en complément à 2.

Le tableau 2.2 décrit le fonctionnement des quatre indicateurs d'état qui sont actualisés après chaque opération effectuée par l'UAL. On rappelle que l'indicateur de retenue n'a de sens que pour les opérations arithmétiques sur des nombres non signés. L'indicateur de débordement est, quant à lui, significatif seulement dans le cas de telles opérations sur des nombres signés, le débordement se manifestant alors par la non égalité entre les deux dernières retenues générées lors du calcul du résultat.

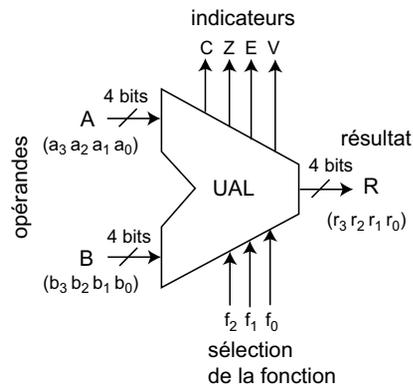


FIGURE 2.17 – Schéma fonctionnel de l'UAL de l'exercice 2.7.1

TABEAU 2.1 – Fonctions réalisées par l'UAL (Ex. 2.7.1)

$F = (f_2 f_1 f_0)_2$	$R = (r_3 r_2 r_1 r_0)_2$
0 0 0	A ET B
0 0 1	A OU B
0 1 0	$\bar{A}$
0 1 1	$A \oplus B$ (OU EXCLUSIF)
1 0 0	A PLUS B
1 0 1	A MOINS B = A PLUS $\bar{B}$ PLUS 1
1 1 0	MOINS A = $\bar{A}$ PLUS 1
1 1 1	A PLUS 1