

Module 1: Introduction à l'architecture des ordinateurs

1 Introduction

Le cours d'architecture des ordinateurs expose les principes de fonctionnement des ordinateurs. Il s'agit donc de comprendre, à bas niveau, l'organisation des ordinateurs.

Nous nous appuierons sur l'étude détaillée de l'architecture du PC, dont nous étudierons le processeur et son langage machine, ses différents types de mémoire (centrale, cache, virtuelle), les fonctions de base de son système d'exploitation (BIOS), et ses mécanismes de communication avec l'extérieur (entrées/sorties).

Nous aborderons aussi la notion du parallélisme et les architectures évoluées, afin d'apprendre à les mettre en oeuvre.

2 Aperçu historique

Dans cette section, nous allons présenter l'histoire des ordinateurs et leurs étapes de conceptions dans le temps¹.

- En 1833: Charles Babbage débute la conception théorique de la **Machine de Babbage** avec quatre (4) opérations arithmétiques de base, puis de la Machine Analytique, 1^{er} modèle de calculateur programmable composé de:
 1. Quatre (4) parties: mémoire, unité de calcul, entrée (lecteur de cartes perforées), sortie (perforation);
 2. Quatre (4) opérations arithmétiques, test et branchement conditionnel;
- En 1840: Ada Augusta invente et écrit les premières itérations successives (algorithme; premiers programmes informatiques non exécutés).
- En 1854: Georges Boole publie l'algèbre booléenne (calcul sur les valeurs booléennes: vrai/faux).

¹Ces informations sont prises du cours <http://www.phmartin.info/cours/ao/>

- En 1890: Hermann Hollerith construit un calculateur de statistiques à cartes perforées, l'utilise pour le recensement américain, et fonde la Tabulating Machines Company qui devient International Business Machines (IBM) en 1924.
- En 1904: John Fleming invente la diode.
- En 1938: conception de la Machine de Turing qui modélise/formalise les principes élémentaires du fonctionnement de toute machine et de toute opération mentale.
- En 1940: invention du circuit imprimé. Un circuit imprimé est une plaque comportant des pistes pour relier les différents composants.
- En 1945 (début): développement du premier calculateur électronique appelé ENIAC. Un calculateur programmable qui nécessite de rebrancher des centaines de câbles pour chaque calcul à cause de la petite taille de sa mémoire interne.

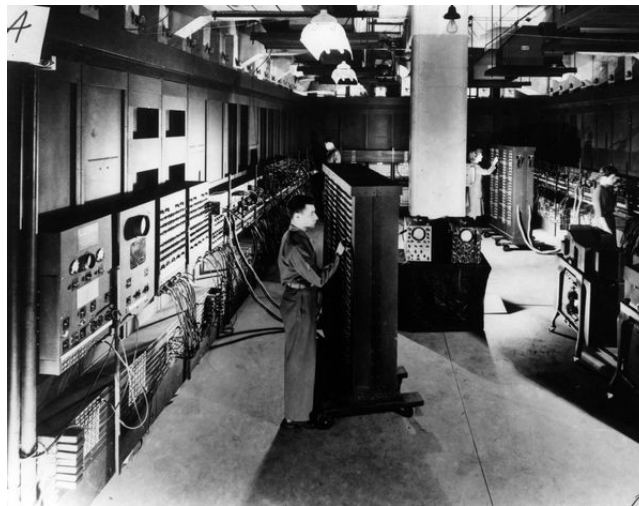


FIGURE 1 – Calculateur ENIAC

- 1945 (fin): développement du premier ordinateur véritable appelé EDVAC qui permet de loger un programme en mémoire.
- 1945 (fin): publication de la machine de Von Neumann: unité arithmétique et logique (UAL), unité de commande, mémoire centrale, unité d'entrée, et unité de sortie.
- En 1947: invention du transistor par Bell Telecom.
- En 1949: développement du premier ordinateur appelé EDSAC suivant l'architecture de Von Neumann.

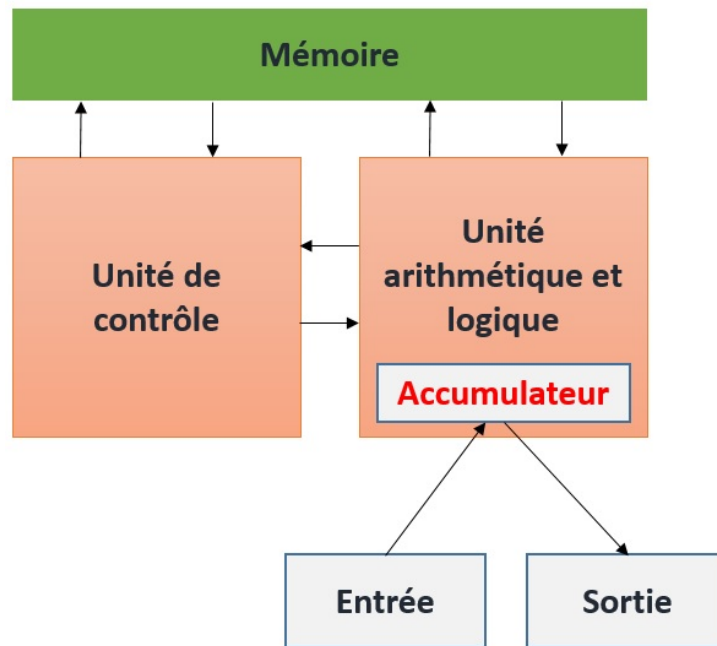


FIGURE 2 – Architecture de Von Neumann

- De 1950 à 1960: développement des ordinateurs de première génération (électrique), basés sur des tubes à vides appelés aussi tubes électroniques. Premières mémoires de masse (mémoires magnétiques, accès séquentiel).
- De 1960 au 1970: développement de la deuxième génération d'ordinateurs (électronique) basés sur des transistors; mini-ordinateurs; disques durs avec accès direct. Cette période a connu également le développement des premiers SGBDs (système de gestion des bases de données); les premiers circuits intégrés; les premiers langages de programmation comme le LISP, Cobol et Fortran en 1960, et le Basic en 1964, et les premiers systèmes d'exploitation multi-utilisateurs: Multics en 1969. En 1965, Gordon Moore remarque que le nombre de transistors intégrables sur une puce de circuit intégré double tous les 18 à 24 mois.
- De 1970 au 1980: développement de la troisième génération d'ordinateurs (micro-électronique), basés sur une puce (c'est à dire un circuit intégré basé un microprocesseur) intégrant des milliers de transistors, c'est la naissance des premiers ordinateurs personnels (PC: Personal Computer). Cette période a connu l'apparition du système d'exploitation Unix en 1972, l'Arpanet (ancêtre d'internet), le premier microprocesseur (4004 d'Intel) en 1971, le microprocesseur Intel 8008 d'Intel avec 8 bits, 200 KHz et 3500 transistors (Figure 3) et l'invention des cartes à puce en 1974 par Roland

Moreno (Figure 4).



FIGURE 3 – Microprocesseur Intel 8008

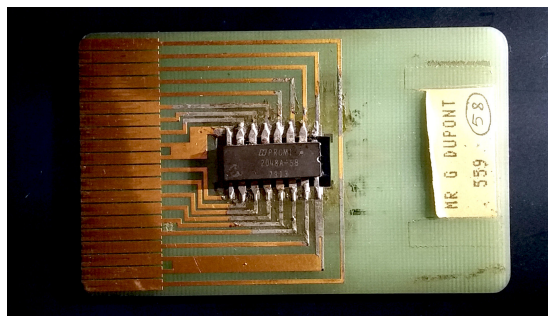


FIGURE 4 – Première carte à puce de Roland Moreno

- De 1980 à 1989: développement de la quatrième génération des ordinateurs (puce intégrant des centaines de milliers de transistors), des ordinateurs personnels avec des périphériques (souris, CD-ROM, etc.), et internet. Les logiciels de Microsoft ont pris le monopole sur la machine la plus vendue. En 1989, Tim Berners-Lee a inventé le WWW qui est un réseau de documents liés par des liens hypertextes.
- De 1990 à présent: cette période a connu beaucoup de développements et d'innovations à savoir:
 1. Apparition du parallélisme (plusieurs microprocesseurs dans le même processeur).
 2. mémoires beaucoup plus puissantes.
 3. Apparition du Linux en 1991 qui a été créé par Linus Torvalds en réécrivant le noyau d'Unix.
 4. En 2004: Google a développé un nouveau paradigme de traitement parallèle des données massives appelé MapReduce. Ce paradigme

permet de manipuler des grands ensembles de données en les distribuant dans un cluster de machines pour être traités.

5. En 2009: Les premières recherches de l'université de Yale au États Unis ont permis de créer un premier processeur quantique composé de 2 qubits. Chaque qubit étant composé d'un milliard d'atomes d'aluminium posés sur un support supraconducteur (source Wikipédia).
6. En 2011: La compagnie D-wave systems annonce son premier ordinateur quantique commercial avec 128 qubits (Voir un exemple du processeur quantique de D-wave dans la figure 5).

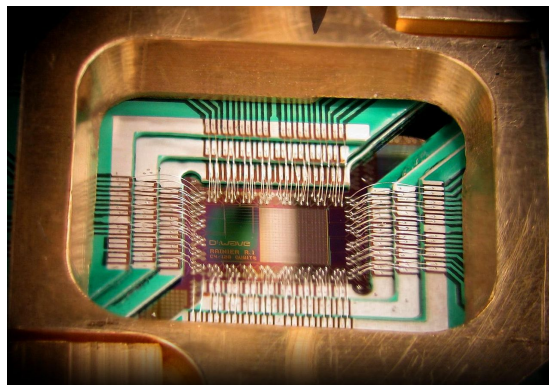


FIGURE 5 – Processeur quantique de D-wave Systems

7. En 2011: apparition de la première version de Hadoop, basée sur le paradigme MapReduce pour le stockage et traitement distribué dans grands ensembles de données (big data). Hadoop est basé sur un système de fichier distribué appelé Hadoop Distributed File System (HDFS) comme le montre la figure 6².
8. En 2015: Google et NASA annoncent un programme de travail commun sur les machines D-Wave.

La puissance des processeur ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre. La **loi de Moore** stipule que la puissance des nouveaux microprocesseurs et la capacité des nouvelles mémoires doublent tous les 18 mois au plus (entre 12 et 18 mois). La figure 7 montre des statistiques sur cette progression (Figure tirée de Wikipédia).

De même pour les processeur quantiques, en 2012, Steve Jurvetson, l'un des investisseurs de D-Wave, énonce en référence aux loi de Moore une hypothèse concernant le développement des ordinateurs quantiques qu'il nomme "**Loi de Rose**", sous la forme :

"La puissance de l'ordinateur quantique (le nombre de qubits disponibles) double tous les ans. À la différence près, et contrairement à la loi de Moore, que

²La figure est tirée de Wikipédia

3 Architectures actuelles

En Janvier 2018, les architectures des ordinateurs ont beaucoup évolué. À titre d'exemple, le processeur Qualcomm 2400 conçu par la compagnie Qualcomm Datacenter Technologies Inc possède 48 cores, 128 Gb de mémoire, et 2.6 GHz (Voir figure 8(a)). Si on regarde le processeur Apple A11 qui a apparu dans l'iPhone 8, il est composé de 6 cores CPU, 3 cors GPU, 4.3 milliards de transistors, et 2.39 GHz de performance (Voir figure 8(b)).

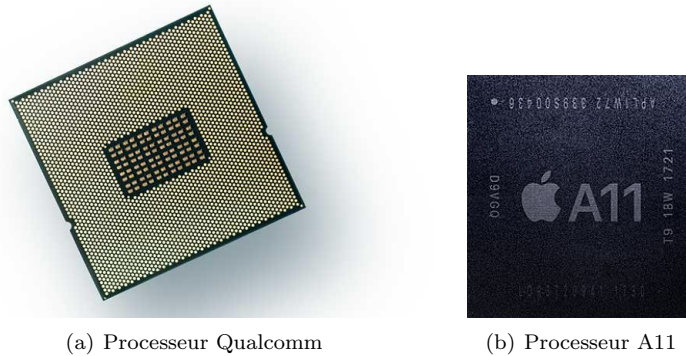


FIGURE 8 – Architectures actuelles de quelques processeurs.

Il existe bien évidemment d'autres exemples d'architectures comme le ARM Cortex-M3, et les supercalculateurs comme le TaihuLight (Chine) qui est basé sur l'architecture du processeur Sunway. TaihuLight est composé de 40 960 processeurs, 10 649 600 cores, une mémoire de 1 310 720 Go, et 1.45 GHz de performance pour le processeur (Voir figure 9).

La fréquence des processeurs a cessé d'augmenter depuis 2004. Les architectures multi-cores connaissent actuellement une expansion faramineuse pour améliorer les performances des ordinateurs par le parallélisme. Les logiciels doivent, dans ce cas, prendre en compte cet aspect du parallélisme afin de maximiser les performances.

Malgré les avancés technologiques que connaît le monde présentement, la loi de Moore est au ralentit et est prédit de prendre fin vers 2021. Par conséquent, le monde s'oriente plus vers des processeurs spécialisés, c'est à dire des processeurs spécifiques à chaque domaine. Par exemple, la révolution de l'intelligence artificielle et l'apparition des réseaux de neurones profonds, les GPUs (voir figure 10) sont devenus l'outil le plus utilisé dans ce domaine.

La compagnie Google a introduit aussi son accélérateur Tensor Processing Unit (TPU) pour le traitement des algorithmes d'intelligence artificielle notamment les réseaux de neurones (voire figure 11).

Les nouvelles tendances de l'architecture des ordinateurs peuvent être résumées dans les points suivants:

- Conception beaucoup plus complexe des processeurs.



FIGURE 9 – Supercalculateur TaihuLight en Chine.



FIGURE 10 – NVIDIA Quadro P5000 GPU.

- Parallélisme au niveau des puces.
- Conception consciente de la consommation d'énergie.
- Conception spécialisée. Des processeurs spécifiques à chaque domaine.
- Architecture libre comme le RISC-V.



FIGURE 11 – Google TPU.

Conclusion

Pour résumer ce module d'introduction, l'architecture des ordinateurs est une composante fondamentale de tout système informatique. À la base de cette architecture, on définit les autres composantes logicielles à savoir les systèmes d'exploitation, les langages de programmation, les compilateurs, et ainsi de suite. Les objectifs de l'architecture des ordinateurs sont multiples. On peut citer par exemple: 1) améliorer les performances, 2) réduire les coûts, et 3) basse consommation énergétique.