

# Introduction à l'architecture des ordinateurs

et considérations diverses

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

"C'est une machine à traiter de l'information". Quand on a dit cela on a tout et rien dit. C'est quoi l'information ? C'est quoi traiter ? Comment ça marche tout ce machin ? Et surtout que peut on comprendre pour être sinon plus efficace, du moins, moins perdu dans la jungle des sigles, des effets marketing, etc.

## Naissance du besoin de calcul

Commençons par le début.

Au tout début l'homme des cavernes a découvert qu'en découpant sa tarte aux pommes en 8 parts, quand il en prenait 1, il en restait 7. Le calcul était né. On a eu alors très vite le besoin de manipuler les nombres avec des opérations de base qui sont :

- l'addition (+)
- la soustraction (-)
- la multiplication (\*)
- et la division \*

\*) Cette dernière opération est pénible car elle donne 2 valeurs : le résultat et le reste. Il faut donc les différencier : on parle alors de division (/) quand on veut le résultat et de modulo (mod) quand on veut le reste.

Au début on travaille sur 2 nombres :  $\text{nombre}_1 \text{ opération } \text{nombre}_2 \Rightarrow \text{résultat}$  puis on cumule les opérations et les nombres :  $N1 \text{ op}1 N2 \text{ op}2 N3 \text{ op}3 N4 \dots \text{op}n-1 Nn \Rightarrow \text{résultat}$ . On s'aperçoit bien vite que l'on peut ramener le cumul à 1 opération de 2 termes, le résultat partiel étant alors le terme suivant des opérations suivantes. Les élèves apprennent cela très tôt.

Le calcul a servi abondamment dans le commerce et l'expansion des sociétés.

On saute quelques générations et on arrive au siècle des Lumières. Un monsieur très bien, Pascal, quand il ne faisait pas de pari, se posait de vraies questions. Les calculs étaient faits à la main par des personnes. Pouvait-on construire une machine pour les faire à la place de l'homme ? Un peu auparavant un anglais, Oughtred, grâce à l'utilisation des logarithmes inventait la règle à calcul. Si on regarde comment fonctionne une règle à calcul on s'aperçoit que la multiplication est remplacée par une conversion logarithmique, un déplacement = une addition, suivi d'une conversion inverse. On peut alors se dire que si on construit une machine qui fait des additions et des soustractions il ne restera plus qu'à faire des conversions logarithmiques pour avoir les 4 opérations de base. C'était très mode dans les salons de l'époque d'avoir un automate il y avait donc plein d'artisans qui étaient capable de fabriquer de la mécanique pour automate. Pascal entrepris alors la construction d'une machine à calculer qui s'est appelée la Pascaline (1642). Elle faisait peu d'opérations était d'une lenteur due à la limitation de la mécanique, mais c'était un excellent démonstrateur d'automate de calcul.

La suite c'est la révolution française. Comme on fait la révolution on change tout, et en particulier on revoie les mesures. On adopte le système métrique, normalisé plus tard en MKSA : Mètre, Kilo, seconde, Ampère. La nécessité de revoir tous les calculs pour passer des anciennes unités aux nouvelles fait qu'il y aura en France un besoin de personnes pour les faire. De plus en 1792 on décida de publier des tables de logarithmes et de trigonométries avec une précision de douze chiffres, ce qui était énorme pour l'époque. G. de Laponne qui était en charge de ce projet confia l'exécution des calculs à quelques centaines de personnes avec un groupe de mathématiciens sous la direction de Legendre. On voit ici une relation étroite entre calcul et mathématique ou les mathématiciens construisent le cadre de travail (les formules) et les calculs sont fait par d'autres personnes

On passe 2 siècles et en Angleterre. Une grande activité industrielle commence à voir jour, en particulier le métier à tisser de Jacquard, capable de faire différents points au moyen de configurations modifiables par cartes perforées. On est toujours dans la mécanique : poulies, engrenages, cames, etc. mais dans ce cas on ajoute un degré supplémentaire qui est une forme de programmation pour tisser des points différents. Le mathématicien Babbage avec les moyens et l'aide de la comtesse Ada<sup>1</sup> Lovelace construisirent une machine à calculer plus performante que la Pascaline (1833). Ada Lovelace définie la notion très importante de décomposition d'un problème en partie plus simple et itérative. Faire plusieurs fois, on dit itérer, la même opération pour arriver à un résultat est appelé par elle algorithmique, en référence au mathématicien Perse Al-Kuwarizmi (825).

Ces expériences ont apportées la démonstration de la faisabilité et de l'utilité des calculateurs. Mais ils étaient limités par la taille, le poids et la complexité mécanique à mettre en œuvre, et qui dit mécanique dit usure et donc fragilité et puis aussi la précision mécanique qui était loin d'être parfaite.

Entre le 19<sup>em</sup> siècle et 1914 un énorme besoin de calculs apparaît du aux différentes techniques développées : astronomie, navigation (calcul des positions), fourniture électrique, téléphone, etc.

On arrive à la "grande guerre" de 14-18. La stratégie militaire de cette période a été en gros une stratégie de position ou chaque camp avait l'ordre de conserver sa position et d'essayer de prendre celle de l'ennemie. Afin "d'enlever" la position de l'ennemie on utilisait un intense bombardement de l'artillerie. C'est à ce moment que des moyens d'observation nouveaux : ballon captif, avion, etc. furent utilisé pour savoir où était caché l'adversaire. Sachant où se trouvait la batterie et où se trouvait la position l'ennemie on pouvait alors déterminer l'angle du canon afin de détruire le maximum d'adversaires (d'ou les tranchés, afin de se protéger de l'artillerie).

Or le calcul de balistique du trajet de l'obus est un calcul de parabole qui est une courbe du second degré. Il fallu donc faire d'innombrables calculs en fonction de la distance (angle), de la température de l'air , etc. Ces calculs furent compilé dans des ouvrages destinés aux artilleurs afin qu'ils aient à pointer leurs canons dans la direction voulue et ajuster l'angle de tir en fonction des effets voulu.

Par exemple le calcul d'une table de tir demandait entre 250 000 et 500 000 opérations.

Ces calculs furent fait au départ par des hommes qui avaient une culture scientifique. Mais comme cette guerre "consommait" de plus en plus d'homme au front et qu'il fallait bien faire ces calculs, les Anglais urent les 1<sup>er</sup> l'idée de faire les calculs par les femmes qui avaient une instruction suffisante. C'est ainsi que l'on eut à la fin de la guerre, des centres remplis de femmes qui faisaient à longueur de journée des calculs de balistique pour l'artillerie.

On voit assez bien que l'idée d'utiliser une machine à calculer aurait hautement intéressé l'état major mais malheureusement en ces années là, les calculateurs mécaniques n'étaient pas assez performants pour faire ce travail.

On passe au milieu des années 1920 où l'industrie des communications, démarrée pendant la guerre pour transmettre les positions ennemies, est en plein essor. Les tubes à vides : Diode , triode, etc. permettaient à cette industrie de développer le domaine de l'électronique.

On saute à la 2<sup>em</sup> guerre mondiale. L'expérience de la précédente guerre fit que la stratégie à ce moment est une stratégie de mouvements. On essaye de surprendre l'ennemie là où il ne s'attend pas à avoir une opposition. On utilise aussi la population comme arme. On se retrouve avec des tactiques de guerrilla où un combattant par sa présence empêche une armée d'avancer par ses actions de commando. Les russes avec leurs "snipper" firent des ravages moraux dans l'armée

---

<sup>1</sup> Jean Ichbiah rendra hommage à cette mathématicienne en nommant "Ada" son langage de programmation

allemande. Mais les japonais avec leurs combattants fanatisés étaient tout aussi dangereux. Le gouvernement Américain mis en place le projet Manhattan avec l'idée que si une invention devait être faite elle le serait. Et comme les services secrets avaient eues des informations sur la construction par l'Allemagne d'une bombe atomique, il fallait que l'Amérique est elle aussi cette bombe.

En 1923 la "Moore School of Electrical Engineering" était créée pour répondre au besoin d'ingénieurs électriciens qu'avait l'industrie électrique et téléphonique. En 1929 à la suite de la crise et dans le cadre du "new deal" le "Ballistic Research Laboratory" de l'armée demande à l'école la construction d'une machine à calculer analogique.

Il existait des prototypes de calculateurs numériques, en 1937 Howard Aiken d'Harvard élaborait une machine à calculer de type Hollerith. C'était un calculateur de type Babbage avec des cartes perforées électromécanique. On utilisait alors ce que l'on savait faire pour le téléphone.

Les problèmes posés pour le projet Manhattan faisaient que le nombre de calculs devenait impossible à résoudre par une équipe humaine, il fallait absolument une machine. Or on ne pouvait pas attendre une amélioration sensible de la vitesse avec une machine électromécanique.

## **Le 1<sup>er</sup> ordinateur**

En 1941 l'état d'urgence national illimité entraîne l'industrie dans l'effort de guerre. John Mauchly de la Moore School avait jeté les bases d'un calculateur électronique. Pour calculer une trajectoire il fallait 15 minutes pour une machine électromécanique. Pour Mauchly son calculateur électronique devait le faire en 100 secondes. En 1943 la machine de Mauchly était construite et s'appela ENIAC. Pour construire l'ENIAC un mathématicien John von Neumann s'est intéressé à son architecture. Il a défini la structure de l'ENIAC : un circuit de calcul que l'on appelle maintenant l'ALU (Arithmetic Logic Unit), des registres, de la mémoire (qui déjà à cette époque posait d'énormes problèmes) et des entrées sorties.

De l'autre côté de l'atlantique Les anglais pour garder leur suprématie en mer devait craquer le code secret de l'amirauté de la Kriegsmarine Allemande. Un mathématicien Alan Turing qui a déjà été confronté aux problèmes soulevés par les calculateurs se charge de décoder au moyen d'une machine, "Colossus", les messages. Il lui faut travailler sur les codes secrets que les Polonais avaient déjà bien entamés, mais aussi sur le moyen de les décoder. Pour cela il conçoit abstraitement un moyen pour une machine d'exécuter les opérations nécessaires. C'est le programme.

Les 2 mathématiciens von Neumann et Turing qui s'étaient rencontrés à Princeton en 1937 et qui ont continués à correspondre ont conçu l'informatique numérique. Il est amusant de savoir que les idées d'architecture de von Neumann et de programme de Turing sont les mêmes que celles que l'on utilise aujourd'hui dans nos ordinateurs de tous les jours. Seule la technologie et donc la taille à changée, l'idée est la même.

Par la suite et devant le succès de l'ENIAC de nombreuses sociétés conçoivent et vendent des "calculateurs" ce que nous appelons ordinateurs maintenant. Au départ elles n'utilisent pas toutes l'électronique partout certaines conservent des parties électromécaniques. En particulier la mémoire qui a donné lieu à tout un assortiment de solutions, souvent très complexes et fragiles.

## **Evolution des ordinateurs**

Le monde de la finance comprend très vite l'utilité des ordinateurs afin de faire de la gestion. Il est tout naturel de trouver une société comme IBM (International Business Machine) devenir un colosse et s'emparer à terme du marché de l'ordinateur dans le milieu de la gestion.

L'armée a eu des besoins de plus en plus importants en calcul soit pour des installations fixes, programme SAGES de radar contre la menace de missiles atomiques russes pendant la guerre froide, soit embarqués pour ses propres missiles. Il fallait donc avoir un calculateur électronique petit. En 1947 au "Bell Labs" Bardeen et Shockley concurent le premier transistor comme un remplacement aux triodes, les fameux tubes électroniques du début..

En 1959 Noyce de chez Fairchild semiconductor démontre comment faire un circuit contenant plusieurs transistors : le circuit intégré.

Ce composant a toutes les bonnes propriétés. Il est fait en silicium composant très courant, le sable est de l'oxyde de silicium. Il est tout petit. Il chauffe peu car il consomme peu. Il est très rapide. Il semble donc évident que l'industrie s'est très vite emparée de ce composant afin d'en faire des circuits de plus en plus sophistiqués.

Le summum de l'intégration a été atteint dans le programme Apollo d'alunissage.

On voit donc en résumant grossièrement que l'ordinateur tel qu'on le connaît, nous vient de la bombe atomique et de l'homme sur la lune. Deux programmes qui n'ont eu par ailleurs aucunes retombées, sans mauvais jeu de mot, et c'est heureux pour la bombe. Soyons désolé pour Hiroshima et Nagasaki en espérant que cela s'arrête là!!! Ces deux programmes ont englouti des sommes pharamineuses et n'ont rien donnés en eux mêmes. Ils ont par contre entraîné le développement de nombreux perfectionnement dans plein de domaines technologiques et surtout donné naissance à la micro-informatique telle que nous l'avons aujourd'hui.

## Usage de l'informatique

Essayons de classer les domaines d'utilisation de l'informatique.

- 1) financier / gestion / assurance
- 2) l'automate:
  - contrôle: de l'ascenseur à la chaîne de montage
  - communication : médias
  - le temps réel : du missile au pilotage automatique
- 3) les jeux et les simulations

(1) Il est intéressant de noter que cela a débuté très tôt, juste après l'ENIAC. Les gestionnaires ont compris très vite l'augmentation de performance amenée par l'ordinateur dans les opérations de gestions grâce à l'utilisation de la base de données.

(2) L'automatisme à pris un essor considérable des que l'on a été capable avec la miniaturisation de placer n'importe où des automates de contrôle. Il n'existe plus un seul appareil un peu sophistiqué qui n'ait pas son micro-contrôleur intégré. Car en plus on s'aperçoit que le monde est plus précis quand on digitalise ses phénomènes. Ex. Il n'existe plus de caméscopes analogiques (qui utilisaient déjà un micro-contrôleur). Maintenant tout est digitalisé numérisé et donc traité par un ordinateur. Il est très petit, très spécialisé, mais c'est néanmoins un ordinateur. De plus les progrès dans l'évolution de la puissance de calcul permettent maintenant de traiter à la fois le contrôle demandé et l'aspect coût. On voit très bien ce phénomène se faire avec les téléphones portables ou on assure à la fois la communication entre les personnes qui se rapporte au (2) et la facturation des appels qui fait partie du (1).

(3) Grâce à la diffusion de masse on assiste à une éclosion des jeux vidéo et l'augmentation de la puissance de calcul permet de simuler des phénomènes qu'il était impossible de prévoir il y a quelques temps.

## Regard sur l'ordinateur actuel

Que va devenir l'informatique et quelles sont ses limites.

Pour l'instant il existait une "loi" dite "loi de Moore", un des patrons d'Intel, disant que la puissance de l'ordinateur doublait tous les 1,5 ans. C'est bien évidemment un raccourci marketing, mais cela donne une idée du dynamisme de la profession. En fait on dit dans cette "loi" que l'électronique évolue très vite. Les électroniciens oublient, juste au passage, les programmeurs qui eux ne font pas du tout évoluer les programmes à la même vitesse, et il s'en faut de beaucoup. En réalité l'ordinateur est un monstre de déséquilibre que l'on a pu faire fonctionner et évoluer jusqu'à présent par des astuces souvent venant des électroniciens, mais qui se trouve à un tournant de son parcours.

Il y a en fait 2 professions majeures qui gravitent autour de l'ordinateur. L'électronicien et l'informaticien. Oublions ici volontairement tout l'aspect connexe autour du commerce informatique pour ne voir que l'aspect technique.

Du point de vue de l'électronicien, l'ordinateur est un appareil qui contient un micro processeur avec de la mémoire de travail, ce que l'on appelle la mémoire "vive", et une mémoire de stockage que l'on appelle un disque "dur". Plus, bien sûr, les organes d'entrées sorties tel que le clavier, la souris, l'écran ou la connexion internet. Il se trouve que pour des raisons historico-commerciales les électroniciens se sont focalisés sur le micro-processeur. En 20 ans il l'on fait fonctionner 4000 fois plus vite et lui ont accru sa puissance de calcul dans à peu près le même rapport. Dans le même temps la mémoire vive a augmentée sa vitesse d'environ 4 fois et sa taille de 1000. Or afin d'avoir les performances les plus hautes, il faut que sa vitesse soit du même ordre que celui du microprocesseur. Ce qui n'est absolument pas le cas aujourd'hui. Le rapport de vitesse entre le micro et la mémoire est d'environ 250. C.a.d. que pour 1 accès à la mémoire le micro peut faire 250 opérations. Ce déséquilibre n'est rien en regard de ce qu'il est pour l'accès à la mémoire de masse. Le disque dur est basé sur un fonctionnement mécanique, or la mécanique n'a absolument pas les mêmes performances que l'électronique. Pour 1 accès au disque dur qui se fait en environ 10ms, le micro lui a fait 40 millions d'instructions. On est devant une disparité des performances des composantes de l'ordinateur qui sont considérables. Pour remédier à cela les électroniciens essaient d'intégrer de plus en plus la mémoire vive dans le micro. Mais malheureusement en électronique plus on va vite plus ça chauffe. Et on arrive au paradoxe ou on peut aller très vite avec une intégration impressionnante mais ça chauffe tellement que l'ordinateur "crame". Il faut donc découper en plusieurs circuits pour refroidir et avoir des disparités de vitesse. Par contre la tendance est toujours d'intégrer sur une même surface d'environ  $1\text{cm}^2$  le plus de transistors possibles.

On a donc 2 marchés : celui des ordinateurs avec des micro-processeurs et celui du contrôle à base de micro-contrôleurs.

Dans le marché des ordinateurs on favorise la performance brute des micro-processeurs.

Dans celui du contrôle ce qui compte c'est plus les possibilités des micro-contrôleurs qui sont des microprocesseurs avec en plus de la mémoire et des entrées sorties le tout intégré sur une même puce. On privilégie une intégration "harmonieuse" où les écarts de vitesses sont faibles ou la vitesse du cœur est elle aussi faible (il faut relativiser tout de même), et où la dissipation de chaleur est maîtrisée. On voit sortir des micro-contrôleurs qui ont des performances et des possibilités qui font rêver. On peut presque faire un ordinateur de type PC avec 1 circuit.

Il semble évident que le marché du micro-contrôleur va augmenter. Le besoin d'appareils à domaine d'utilisation déterminé ne fait que s'accroître.

Dans le même temps les informaticiens écrivent des programmes. Mais quels programmes écrivent-ils ?

Il faut un système pour gérer les échanges dans un ordinateur avec des composants aussi dissemblables. On peut faire une analogie en disant qu'on a un anneau de course sur lequel on fait tourner une formule 1 (le micro), une moto 125 (la mémoire), et un coureur à pied (le disque dur) et tout ce petit monde doit se passer le témoin. Il est évident qu'il faut un régulateur. Ce régulateur s'appelle le système. Or actuellement grossièrement il existe 2 systèmes : Windows de Microsoft qui ne fonctionne que sur PC, et Unix qui tourne sur tous les ordinateurs sous différentes versions. Il existe d'autres systèmes qui ont des usages plus précis tel que les systèmes temps réel, ils doivent répondre en un temps limité à une action extérieure, etc.

Sur ces systèmes on ajoute des programmes pour les utilisateurs style bureautique, base de données, jeux, etc.

Quand on a écrit une base de données l'effort de conception et d'écriture est tellement grand que soit on l'écrit pour un système et un type de machine donné et on prie très fort que ce système et cet

ordinateur ne disparaisse pas. Soit on fait un effort supplémentaire et on écrit une application qui soit portable pour tous les systèmes et tous les ordinateurs utilisés. Bien sur on parle de systèmes et ordinateurs utilisés par des millions de personnes.

On est évidemment devant une activité éminemment conservatrice. Le programmeur a passé tellement de temps à écrire son programme, système ou logiciel, qu'il ne veut pas être obligé de le réécrire à cause d'un changement électronique.

On résout le problème apparemment insoluble du besoin des électroniciens de renouvellement constant et du "conservatisme" des informaticiens par une "gamme" d'ordinateurs ou une "norme". Tous les PC pourront faire tourner tel système et tel logiciel. Tous les Mac accepteront tel programme, etc.

C'est bien évidemment une vue de l'esprit car les éditeurs de systèmes/logiciels veulent aussi profiter de la manne que représente le marché de l'informatique, et ils proposent tous de nouveaux programmes.

De plus tous les micro-contrôleurs qui sont utilisés dans tous les appareils que l'on connaît nécessitent l'écriture de programme. On voit donc que la tâche des informaticiens n'est pas près de s'arrêter.

## **Le petit Nostradamus de l'ordinateur**

Essayons de prédire ce qui va se passer.

A force de faire travailler le microprocesseur de plus en plus vite on constate un blocage dû au "mur de la chaleur". De plus les disparités de vitesse font qu'il est de plus en plus difficile de faire un système "simple". Il paraît maintenant évident que la recherche de la plus grande vitesse possible pour le microprocesseur est en pause. Il semble que les recherches sur la mémoire soient intensives mais on ne voit pas apparaître de solutions claires et proches.

Il semble par contre que les grands groupes de téléphonie mobile soient capables de proposer des solutions d'ordinateur style PDA. Le seul obstacle actuel se situe dans l'interface. Le clavier est trop grand pour être rangé dans une poche de veste ainsi que l'écran. Pour le remplacement du clavier, la reconnaissance vocale pourrait s'y substituer. Elle a encore quelque progrès à faire mais certaines solutions paraissent proches de l'optimal. Le gros problème c'est l'affichage. Tant qu'un génie ne nous montrera pas comment on doit techniquement faire on restera limité. Peut-être une solution de borne à disposition gratuite où les utilisateurs viennent brancher leur PDA quand ils ont besoin d'un grand affichage. Où bien l'écran personnel chez eux, comme actuellement, style connexion sur la télévision ou écran dédié.

Sinon tous les composants sont disponibles. Le disque dur est bien évidemment remplacé par une liaison hertzienne avec un serveur de stockage. Les besoins courants et classiques de l'utilisateur sont ainsi résolus.

Reste le problème des serveurs. Dans un serveur l'affichage est vraiment secondaire. Beaucoup d'administrateurs se satisfont d'un écran très simple.

Ce qui compte c'est la liaison avec l'extérieur qui est très bien géré actuellement et le stockage. La vitesse du microprocesseur n'est pas un critère fondamental.

La technique du stockage par DD limite la performance des serveurs. Plusieurs voies sont explorées pour remplacer les DD par des disques à état solide (même technique que les cartes flash des appareils photo numérique). La mémoire flash est une technique qui marche bien : plus grande vitesse de lecture; vitesse d'enregistrement plus faible, mais pour un nombre de fois limité, actuellement 1 million de fois.

Prospective

L'architecture de stockage va probablement évoluer dans les serveurs. Dans le DD les fichiers les plus modifiés et en flash tout ceux qui sont le moins modifiés par ex. le système : on ne change pas tout les jours le système et les logiciels.

De plus il faut absolument que la consommation électrique des ordinateurs diminue. Les 300W des PC sont peut être acceptable pour un particulier, mais c'est un vrai problème pour les sociétés ayant plusieurs centaines d'ordinateurs en baies. Elles sont obligées de construire des unités spécialisées de refroidissement. On a des sociétés qui forent des puits artésiens pour refroidir leurs baies d'ordinateurs. Sans parler des sociétés qui ont leurs bureaux remplis d'ordinateurs pour le personnel, qui restent allumés toute la nuit sans rien faire.

Donc 2 axes d'évolutions :

- 1) La miniaturisation sous forme de PDA pour le particulier
- 2) La révision des techniques de stockage pour les serveurs

Le (1) va profiter aux fabricants de microcontrôleurs qui vont petit à petit remplacer les microprocesseurs et leurs périphériques, pour ne laisser que le microcontrôleur ayant de la mémoire vive et de la flash en interne et la mémoire vive extérieure pour augmenter sa capacité mémoire. On rajoute un circuit de reconnaissance de la parole + une interface graphique et on a le parfait petit PDA.

Le (2) En utilisant des microprocesseurs/contrôleurs peu rapides et donc peu gourmands on diminue la consommation. On réorganise la mémoire de stockage et on a une solution simple donc un système simple.