

INFORMATIQUE I
UNE BRÈVE HISTOIRE DU CALCUL,
ARCHITECTURE VON NEUMANN
&
SYSTÈMES D'EXPLOITATION

Laurent Kaczmarek

PCSI² 2013-2014
Lycée Louis Le Grand

Jeudi 12 septembre 2013

**INFORMATIQUE
I**

UNE BRÈVE
HISTOIRE DU
CALCUL,
ARCHITECTURE
VON NEUMANN
&
SYSTÈMES
D'EXPLOITATION

**LAURENT
KACZMAREK**

UNE BRÈVE
HISTOIRE DU
CALCUL

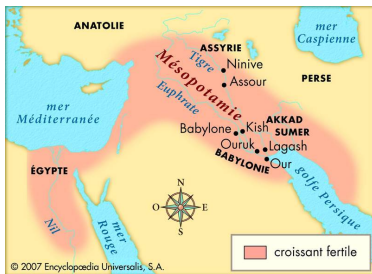
FONCTIONNEMENT
D'UN
ORDINATEUR

QUATRE GRANDES PÉRIODES

- ▶ **La naissance du calcul, (-8000)-(-3000).** Invention des systèmes de numération.
- ▶ **L'enfance du calcul, (-3000)-1900.** Le calcul est systématisé au moyen d'algorithmes mais l'exécution reste pendant longtemps *manuelle*. Quelques tentatives (réussies !) d'automatisation du calcul au moyen de dispositifs mécaniques sont cependant à signaler.
- ▶ **Penser le calcul, 1900-1946.** Des questions profondes émergent dans le sillage de la théorie des ensembles et du développement de la logique. Par exemple : peut-on *tout* calculer ?
- ▶ **L'essor du calcul automatisé, 1946-2013.** Création des super-calculateurs, des premiers ordinateurs, puis des ordinateurs individuels, des PC, etc.

INVENTION DE LA NUMÉRATION

- C'est en Mésopotamie qu'est apparu le premier système de numération vers -8000.



- Le système de numération en usage chez les Babyloniens était de type sexagésimal (ie en base 60). Nous en avons hérité l'usage de diviser en 60 les heures et les minutes, et aussi de diviser la circonférence d'un cercle en $6 \times 60 = 360$ degrés.

COMPTER PUIS ÉCRIRE

- ▶ Avant l'invention de l'écriture (dès -8000), la numération consistait essentiellement à compter (les hommes, les marchandises, etc) et à quantifier les superficies.

On a retrouvé des jetons en terre cuite dont les valeurs (1, 10, 60, 600, 3600 et 36000) permettaient de réaliser tous les nombres entiers.



- ▶ Avec l'invention de l'écriture vers -3300, une nouvelle dimension de la numération est apparue : l'écriture des nombres, ie le codage.

L'AVÈNEMENT DU CALCUL

- ▶ La possibilité d'écrire les nombres, et donc de conserver une mémoire, a permis aux hommes d'aborder des calculs de plus en plus élaborés.
- ▶ Les systèmes de numérations ont évolué au cours des siècles et des civilisations.
- ▶ La numération de position à base dix est née en Inde vers 400. Le zéro est également inventé à cette époque. Dix chiffres correspondants chacun à un symbole différent sont utilisés.
- ▶ Ce système arrive en Europe par l'Espagne au X-ième siècle. Partis de l'Inde, il a été modifié en transitant par le Moyen-Orient et le Maghreb.
- ▶ Le zéro arrive un peu plus tard en Europe, au XII-ième siècle.

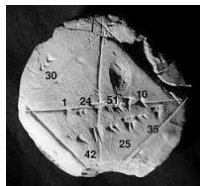
On dégage deux grandes questions.

COMMENT SYSTÉMATISER LE CALCUL ?

- ▶ Les hommes ont cherché à systématiser le calcul au moyen d'*algorithmes* afin de le rendre plus efficace.
- ▶ Définition d'un algorithme lue dans le Larrousse :
ensemble de règles opératoires dont l'application permet de résoudre un problème énoncé au moyen d'un nombre fini d'opérations.
- ▶ Les babyloniens développèrent de remarquables algorithmes, par exemple pour calculer $\sqrt{2}$.

Ci-contre la tablette
YBC 7289. Il faut la
comprendre ainsi :

$$1 + \frac{24}{60} + \frac{51}{60^2} + \frac{10}{60^3} = 1,41421296$$

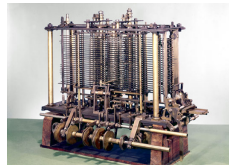
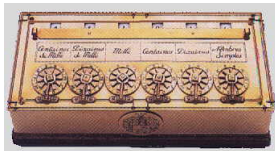


COMMENT SYSTÉMATISER LE CALCUL ?

- ▶ De nombreux algorithmes ont dès lors été inventés au fil des siècles.
- ▶ **Vers -300.** **Euclide** propose un algorithme permettant de calculer le plus grand commun diviseur de deux entiers.
- ▶ **Vers 800.** **Al Khwarizmi** écrit un traité d'algèbre. Ce traité est traduit en latin au Moyen-âge, et le terme d'*algorithmique*, déformation de son nom, est utilisé pour désigner les successions de calculs décimaux.
- ▶ **XVII-ième siècle.** L'algorithme de Raphson-Newton. Les mathématiciens anglais **Isaac Newton** et **Joseph Raphson** furent les premiers à l'utiliser pour la recherche des zéros d'une équation polynomiale.
- ▶ Cette liste est loin d'être complète !

COMMENT AUTOMATISER LE CALCUL ?

- ▶ **1645. Blaise Pascal** présente la première machine à additionner, la pascaline (utilisation d'engrenages).
- ▶ **1801 Jacquard** met au point un métier à tisser utilisant des cartes perforées.
- ▶ **1834. Charles Babbage** propose les plans d'une machine à calculer programmable. **Ada Lovelace** publie ce qui est considéré comme le premier algorithme destiné à une programmation sur machine.
- ▶ Meet the Pascaline & the Babbage machine :



LA CRISE DES FONDEMENTS EN MATHÉMATIQUES

- ▶ Suite aux travaux de **Georg Cantor** sur l'infini, des logiciens et des mathématiciens se sont lancés dans une révision des fondements des Mathématiques et en particulier de la notion d'ensemble. La logique fut repensée sous une forme calculatoire.
- ▶ **1900.** **David Hilbert** propose une liste de 23 problèmes ouverts pour le XX-ème siècle. Parmi eux, *Existe-t-il une méthode permettant de déterminer si une équation diophantienne admet des solutions.* (réponse négative par **Matiassevitch** en 1970).
- ▶ **1922.** **David Hilbert** interroge : *Existe-t-il une procédure générale permettant, en un nombre fini d'étapes, de dire si un énoncé mathématique est vrai ?*

ALAN TURING ET ALONZO CHURCH

Mais au fond, que signifie vraiment *calculer* ou encore *être calculable*? Bref, *qu'est-ce que le calcul* et *que peut-il*?

- ▶ **1936. Alan Turing** introduit la notion de machine de Turing pour répondre par la négative à la question posée par Hilbert en 1922.
- ▶ Une **machine de Turing** est un modèle abstrait du fonctionnement des appareils mécaniques de calcul. Turing l'a introduit en vue de donner une définition précise au concept d'algorithme ou de *procédure mécanique*.
- ▶ **Alonzo Church** postule que tout problème de calcul fondé sur une procédure mécanique peut être résolu par une machine de Turing. Cet énoncé n'a pas le statut d'une proposition mathématique car la notion de procédure mécanique n'est pas formalisée.

RÉALISATION D'UNE MACHINE DE TURING

- ▶ Un ruban de longueur infinie dans les deux directions est divisé en cases consécutives. Chaque case contient un symbole parmi un alphabet fini. L'alphabet contient le symbole 0, et un ou plusieurs autres symboles. Les cases non encore écrites du ruban contiennent 0.
- ▶ Une *tête* peut lire et écrire les symboles sur le ruban, et se déplacer vers la gauche (G) ou vers la droite (D) du ruban.
- ▶ Un *registre d'état* qui mémorise l'état courant de la machine. Le nombre d'états possibles est toujours fini, et il existe un état spécial appelé *état de départ* qui est l'état initial.
- ▶ Une *table d'actions* qui indique à la machine quel symbole écrire, comment déplacer la tête (G ou D), et quel est le nouvel état, en fonction du symbole lu sur le ruban et de l'état courant de la machine. Si aucune action n'existe pour une combinaison donnée d'un symbole lu et d'un état courant, la machine s'arrête.

LA THÉORIE ET LA PRATIQUE

On peut dater des années 1940-1945, la naissance de l'*informatique*. Cette nouvelle science est née de l'union de deux branches jusqu'alors disjointes :

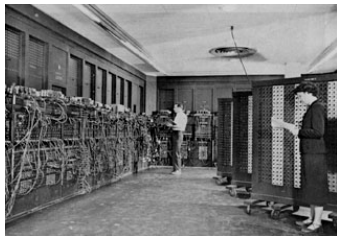
- ▶ **Le monde des mathématiciens et des logiciens**, et plus particulièrement les recherches théoriques sur le calcul effectif. Les grands noms sont associés à ces travaux sont **Church** et **Turing**.
- ▶ **Le monde des ingénieurs**; plusieurs tentatives indépendantes visent à construire des machines électroniques ou électro-mécaniques capables d'exécuter des calculs complexes à grande vitesse.
- ▶ Les travaux de Turing ont eu une influence sur la conception en 1943-44 du calculateur *Colossus*, conçu par les Anglais pour décrypter le code secret utilisé par l'armée allemande.

L'ENIAC

- ▶ Le département américain de la Défense finance un projet ambitieux lancé en 1943 à l'Université de Pennsylvanie par **J. Presper Eckert** et **John Mauchly**. Cet effort aboutira à la construction d'un grand calculateur électronique, l'*ENIAC*, qui ne sera néanmoins pleinement opérationnel qu'en 1946.
- ▶ L'ENIAC, *Electronic Numerical Integrator and Computer*, fut le premier calculateur entièrement électronique ayant les mêmes capacités qu'une machine de Turing, aux limites physiques près. Il avait des dimensions imposantes : plus de 20 m de long, 2 m 50 de haut, 30 tonnes. Comportant 18 000 tubes électroniques, il consommait 150 kilowatts par heure. Les données étaient lues sur cartes perforées.

L'ENIAC

- ▶ Le programme était représenté sur un support externe, sous la forme d'un panneau de connexion analogue à celui d'un standard téléphonique. Pour programmer une application (initialement, le calcul de tables de tir pour l'artillerie américaine), il fallait faire un plan des connexions nécessaires, puis procéder au câblage physique, un travail long, fastidieux, et sujet aux erreurs.
- ▶ Voici le dinosaure :



LA CONTRIBUTION DE VON NEUMANN

- En 1944, **John von Neumann** accepte un poste de consultant dans le projet ENIAC. Von Neumann avait rencontré Turing et connaissait ses travaux.



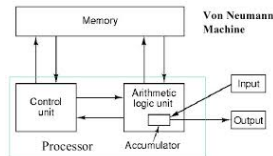
Von Neumann avait rencontré Turing et connaissait ses travaux. Il prit une part active à la conception de l'*EDVAC*, le successeur de l'*ENIAC*.

En juin 1945, un rapport sur la conception de l'*EDVAC*, *Electronic Discrete Variable Automatic Computer*, fut diffusé.

UNE NOUVELLE ARCHITECTURE

- Le rapport décrit d'une part un schéma d'architecture de calculateur, organisé en trois éléments (unité arithmétique, unité de commande et mémoire contenant programme et données), d'autre part des principes de réalisation pour ces éléments, notamment les opérations arithmétiques. Ce dernier aspect, dépendant partiellement de la technologie connue à l'époque, a vieilli.

Le modèle d'architecture, qui marque une transition profonde avec les pratiques antérieures, reste en revanche d'une étonnante actualité.



COMPUTER VS. ORDINATEUR

- ▶ Les anglo-saxons emploient le nom *computer* qui est un dérivé du verbe *to compute* signifiant *calculer*.
L'informatique se traduit en *computer science*.
- ▶ Les Français ont préféré en 1955 le terme *ordinateur* à celui de *calculateur*.
- ▶ Sans être chauvin, le terme *ordinateur* est bien plus adapté que *computer*. Si les premières machines (cf. l'ENIAC) servaient exclusivement au calcul, les ordinateurs plus récents effectuent bien plus que du calcul. Par exemple, les machines servent aussi à *organiser et stocker de l'information*.

LA THÉORIE DE L'INFORMATION

- ▶ Les informations dans un ordinateur sont stockées et échangées sous forme digitale. Les systèmes électriques la manipulant possèdent deux états stables (typiquement deux tensions 0V ou 5V) généralement représentés par 0 et 1.
- ▶ Un *bit* (ou *binary digit*) est un élément d'information binaire.
- ▶ Un *octet* (ou *byte*) est un ensemble de 8 bits.
- ▶ **1948.** **Claude Shannon** jette les bases de la théorie de l'information dans son article *A Mathematical Theory of Communications*.

VERS LES ORDINATEURS INDIVIDUELS

- ▶ **1945-1955**, première génération : tubes à vide et commutateurs. C'est le cas de l'ENIAC.
- ▶ **1955-1965**, deuxième génération : les transistors. Les ordinateurs sont devenus suffisamment fiables pour être vendus.
- ▶ **1965-1975**, troisième génération : les circuits intégrés. La taille et le prix des ordinateurs ont été considérablement réduits. Des entreprises ont commencé à s'équiper.
- ▶ **1975-2013**, quatrième génération : le microprocesseur. Il fut inventé en 1969 par Ted Hoff de la société Intel. Création du premier PC, *Personal Computer*, en 1975.

Commençons par un petit rappel historique...

- ▶ Avant John von Neumann, le programme était codé en dur dans la machine via des câblages ou des cartes perforées. Pour changer le programme, il fallait changer le câblage de la machine.
- ▶ L'idée de Von Neumann est de stocker les instructions du programme dans la mémoire, comme une donnée.
- ▶ John Von Neumann présente en 1945 un nouveau modèle d'ordinateur, toujours utilisé actuellement. La paternité de cette structure est contestable; elle revient en fait à Von Neumann, J. Presper Eckert et John Mauchly mais elle est passée à la postérité sous le nom d'*architecture Von Neumann*

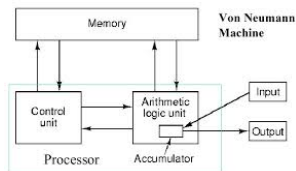
L'ARCHITECTURE DE VON NEUMANN

L'architecture de von Neumann est constituée de 4 parties distinctes :

STRUCTURE D'UN ORDINATEUR

- ▶ L'unité arithmétique et logique (UAL ou encore unité de traitement) : son rôle est d'effectuer les opérations de base ;
- ▶ L'unité de contrôle, chargée du séquençage des opérations ;
- ▶ La mémoire qui contient à la fois les données et le programme qui dira à l'unité de contrôle quels calculs faire sur ces données. La mémoire se divise entre mémoire volatile (programmes et données en cours de fonctionnement) et mémoire permanente (programmes et données de base de la machine).
- ▶ Les dispositifs d'entrée-sortie, qui permettent de communiquer avec le monde extérieur.

STRUCTURE D'UN ORDINATEUR (SUITE)



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

- ▶ L'unité de commande lit les instructions une à une depuis la mémoire.
- ▶ L'unité de commande décrit l'emplacement des opérandes, l'opération à effectuer ainsi que le lieu de stockage du résultats.
- ▶ L'unité arithmétique et logique effectue les opérations élémentaires.

LES BUS

L'échange d'informations entre ces différents composants s'effectue via des *bus*. Les bus sont décomposés en trois lignes distinctes : les bus d'adresses (qui indique au processeur l'adresse des données à utiliser dans la mémoire), les bus de données et les bus de contrôle (qui véhiculent les instructions). Les bus sont caractérisés par leur nombre de lignes (et donc le nombre d'informations transférables simultanément) et leur fréquence (i.e. le nombre de paquets d'informations transférables par seconde). Le processeur est muni d'une horloge qui délivre des *tops* (la fréquence est déterminée par un quartz et est une des caractéristiques de l'ordinateur). À chaque top, deux nouveaux composants sont reliés au bus et peuvent transmettre des informations jusqu'au top suivant. La durée entre deux tops est un *cycle*.

Les unités de mémoires ont considérablement évolué depuis l'époque de von Neumann.

LES DIFFÉRENTES MÉMOIRES

L'ordinateur est constitué de différentes unités mémoires qui se distinguent par leur localisation, leur mode de stockage ainsi que les temps d'accès. Dans cette section, sans vouloir être exhaustifs, nous détaillons quelques types de mémoires que nous classons par leur distance au processeur :

- ▶ Les registres.
- ▶ La mémoire cache.
- ▶ La RAM.

LES REGISTRES

Les registres sont localisés à l'intérieur du processeur. L'accès aux informations est très rapide (10 fois plus que pour accéder à la RAM). Ces registres contiennent toujours :

- ▶ un compteur ordinal (ou Program Counter) contenant l'adresse de la prochaine instruction à effectuer.
- ▶ un registre d'état contenant les informations relatives à l'instruction en cours.
- ▶ un ensemble de registres de travail. La taille de ces registres (32 ou 64 bits) est une des caractéristiques du processeur.

LA MÉMOIRE CACHE

La mémoire cache, située à l'extérieur du processeur, est intermédiaire entre les registres et la RAM.

- ▶ L'accès à la mémoire cache est plus rapide mais d'un coût plus élevé à celui de la RAM.
- ▶ La mémoire cache est disponible près du processeur pour stocker des informations.

LA MÉMOIRE VIVE (RANDOM ACCESS MEMORY)

La RAM est située à l'extérieur du processeur. Elle est constituée de condensateurs qui sont : soit chargés (valeur 1), soit déchargés (valeur 0). Un condensateur se déchargeant régulièrement, la RAM est rafraîchie régulièrement (l'ordre de grandeur entre deux rafraîchissements est de 10ns). La modification ou la récupération de la donnée d'un condensateur s'effectue à l'aide d'un transistor.

LA MÉMOIRE VIVE (RANDOM ACCESS MEMORY)

Le terme Random signifie non-séquentiel, i.e. l'accès à chacun de ces condensateurs peut s'effectuer directement.

- ▶ la RAM est relativement lente (de l'ordre de $50ns$).
- ▶ la RAM manipule des octets, chaque octet possédant une adresse.
- ▶ la RAM nécessite une alimentation électrique. Si l'alimentation est coupée, les données sont perdues.
- ▶ les condensateurs sont disposés sous forme matricielle ; on y accède en donnant le numéro de ligne et le numéro de colonne.
- ▶ la durée pour accéder à une donnée est égale à la durée du cycle (ou top) plus la durée d'accès à la valeur du condensateur. Si cette dernière est plus longue que la durée du cycle, le processeur effectue des cycles d'attente et est donc ralenti.

RÉALISATION CONCRÈTE D'UNE ARCHITECTURE VON NEUMANN

Un des principaux problèmes pratiques est la conservation des données hors tension. Deux grands moyens de stockage durable ont été inventés :

LA MÉMOIRE MORTE (READ ONLY MEMORY)

La mémoire morte reste disponible lorsque l'ordinateur est hors tension.

- ▶ la ROM ne s'efface pas lors de la mise hors tension.
- ▶ la ROM contient les informations de démarrage de l'ordinateur.
- ▶ la ROM est relativement lente (l'accès aux données s'effectue en environ 150ns).
- ▶ la ROM était historiquement réalisée à l'aide de fusibles.

RÉALISATION CONCRÈTE D'UNE ARCHITECTURE VON NEUMANN

INFORMATIQUE
I

UNE BRÈVE
HISTOIRE DU
CALCUL,
ARCHITECTURE
VON NEUMANN
&
SYSTÈMES
D'EXPLOITATION

LAURENT
KACZMAREK

UNE BRÈVE
HISTOIRE DU
CALCUL

FONCTIONNEMENT
D'UN
ORDINATEUR

LA MÉMOIRE DE MASSE

- ▶ Initialement des lecteurs de bandes magnétiques.
- ▶ Aujourd'hui des disques durs ou des mémoires flash.

VARIATIONS SUR VON NEUMANN

Les défauts de l'architecture von Neumann peuvent être contourné de deux manières :

- ▶ utilisation de cartes graphiques (qui contiennent un processeur).
- ▶ faire accéder les périphériques à la mémoire.

NÉCESSITÉ D'UN OS

Dans la pratique, un ordinateur gère *simultanément* plusieurs tâches (navigation web, video, jeux, etc). Il convient de le faire de manière ordonnée. C'est le travail d'OS, *Operating System*.

- ▶ Où les programmes sont-ils stockés ?
- ▶ Comment les lancer ?
- ▶ Où ces programmes lisent-ils ou stockent-ils leurs données ?

TRAVAIL D'UN OS

- ▶ donner l'illusion de la simultanéité à l'utilisateur.
- ▶ identifier les utilisateurs.
- ▶ gérer le disque dur et ses fichiers.
- ▶ gérer le lancement et la fermeture des programmes.
- ▶ contrôler l'accès aux données.

DEUX FAMILLES D'OS

- ▶ Ceux issus d'Unix : Mac OS X, iOS, Linux, Android, etc.
- ▶ Ceux de la famille Microsoft Windows.