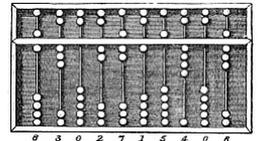


## Quelques dates clés

- ❖ 500 av. J.-C - apparition des bouliers et abaquages
- ❖ 1er siècle avant J.-C. Datée d'avant 87 av. J.-C, la **machine d'Anticythère** est une calculatrice mécanique antique permettant de calculer des positions astronomiques. C'est le plus vieux mécanisme à engrenages connu.
- ❖ (780-850) Muhammad **Al-Khwarizmi** *Mathématicien, Géologue, Astronome, Astrologue* "Père de l'Algèbre", *The Compendious Book on Calculation by Completion and Balancing*, 830

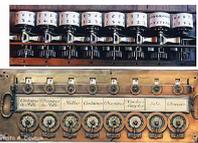


**Al-Khwarizmi donne son nom au mot algorithme :** une liste d'instructions à suivre, qui à partir de données, permettent d'obtenir des résultats clairement définis en un nombre fini d'étapes.



Un algorithme est une succession finie d'actions clairement identifiées exécutées dans un ordre précis.

- ❖ 1623 - Wilhelm **Schickard** invente pour Kepler une « horloge calculante » destinée à calculer les éphémérides.
- ❖ 1632 - invention de la règle à calcul
- ❖ 1642 - Blaise **Pascal** *Mathématicien, Physicien, Théologien, Philosophe* invente la **Pascaline** (*Machine à calculer*)



- ❖ 1673 - **Leibniz** s'inspire de la Pascaline et invente une **machine capable de multiplier et diviser** sans utiliser les additions successives. Elle ne sera construite qu'en 1694, faute de trouver un artisan assez habile. Leibniz a aussi compris l'importance du système binaire pour les mathématiques et la logique. On trouve cependant des traces du système binaire bien avant, chez les Indiens et les Chinois.
- ❖ 1801 - Joseph Marie **Jacquard** invente des **cartes pour commander le tissage** de motifs sur les métiers à tisser. On peut considérer cette invention comme le début de la programmation.
- ❖ 1823 - **Charles Babbage** commence à construire sa **machine à différences**, inspiré par le métier à tisser de Jacquard.

Babbage caresse l'idée de cette machine depuis 1812. Il s'adjoint l'aide d'une jeune femme, **Ada Lovelace**, brillante mathématicienne qui l'aide à concevoir les « diagrammes » pour faire fonctionner la machine. Il semblerait que c'est Lady Ada qui conçoit le premier langage informatique pour la machine à différences de Babbage (elle donnera d'ailleurs son nom au langage de programmation Ada), mais d'autres biographes pensent qu'elle a seulement corrigé une erreur de Babbage. Dans une correspondance avec Sir Humphry Davy en 1822, Babbage y discute de certaines applications d'une telle machine, notamment pour le calcul et l'impression des tables mathématiques, et y discute aussi des principes d'une machine à calculer. En 1823 débute la construction de cette machine qui ne sera jamais complétée. En 1991, on a pu reconstruire à partir de ses plans une partie de cette machine, qui fonctionna parfaitement.

On peut en voir une au *Science Museum* de Londres.



**Calculabilité** - Une fonction est dite **calculable** s'il existe une procédure algorithmique finie permettant de calculer en un nombre fini d'étapes, sa valeur pour tout argument de son domaine.

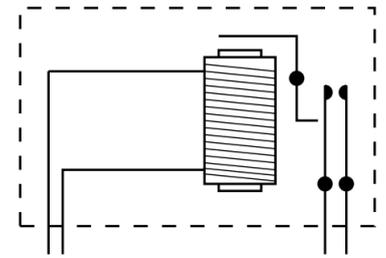
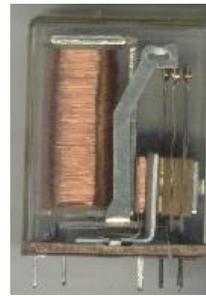
La notion de calculabilité est liée au **10ème problème de Hilbert** :

Etant donnée une équation avec un nombre quelconque de quantités inconnues et avec des coefficients qui sont des nombres entiers rationnels : Trouver un procédé qui peut déterminer par un nombre fini d'opérations, si l'équation est soluble dans les entiers rationnels. Yuri Matiyasévitch a démontré en 1970 qu'il n'est pas possible de trouver un tel algorithme pour un polynôme de degré supérieur à 5.

- ❖ 1842 - **Ada Lovelace** : **Premier programme "informatique"** (nombres de Bernoulli)
- ❖ 1854 - George **Boole** publie un article sur la **logique binaire**. Les travaux de Boole, s'ils sont théoriques, n'en trouveront pas moins des applications primordiales dans les systèmes informatiques.
- ❖ 1890 - Herman **Hollerith** utilise une **machine à cartes perforées** pour le dépouillement du recensement américain.

## Des machines électromécaniques

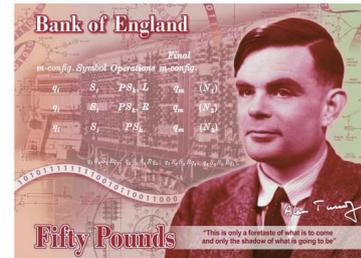
Au début du XXe siècle, se développent des machines électromécaniques basées sur l'utilisation de **relais électromécaniques**.



- 1936 - Alan Mathison **Turing** publie *On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem*, ouvrage qui définit les **limites théoriques de l'ordinateur**. Il présente le modèle des **machines de Turing** et construit (mathématiquement) la première machine universelle. Il prouve également l'absence de méthodes algorithmiques (**indécidabilité** algorithmique) pour résoudre certains problèmes comme le **problème de l'arrêt** ou le problème de la décision.

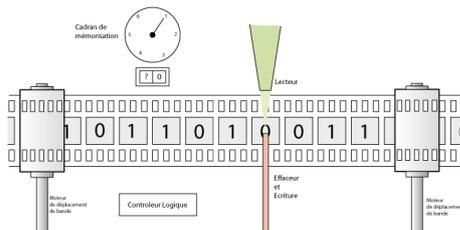


**Décidabilité** - Une classe de questions est dite décidable s'il existe une procédure algorithmique finie permettant de résoudre toute question de cette classe en un nombre fini d'étapes.



### Church - Turing

Toute fonction dite calculable peut être calculée à l'aide d'une machine de Turing.

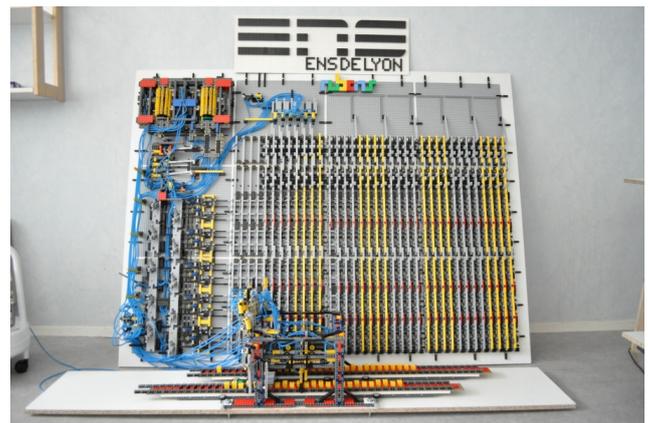


Machine minimaliste :

**Ruban** (données)                      **Registre d'état** (mémoire)

**Tête lecture-écriture**                  **Table d'actions** (calculs)

Inconvénient : 1 machine → 1 série d'instruction !

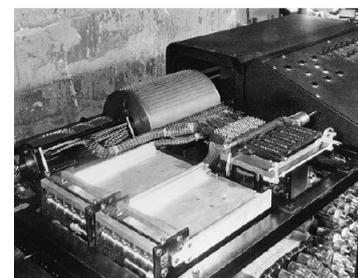


- 1937 - Le premier ordinateur, nommé **ABC** pour *Atanasoff-Berry Computer* est conçu par John Vincent **Atanasoff** avec son étudiant Clifford Berry . Il a été testé avec succès en 1942.

Les idées d'Atanasoff (utilisation du binaire, utilisation d'une unité arithmétique et logique pour effectuer les calculs de base) furent reprises dans l'ENIAC, souvent considéré ainsi à tort comme le premier ordinateur. En effet, Eckert et Mauchly, concepteurs de l'ENIAC, brevettent leur invention comme le premier ordinateur (« first digital computer »), mais un procès dans les années 1970, juge qu'ils n'ont fait que reprendre les idées de l'ordinateur ABC, et consacre ainsi Atanasoff comme l'inventeur du premier ordinateur électronique.

Idée : Utiliser une **machine numérique**

- ↪ 300 Tubes à vide+relais électromécaniques
- ↪ 320 kg; 1,5 km de fils
- ↪ 1er à faire des calculs en binaire
- ↪ Utilise l'algèbre de Boole
- ↪ 30 additions/s; 1 multiplication/s



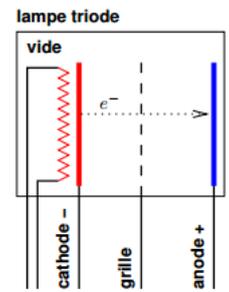
- 1938 - Claude E. **Shannon** fait le parallèle entre les circuits électriques et l'algèbre booléenne et définit le **bit**.

## Des tubes électroniques



### Principe du tube triode :

l'intensité du courant circulant entre l'anode et la cathode dépend de la tension de la grille.



- ❖ 1940 - Pour décrypter les messages de l'armée Allemande, les Anglais mettent au point sur le site de Bletchley Park les **calculateurs** Robinson et Colossus sous la direction du mathématicien **Alan Turing**.

Ce sont les premières machines qui intègrent les concepts d'arithmétique binaire, d'horloge interne, de mémoire tampon, de lecteurs de bande, d'opérateurs booléens, de sous-programmes et d'imprimantes. Tout ceci sera classé « Secret défense » jusqu'en 1975. *Casse les codes allemands pendant WWII* ⇒ *Estimation : 2 à 4 ans de gagnés.*

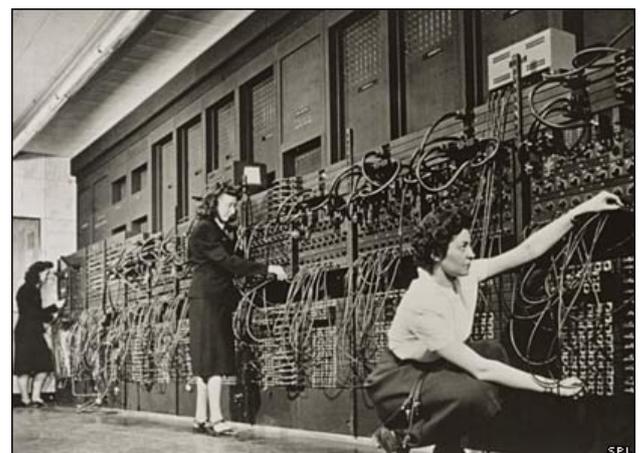


- ❖ 1941 - Konrad **Zuse** fait fonctionner le premier ordinateur du monde, le **Z3** (ou **Zuse 3**). Encore largement méconnu, il est l'un des pères de l'informatique en ayant développé le premier calculateur électromécanique Z1 en 1938. Le Z3 fut détruit en 1944 par les bombardements alliés et servait à produire des calculs pour une usine aéronautique allemande. Il concevra aussi et réalisera entre 1942 et 1946 le premier langage de haut niveau nommé **Plankalkül**. Ce langage est extrêmement innovant, mais en dehors du courant principal du développement de l'informatique. Il demeure donc très largement méconnu.
- ❖ 1943 - Création du **ASCC Mark I** (*Automatic Sequence-Controlled Calculator Mark I*) à Harvard par Howard **Aiken** et son équipe, avec le soutien d'IBM. C'est un énorme calculateur électromécanique (3000 relais, 800 km de câbles) qui permet de faire 3 opérations sur 23 chiffres par seconde. Cette machine est très proche dans son principe de fonctionnement des plans de la machine analytique de Babbage. Le programme est lu depuis une bande de papier ; les données à traiter peuvent être lues depuis une autre bande de papier ou un lecteur de cartes.
- ❖ 1943 - L'**ENIAC** (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) est créé par John W. **Mauchly** et John P. **Eckert**. Il sera opérationnel en 1946. Son poids est de 30 tonnes pour des dimensions de  $2,4 \times 0,9 \times 30,5$  mètres occupant une surface de 67 mètres carrés. Il fut utilisé pour des calculs ayant servi à mettre au point la **bombe H**. Son principal inconvénient était sa programmation : l'ENIAC était en effet uniquement programmable manuellement avec des commutateurs et des câbles à enficher.

### Usage : **calculs balistiques**

Trajectoire d'un projectile en 20 s au lieu de 3 jours de calcul manuel

- ↪ "1er" ordinateur moderne non mécanique
- ↪ 18000 Tubes, Lecteur de cartes perforées, imprimante électrique, 6000 commutateurs connectables
- ↪ 30 tonnes, Forme en U de 6m et 12m
- ↪ 20 calculateurs en parallèle
- ↪ Calcul décimal
- ↪ 5000 additions/s, 1 division en 6ms
- ↪ 120 cartes lues/min



## Modèle de von Neumann

- Années 1950, **John von Neumann** développe, toujours en partant de la technologie des tubes électroniques, le **premier ordinateur au sens moderne du terme**. Il décrit notamment le modèle suivant :



### Modèle de von Neumann

- ↪ Une **mémoire centrale** contient à la fois les données et les programmes.
- ↪ Une **unité centrale de traitement** (UCT), qui comporte
  - l'**unité arithmétique et logique** (UAL) qui effectue les opérations en binaire.
  - l'**unité de contrôle** (UC) qui interprète les instructions des programmes, et provoque leur exécution.
- ↪ Les **entrées/sorties** (E/S) sont gérées par l'unité centrale de traitement.

Idée :

**instructions et données stockées dans la même mémoire !**

Possibilité de changer les instructions, surtout en cours de calcul !

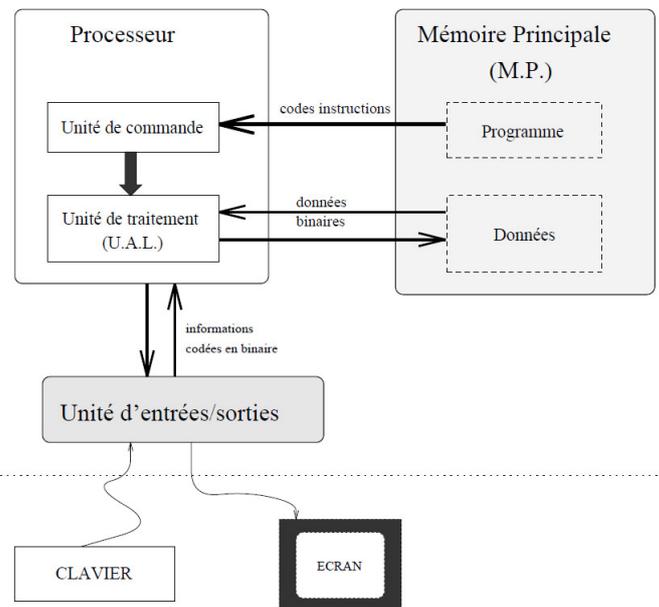
⇒ 1 machine ≈ infinité d'opérations !

⇒ Architecture de la plupart des ordinateurs actuels !



### Principes de la machine de von Neumann

- ↪ Machine universelle contrôlée par un programme
- ↪ Données et programme en mémoire (binaire)
- ↪ Exécution séquentielle par défaut
- ↪ Possibilité de tests, boucles et sauts conditionnels
- ↪ Architecture **SISD** (*Single Instruction Single Data*)
  - Une UC traite une séquence d'instructions
  - Une UAL traite une séquence de données

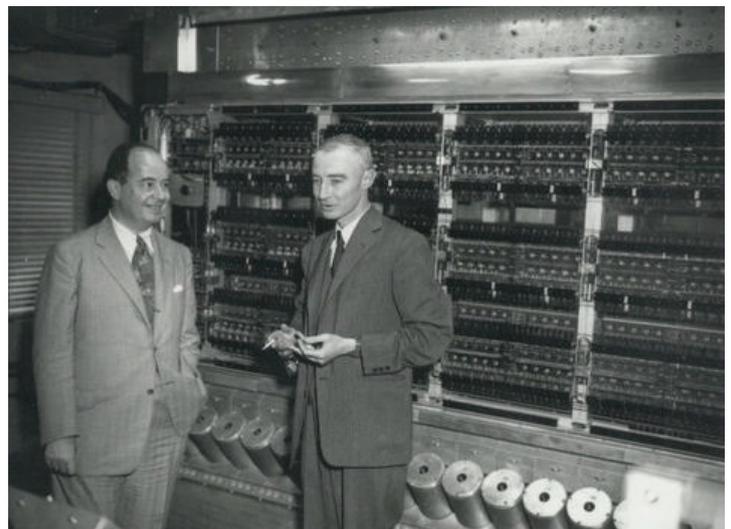


Les travaux de von Neumann aboutissent à la construction de l'**IAS computer** au *Princeton Institute for Advanced Studies* (NJ, USA), opérationnel en 1952.



### Description de la machine de von Neumann

- ↪ UAL : effectue les calculs
- ↪ UC : commande les autres unités
  - Envoie des signaux de contrôle aux autres unités
  - Supervise le fonctionnement de l'UAL
  - Envoie des signaux d'horloge aux autres unités...
- ↪ Mémoire : dispositif de stockage de données et du programme qui indique à l'unité de contrôle quels calculs faire sur ces données. La mémoire se divise en **mémoire vive** (programmes et données en cours de fonctionnement) et **mémoire de masse** (programmes et données de base de la machine) ;
- ↪ E/S : permettent l'échange d'informations avec les dispositifs extérieurs



- 1945 - Un papillon de nuit coincé dans les circuits bloque le fonctionnement du calculateur Mark II. La mathématicienne **Grace Murray Hopper** décide alors que tout ce qui arrête le bon fonctionnement d'un programme s'appellera « **bug** » (bestiole en anglais).

## Des transistors

Le transistor a été inventé en 1948 dans les laboratoires Bell Labs (NJ) par Bardeen, Brattain et Shockley (prix Nobel en 1956).

- Même rôle que le tube mais plus petit plus fiable plus économique

Les **transistors** sont fabriqués à base de matériaux semi-conducteurs, obtenus en modifiant les caractéristiques d'un substrat, généralement le **silicium**.



- 1951 - Grace **Murray Hopper** conçoit le premier compilateur, nommé A-0 System. À partir de 1957, elle travaille pour IBM, où elle défend l'idée qu'un programme devrait pouvoir être écrit dans un langage proche de l'anglais plutôt que d'être calqué sur le langage machine, comme l'assembleur. De cette idée naîtra le langage **COBOL** en 1959.
- 1954 - Création du **Fortran**, premier langage de programmation à être implémenté sur un ordinateur.
- 1954 - IBM (société fondée en 1911) lance sur le marché le modèle 650, premier ordinateur, muni d'une mémoire à tambour et orienté calcul scientifique produit en grande série. Il coûtait un demi-million de dollars, occupait plusieurs mètres cubes et était doté d'une mémoire vive de 2 kilooctets.
- 1955 - Le professeur Jacques **Perret** de la faculté des lettres de l'université de Paris, invente le mot « **ordinateur** » le 16 avril 1955, à la demande d'IBM France.
- 1958 - Alors qu'il travaillait pour Texas Instrument, l'Américain Jack **Kilby** invente le premier circuit intégré, jetant ainsi les bases du matériel informatique moderne.  
Cette découverte a valu à Kilby le prix Nobel de physique en 2000.

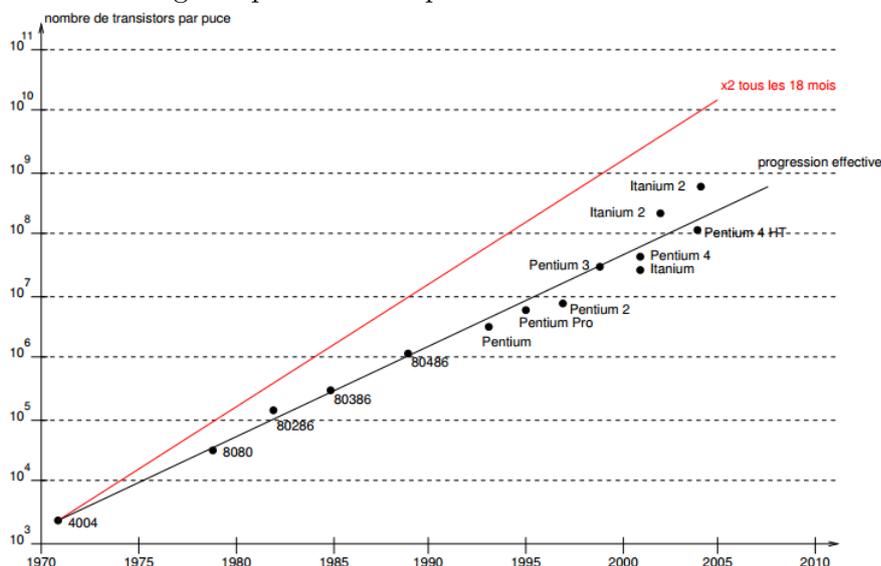
## Des circuits intégrés

En 1958, Jack Kilby propose un procédé permettant de graver de nombreux transistors sur un même plaquette de silicium, et crée le premier **circuit intégré**.

Cela va permettre d'intégrer de quelques dizaines à quelques milliers de transistors par puce, d'où des ordinateurs moins encombrants et plus rapides.



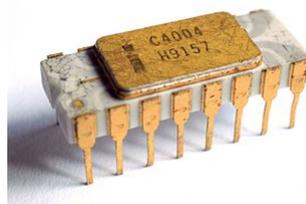
- 1962 - Philippe **Dreyfus** invente le mot « **informatique** », mot-valise né de la contraction des mots « information » et « automatique ».
- 1963 - **Création de la souris** par Douglas Engelbart du Stanford Research Institute.
- En 1965, Gordon **Moore** (l'un des fondateurs d'Intel) observait que le nombre de transistors que l'on pouvait intégrer sur puce avec la technologie la plus économique doublait environ tous les 18 mois : **loi de Moore**.



- 1967 - Une équipe d'ingénieurs d'IBM dirigée par Alan **Shugart** lance la disquette (dans sa version 8 pouces) pour stocker les microprogrammes des systèmes 370 et, accessoirement, envoyer pour un faible coût des mises à jour à leurs possesseurs. Cette première disquette pouvait stocker 80'000 caractères, soit environ une journée de frappe d'une opératrice de saisie. Pour cette raison, des matériels de saisie sur disquette commencèrent à remplacer les encombrantes et bruyantes perforatrices de cartes utilisées jusque-là.

À la fin des années 1990, les disques compacts et Internet commencent à remplacer certains usages des disquettes. Au courant des années 2000, les clés USB et les cartes mémoires remplacent progressivement les autres usages des disquettes sur les nouveaux ordinateurs personnels. En mars 2011, Sony, cesse la fabrication de disquettes 3 1/2 pouces. C'était le dernier format de disquettes encore existant, après les 8 pouces et les 5 1/4 pouces.

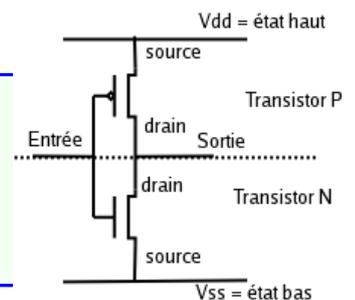
- Fin 1969 - Début du réseau **Arpanet**, renommé plus tard **Internet**. Il compte 4 nœuds.
- 1971 - Le **microprocesseur 4004** d'Intel. De la taille d'un timbre, il développe des performances équivalents à celle de l'ENIAC (1946), qui occupait toute une pièce.



- 1973 - Commercialisation du Micral, le premier **micro-ordinateur**. Cet ordinateur ne possédait ni clavier ni écran et était commandé par des interrupteurs, comme l'Altair, deux ans plus tard.
- 1975 - L'**Altair 8800** du constructeur américain MITS est un micro-ordinateur basé sur le micro-processeur Intel 8080A vendu en kit électronique à quelques milliers d'exemplaires pour les particuliers en 1975. Il est considéré par les Américains comme le premier micro-ordinateur.
- 1975 - La société **Microsoft** est fondée en avril 1975 sous le nom original de Micro-Soft, par deux étudiants américains, **Bill Gates** et **Paul Allen**.
- 1976 - **Steve Jobs**, **Steve Wozniak** et **Ronald Wayne** fondent la société **Apple** 🍏.
- 1976 - Apparition du premier **supercalculateur** : le Cray I.

### Very Large Scale Integration (VLSI)

À partir de 1980, la technologie dite **CMOS** (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) se généralise : il devient possible d'intégrer des centaines de milliers de transistors par puce. On parle de Very Large Scale Integration (VLSI).



- 1982 - L'informatique commence doucement à investir les foyers. Cependant, le PC portable, tel qu'on le connaît aujourd'hui, n'existe pas vraiment. L'arrivée du Grid Compass 1101, en avril 1982, est une date importante, puisque c'est la première machine à proposer un concept d'écran « refermable ». Vendu la bagatelle de 8150 dollars, c'est un véritable monstre de puissance et se targue de proposer un écran de 6 pouces affichant une définition de 320 x 240 px. À l'intérieur, on y trouvait un processeur Intel 8086 cadencé à 8 MHz et 256 Ko de mémoire vive. Le GRiD Compass 1101 a connu un succès d'estime, notamment auprès de l'armée américaine et de la NASA. C'est d'ailleurs le premier laptop à aller dans l'espace en 1985 à bord de la navette Discovery.
- 1985 - Apparition du CD-ROM.
- 1989 - **Tim Berners-Lee** invente le World Wide Web (WWW) pour que les chercheurs puissent partager les informations au sein du CERN.

- ❖ 1994 - Le site de vente en ligne Amazon est fondé par **Jeff Bezos**. En 2017, la société emploie 541'900 personnes dans le monde et a établi, outre le site originel américain (ouvert en 1995), des sites spécifiques dans de nombreux pays.
- ❖ 1997 - **Deep Blue** bat Gary Kasparov sur le score de 3,5 – 2,5. Deep Blue est un superordinateur spécialisé dans le jeu d'échecs, développé par IBM. C'est la première fois qu'un ordinateur bat un champion du monde d'échecs.
- ❖ 1998 - La société **Google, Inc.** est fondée le 27 septembre 1998 dans la Silicon Valley, en Californie, par **Larry Page** et **Sergey Brin**, créateurs du moteur de recherche Google.
- ❖ 2001 - **Wikipédia** est une encyclopédie numérique ouverte, libre, multilingue, consultable gratuitement sur internet et en évolution permanente grâce à de très nombreux contributeurs bénévoles. Son succès est considérable et sa croissance exponentielle : créée en janvier 2001 par Jimmy **Wales**, elle est devenue un des 10 sites les plus consultés au monde.

### Omniprésence des ordinateurs

En 2003 :  $10^{18}$  (soit +100millions/homme).

type d'ordinateur	prix €	exemple d'utilisation
« Super-ordinateurs »	150 M	simulation physique de grande ampleur
Mainframes	5 M	traitement des données dans les banques
Grappes de calcul	50-500 K	simulation physique
Serveurs	5 K	serveurs réseau
Micro-ordinateurs	200-1000	ordinateur de bureau, portables
Processeurs embarqués	< 200	téléphones portables, smartphones...
Microcontrôleurs	5	dans les appareils électroménagers !
Puces « jetables »	< 0.5	cartes bancaires, RFID

- ❖ 2004 - Mark **Zuckerberg** fonde « **The Facebook** », le 4 février 2004. L'inscription était alors limitée aux étudiants de l'université Harvard. En 2018, Facebook compte plus de 2,2 milliards d'utilisateurs.
- ❖ 2005 - **Youtube** est créé par Steve Chen, Chad Hurley et Jawed Karim, trois anciens employés de PayPal. Il est racheté par Google en octobre 2006 pour la somme de 1,65 milliard de dollars.
- ❖ 2006 - Twitter est créé le 21 mars 2006 par Jack Dorsey, Evan Williams, Biz Stone et Noah Glass, et lancé le 13 juillet de la même année. Le service est rapidement devenu populaire, jusqu'à réunir plus de 500 millions d'utilisateurs dans le monde fin février 2012. Au 5 mars 2017, Twitter compte 313 millions d'utilisateurs actifs par mois avec 500 millions de tweets envoyés par jour et est disponible en plus de 40 langues.
- ❖ 2007 - **Apple** entre dans le marché des téléphones portables avec la commercialisation de l'**iPhone**.
- ❖ 2010 - Le 3 avril 2010, Steve Jobs (1955-2011), président-directeur général d'Apple, présente sa dernière nouveauté : l'**iPad 1**. La tablette d'Apple est la plus vendue au monde. L'écran tactile de la tablette remplace en quelque sorte la souris. Un logiciel interprète le contact et les déplacements des doigts sur l'écran. L'affichage à l'écran peut se faire en mode portrait et paysage en pivotant la tablette.
- ❖ 2010 - Lancement du site **Pinterest** par Paul Sciarra, Evan Sharp et Ben Silbermann.
- ❖ 2010 - **Instagram** est fondé et lancé par l'Américain Kevin Systrom et le Brésilien Michel Mike Krieger en octobre 2010. Le 10 avril 2012, Facebook annonce l'acquisition d'Instagram pour environ un milliard de dollars américains. Instagram revendique plus d'un milliard d'utilisateurs à travers le monde, dont 75 % d'utilisateurs en dehors des États-Unis, selon les chiffres officiels fournis en juin 2018.
- ❖ 2017 - En novembre, IBM déclare avoir développé un **ordinateur quantique** capable de gérer 50 bits quantiques, ou **qubits**. Les chercheurs ont pu préserver l'état quantique pendant 90 microsecondes. En dépit d'une période de temps extrêmement courte, il s'agit d'un nouveau record pour l'industrie.
- ❖ 2018 - En mars 2018, Google a marqué les esprits en présentant **Bristlecone**, un processeur quantique avec 72 qubits. Personne n'a fait mieux à ce jour.

### Conclusion

Ce qu'il faut savoir faire à l'issue de cette partie :



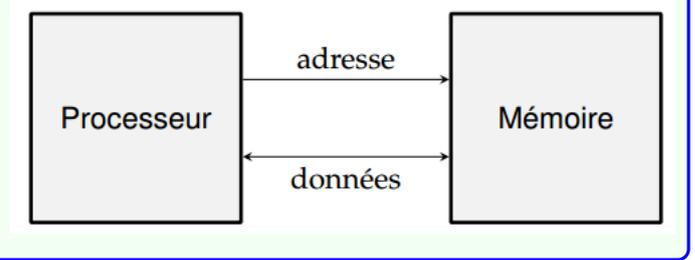
**On classe les ordinateurs suivant leur génération technologique**

- ↪ **première génération** : il s'agit des ordinateurs utilisant des tubes à vide
- ↪ **deuxième génération** : ordinateurs utilisant des transistors au lieu de tubes à vide
- ↪ **troisième génération** : utilisation de circuits intégrés
- ↪ **quatrième génération** : utilisation de microprocesseurs

## C'est quoi un ordinateur moderne ?

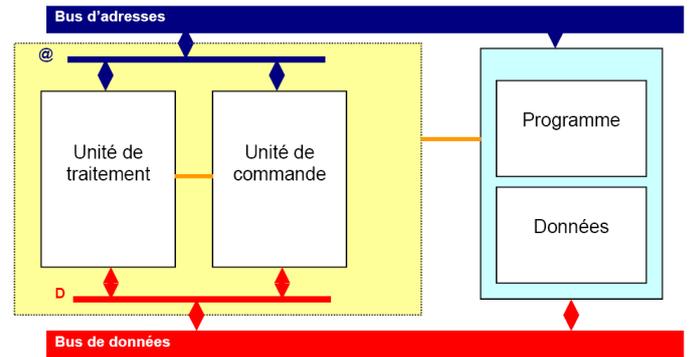


von Neumann eut l'idée (que d'autres eurent probablement avant lui) que la mémoire de l'ordinateur ne devait pas servir qu'à stocker uniquement des données, elle devait également stocker les programmes : c'est le concept de **programme enregistré**.



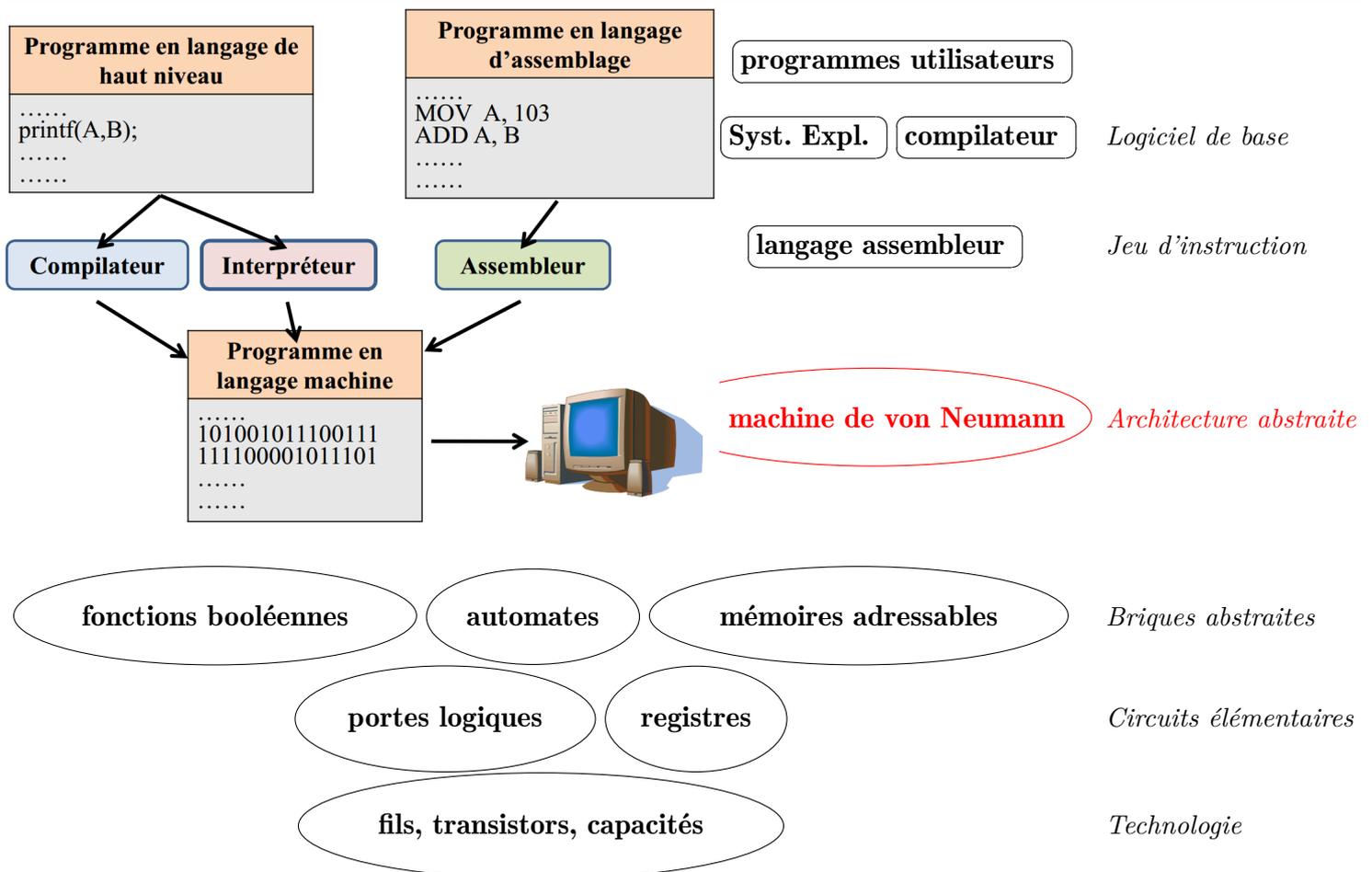
C'est génial car cela permet par exemple

- le **système d'exploitation** : un programme qui prend un paquet de données sur un disque dur, les met en mémoire, et ensuite décide que ces données forment un programme, et exécute ce programme.
- le **compilateur** qui prend un texte (des données) et le transforme en un programme...



La mémoire est un ensemble de cases mémoires "type-agnostiques" : non typées, dans chaque case on met une information qui peut être interprétée de multiples manières.. La mémoire est adressable par **mot** (de 8, 16, 32 ou 64 bits de nos jours) elle est de l'ordre de  $10^9$ , ou  $2^{30}$  mots.

Selon le paradigme *diviser pour régner*, on est capable de construire l'objet très complexe qu'est votre ordinateur par assemblage d'objets plus simples. Au passage, on utilise différents formalismes (ou différentes abstractions) pour le calcul (arithmétique binaire, fonctions booléennes, ...), pour la maîtrise des aspects temporels (mémoires, automates, ...), pour les communications (protocoles)...



## L'architecture interne des microprocesseurs

Un **microprocesseur** est constitué d'un morceau de silicium dopé. C'est donc un ensemble de millions de transistors.

- ↪ Wafer : Galette de plusieurs processeurs
- ↪ 1 processeur : quelques millimètres carrés

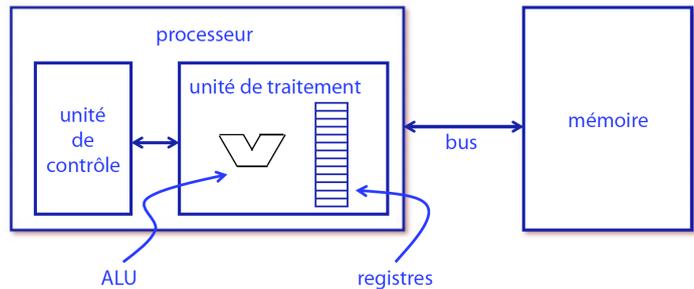


**⚠** Chaque processeur définit :

- Un jeu d'instructions qu'il sait exécuter
- Des modes d'adressage : manières ou chemins d'accès à l'adresse effective immédiat / direct ou absolu / indirect / indexé

Un microprocesseur est construit autour de deux éléments principaux :

- Une unité de commande
- Une unité de traitement



Unité Centrale ou processeur (*Central Processing Unit CPU*)

Actuellement, d'autres types d'architecture (5<sup>e</sup> génération, machines systoliques, ...) utilisant massivement le parallélisme permettent d'améliorer notablement la vitesse des calculs. On peut conjecturer que dans l'avenir, d'autres paradigmes de programmation spécifiques à certaines applications induiront de nouvelles architectures.

**⚠** L'unité de commande est chargée de la reconnaissance des instructions et de leur exécution par l'unité de traitement au rythme de l'horloge.

Cerveau de l'ordinateur, le processeur exécute séquentiellement les instructions stockées en Mémoire Centrale.

Le **traitement d'une instruction** se décompose en 3 temps : **chargement - décodage - exécution**

C'est l'unité de commande qui ordonnance l'ensemble, tandis que l'UAL exécute des opérations telles que l'addition, la rotation, la conjonction..., dont les paramètres et résultats sont stockés dans les registres (mémoires rapides).

**⚠** Le processeur réalise le cycle de von Neumann

- ① Lire une case mémoire d'adresse PC (envoyer l'adresse à la mémoire, et recevoir en retour la donnée à cette adresse).
- ② Interpréter cette donnée comme une instruction, et l'exécuter
- ③ Ajouter 1 à PC (PC : *Program Counter*)
- ④ Recommencer

**La fréquence de votre ordinateur favori, c'est la fréquence à laquelle il exécute ce cycle.  $\approx 10^9$  fois/seconde**

Le CPU fait une **boucle sans fin** pour exécuter le programme chargé en mémoire centrale

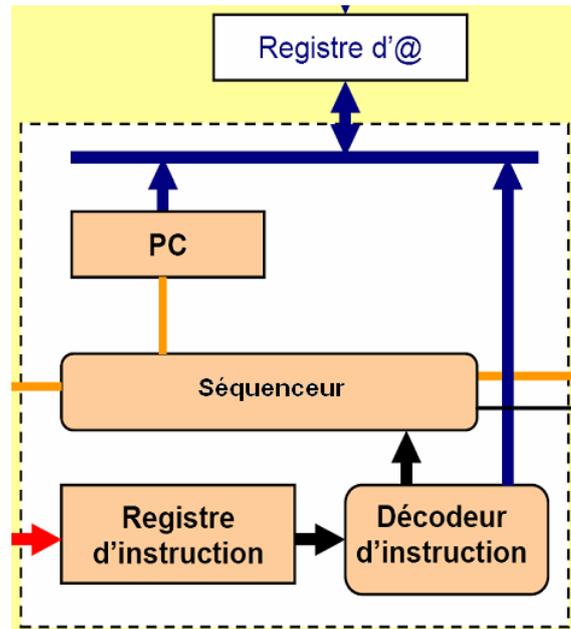
- Chaque étape correspond à une modification d'un composant du chemin de données (la mémoire ou les registres)
- Les étapes dépendent de l'instruction à exécuter : opération à effectuer et mode d'adressage
- Quelle que soit l'architecture, on retrouve des étapes similaires (même fonction) mais les étapes dépendent du chemin de données.

## L'unité de commande

Elle permet de **séquence** le déroulement des instructions. Elle effectue la recherche en mémoire de l'instruction, le décodage de l'instruction codée sous forme binaire. Enfin elle pilote l'exécution de l'instruction.

### Les blocs de l'unité de commande :

1. Le compteur de programme (PC : *Program Counter*) appelé aussi *Compteur Ordinal* (CO) est constitué par un registre dont le contenu est initialisé avec l'adresse de la première instruction du programme. Il contient toujours l'adresse de la prochaine instruction à exécuter.
2. Le registre d'instruction et le décodeur d'instruction : Chacune des instructions à exécuter est transféré depuis la mémoire dans le registre instruction puis est décodée par le décodeur d'instruction.
3. Bloc logique de commande (ou séquenceur) : Il organise l'exécution des instructions au rythme d'une horloge. Il élabore tous les signaux de synchronisation internes ou externes (bus de commande) du microprocesseur en fonction de l'instruction qu'il a à exécuter. Il s'agit d'un automate réalisé de façon microprogrammée.

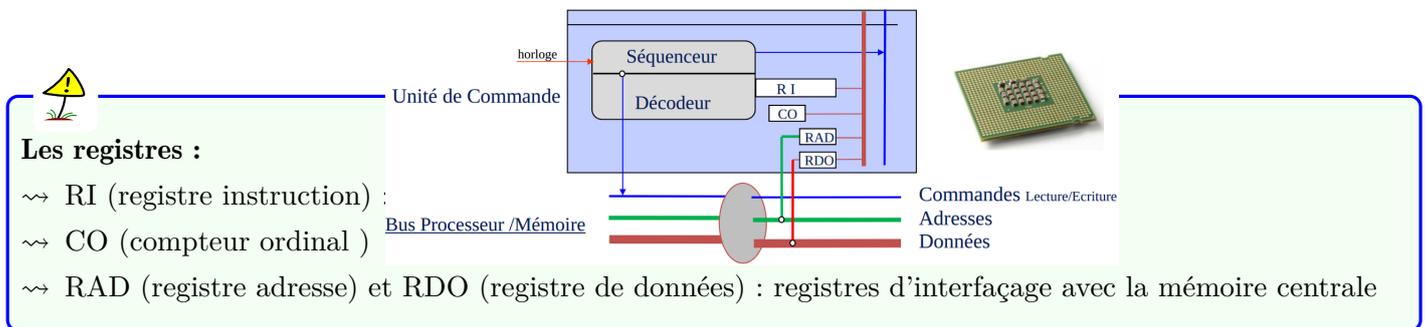


**Algorithme 1 :** L'unité de Commande exécute l'algorithme suivant :

#### répéter

- ↪ ① charger dans RI l'instruction stockée en MC à l'adresse pointée par le CO ;
- ↪ ②  $CO \leftarrow CO + \text{taille}(\text{instruction en RI})$  ; **CO pointe sur la prochaine instruction à exécuter ;**
- ↪ ③ décoder (RI) en micro-instructions ; **RI contenant l'instruction en cours d'exécution ;**
- ↪ ④ (*localiser en mémoire les données de l'instruction*) ; **Recherche d'opérandes ;**
- ↪ ⑤ (*charger les données*) ;
- ↪ ⑥ exécuter l'instruction (suite de micro-instructions) ;
- ↪ ⑦ (*stocker les résultats mémoires*) ;

jusqu'à l'infini



#### Les registres :

- ↪ RI (registre instruction) :
- ↪ CO (compteur ordinal) :
- ↪ RAD (registre adresse) et RDO (registre de données) : registres d'interfaçage avec la mémoire centrale

Lors du décodage les valeurs sont stockées dans des registres internes (registre d'opérande et de données). Des **registres d'adresse** (index ou bases) permettent de stocker les adresses des données en mémoire centrale. Lors du démarrage de la machine, CO est initialisé soit à l'adresse mémoire 0 soit à l'adresse correspondant à la fin de la mémoire ( $2^m - 1$ ). À cette adresse, se trouve le moniteur en mémoire morte qui tente de charger l'amorce "boot-strap" du système d'exploitation.

**Remarquons que cet algorithme peut parfaitement être simulé par un logiciel (interpréteur).**

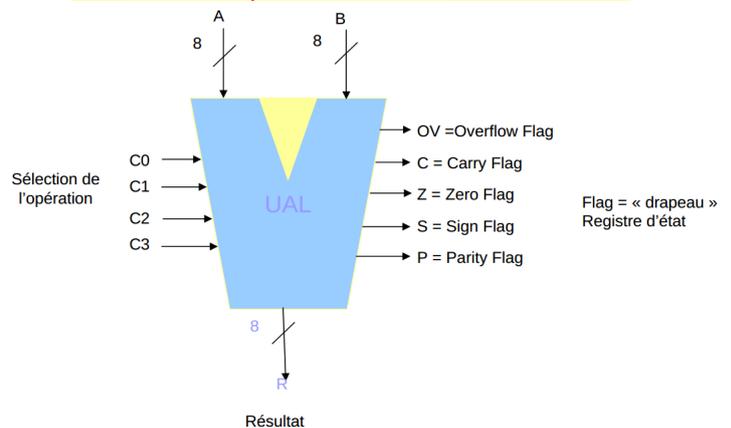
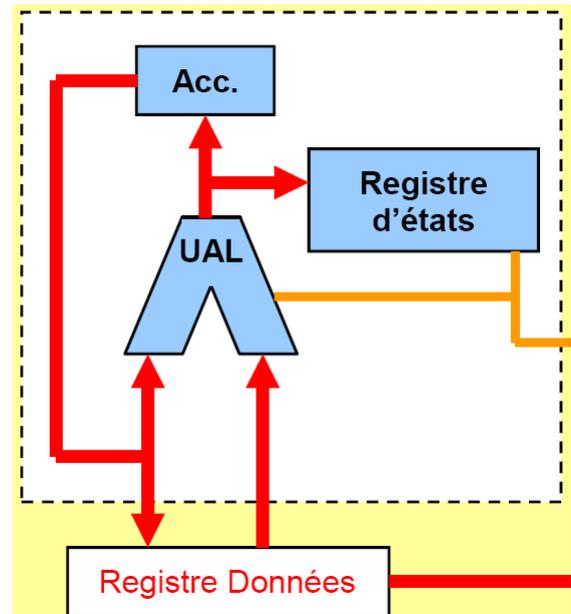
Ceci permet de tester des processeurs matériels avant même qu'il en soit sorti un prototype, ou bien de simuler une machine X sur une machine Y (émulation).

## L'unité de traitement

Elle regroupe les circuits qui assurent les traitements nécessaires à l'exécution des instructions

### Les blocs de l'unité de traitement :

1. Les **accumulateurs** sont des registres de travail qui servent à stocker une opérande au début d'une opération arithmétique et le résultat à la fin de l'opération.
2. L'**Unité Arithmétique et Logique (UAL)** est un circuit complexe qui assure les fonctions logiques (ET, OU, Comparaison, Décalage, etc...) ou arithmétique (Addition, soustraction...).
3. Le registre d'état est généralement composé de 8 bits à considérer individuellement. Chacun de ces bits est un indicateur dont l'état dépend du résultat de la dernière opération effectuée par l'UAL.

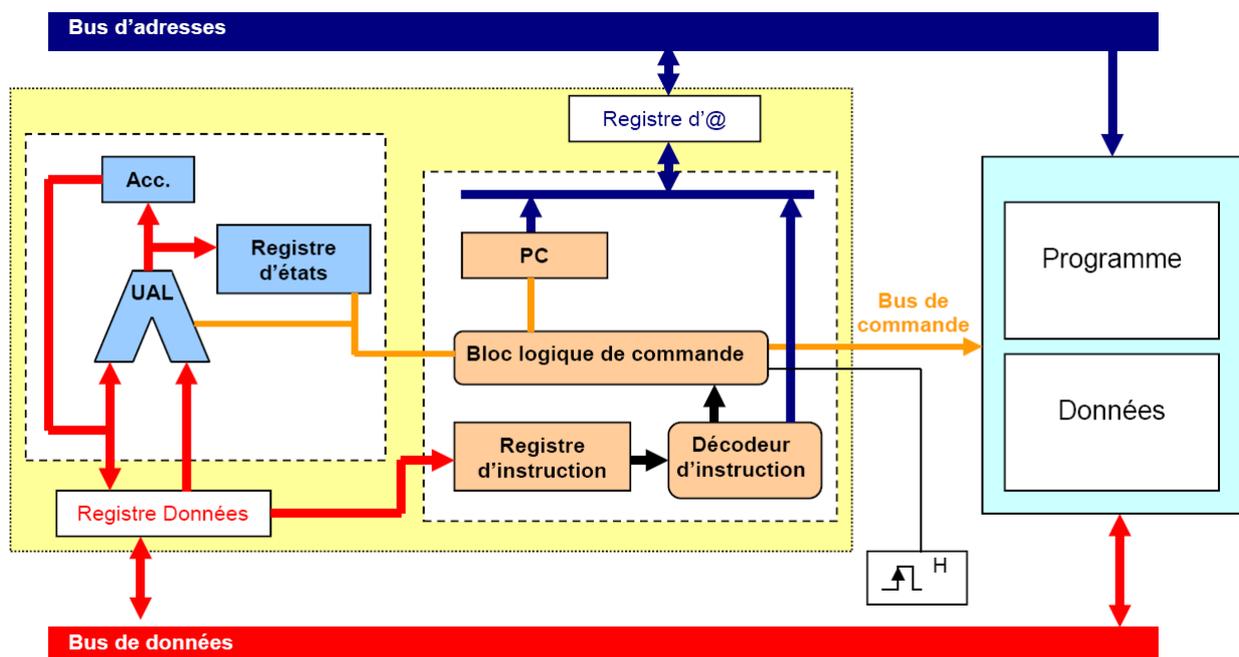


On les appelle indicateur d'état ou flag ou drapeaux. Dans un programme le résultat du test de leur état conditionne souvent le déroulement de la suite du programme.

On peut citer par exemple les indicateurs de :

- Retenue (carry : C)
- Débordement (overflow : OV ou V)
- Zéro (Z)
- ...

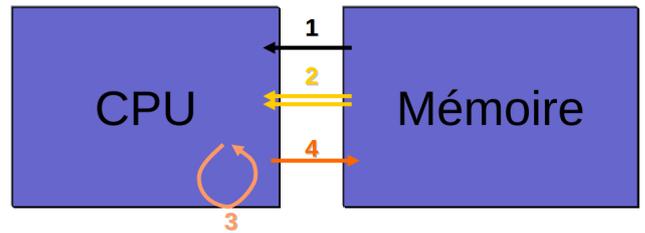
## Architecture interne complète



Rappels :

 le fonctionnement basique d'une opération de calcul

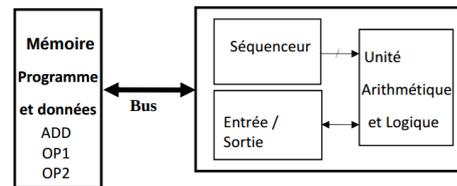
- (1) Charger une instruction depuis la mémoire
- (2) Charger les opérands depuis la mémoire
- (3) Effectuer les calculs
- (4) Stocker le résultat en mémoire



L'architecture de von Neumann s'oppose à celle dite de Harvard (Mark I).

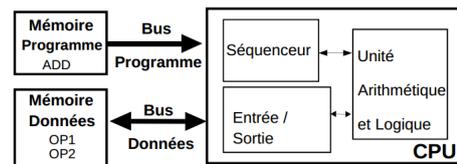
L'architecture von Neuman

- ↪ Un seul chemin d'accès à la mémoire
  - Un bus de données (programme et données),
  - Un bus d'adresse (programme et données)
- ↪ Architecture des processeurs d'usage général
- ↪ Goulot d'étranglement pour l'accès à la mémoire



L'architecture Harvard

- ↪ Séparation des mémoires programme et données
  - Un bus de données programme,
  - Un bus d'adresse programme,
  - Un bus de données pour les données,
  - Un bus d'adresse pour les données.
- ↪ Meilleure utilisation du CPU :
  - Chargement du programme et des données en parallèle



 Avec une architecture de type Harvard, les données et les instructions sont stockées dans des mémoires différentes et utilisent des bus différents. Cela rend les ordinateurs de type Harvard plus rapides car ils sont capables de lire en même temps une instruction et une donnée, alors qu'avec une architecture de type von Neumann, on peut soit lire une instruction, soit lire/écrire une donnée.

**Pour info :** les DSP (Digital Signal Processors) ou Processeurs de Signal Numérique sont des circuits électroniques spécialisés dans les calculs complexes et reposent sur une architecture de type Harvard. Ils sont notamment utilisés pour le traitement des données audio et vidéo.

Le traitement des instructions

 **Organisation d'une instruction** Le microprocesseur ne comprend qu'un certain nombre d'instructions qui sont codées en binaire. Une instruction est composée de deux éléments :

- ↪ Le **code opération** : c'est un code binaire qui correspond à l'action à effectuer par le processeur
- ↪ Le **champ opérande** : donnée ou bien adresse de la donnée.

La taille d'une instruction peut varier, elle est généralement de quelques octets (1 à 8), elle dépend également de l'architecture du processeur.

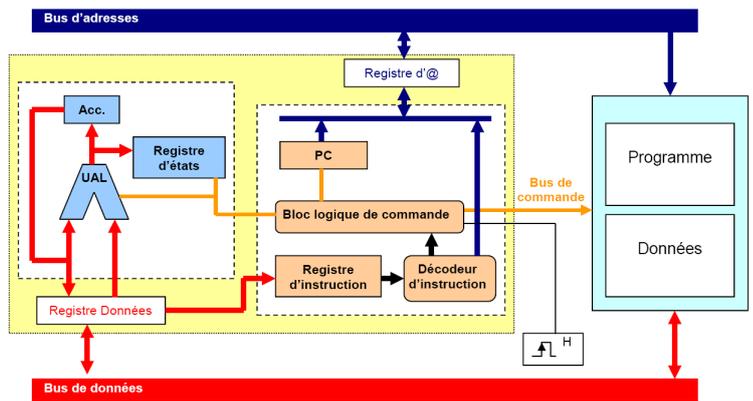
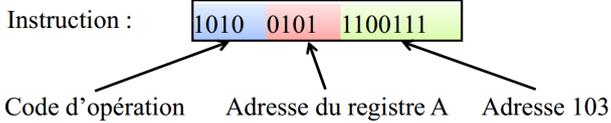
Exemple d'instruction : Instruction Addition

Correspond à l'instruction ADD A, #2 comprise par le processeur par le mot binaire : 11001 000 0000 0010 = code machine

Accumulateur = Accumulateur + Opérande

Instruction (16 bits)	
Code opératoire (5 bits)	Champ opérande (11 bits)
ADD A	#2
11001	000 0000 0010

Langage machine	Langage d'assemblage	Commentaire
101001011100111	MOV A,103	transférer le contenu de l'adresse 103 à A
111100001011101	ADD A,B	ajouter le contenu de A à B



• Phase 1 : Recherche de l'instruction en mémoire

- ↪ La valeur du PC est placée sur le bus d'adresse par l'unité de commande qui émet un ordre de lecture.
- ↪ Après le temps d'accès à la mémoire, le contenu de la case mémoire sélectionnée est disponible sur le bus des données.
- ↪ L'instruction est stockée dans le registre d'instruction du processeur.

• Phase 2 : Décodage et recherche de l'opérande

- ↪ L'unité de commande transforme l'instruction en une suite de commandes élémentaires nécessaires au traitement de l'instruction.
- ↪ Si l'instruction nécessite une donnée en provenance de la mémoire, l'unité de commande récupère sa valeur sur le bus de données.
- ↪ L'opérande est stocké dans le registre de données.

• Phase 3 : Exécution de l'instruction

- ↪ Le séquenceur réalise l'instruction.
- ↪ Les drapeaux sont positionnés (registre d'état).
- ↪ L'unité de commande positionne le PC pour l'instruction suivante.

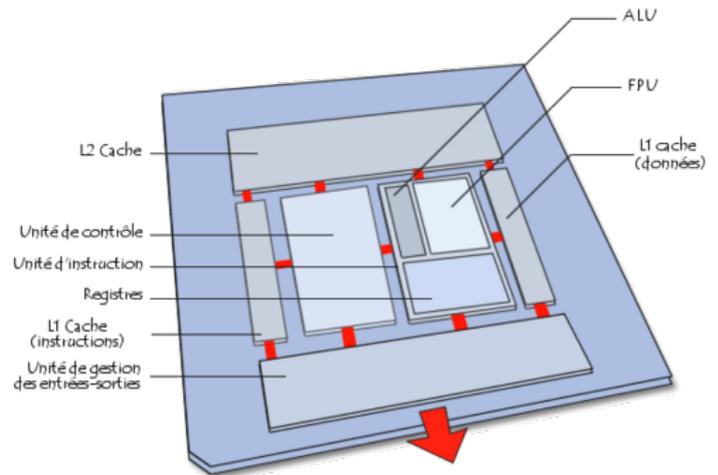
Les architectures RISC et CISC

Actuellement l'architecture des microprocesseurs se composent de deux grandes familles :

Architecture RISC	Architecture CISC
<ul style="list-style-type: none"> <li> instructions simples ne prenant qu'un seul cycle</li> <li> instructions au format fixe</li> <li> décodeur simple (câblé)</li> <li> beaucoup de registres</li> <li> peu de modes d'adressage</li> <li> compilateur complexe</li> </ul> <p><b>Reduced Instruction Set Computer</b> Au programmeur d'optimiser le code</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li> instructions complexes prenant plusieurs cycles</li> <li> instructions au format variable</li> <li> décodeur complexe (microcode)</li> <li> peu de registres</li> <li> beaucoup de modes d'adressage</li> <li> compilateur simple</li> </ul> <p><b>Complex Instruction Set Computer</b> C'est le compilateur qui optimise</p>

## Composition d'un cœur (noyau de calcul du processeur)

- **Unité de commande** : permet de séquencer les instructions
- **Unité Arithmétique et Logique (UAL)**, calculs arithmétiques élémentaires sur des nombres entiers et opérations logiques
- **Unité de calcul en virgule flottante (Floating Point Unit - FPU)** : traitement des calculs sur des nombres à virgule
- **Registres** : mémoires de petite taille (quelques octets) très rapides
- **Mémoires caches** : diminuent les temps d'accès à la mémoire



## Caractéristiques d'un processeur

- **Nombre de cœurs** : le processeur peut intégrer plusieurs noyaux de calcul appelés cœurs
- **Fréquence d'horloge** : vitesse de fonctionnement du processeur = nombre de cycles que le processeur est capable d'effectuer par seconde  
Cycle = plus petite unité de temps au niveau du processeur.  
Chaque opération/instruction nécessite au minimum un cycle, et plus souvent plusieurs.  $1\text{GHz} = 10^9 \text{ Hz} = 10^9 \text{ cycle/s}$
- **Jeu d'instructions** : ensemble des opérations qu'un processeur peut exécuter (+, -, ×, /, sin, ...)
- **Largeur (32 ou 64 bits)** : notamment du bus de données et des registres internes.  
Bon indicateur de la quantité d'informations que celui-ci peut gérer en un temps donné

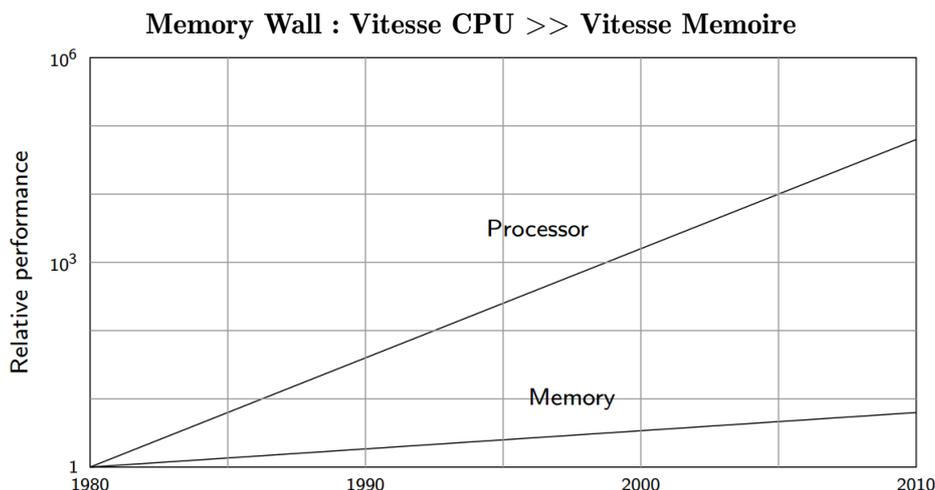


**Adressage mémoire** - Les processeurs 32 bits ne peuvent pas adresser plus de 4 gigaoctets ( $2^{32}$ ) de mémoire centrale, tandis que les processeurs 64 bits peuvent adresser 16 exaoctets ( $2^{64}$ ) de mémoire.

## Flops et performance du processeur

- La performance s'exprime en opérations à virgule flottante par seconde = *F*loating point Operations Per Second
- **Puissance crête** (point de vue théorique) : mesure les performance des **unités de calcul en virgule flottante** (FPU) contenues dans le cœur.
- D'un **point de vue pratique**, la puissance d'une machine dépend de l'**ensemble de ses composants** : accès mémoire - vitesse des bus - système d'exploitation - charge de la machine

## La mémoire : élément très pénalisant !





**bit et octet**

bit (b) : *binary digit*, plus petite unité d'information d'un composant en informatique. Vaut 0 ou 1.  
 octet (o) ou *byte* (B) = composé de 8 bits 1ko = 1000 octets, 1kibio = 2<sup>10</sup> octets = 1024 octets = 8192 bits

**Bande passante : Débit d'informations**

Mesurée généralement en octets (byte) par seconde (o/s, ou B/s) ou en bits par seconde (bit/s ou bps)

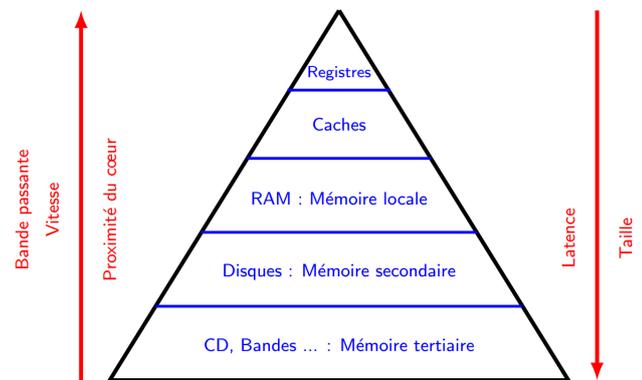
**Latence**

Temps minimum d'établissement de la connexion : indépendant de la quantité de données à transporter.  
 Mesurée généralement en secondes

**Différents types de mémoires**

- **Cache** : petite mémoire interne processeur en accès très rapide
- **RAM** : Mémoire centrale de l'ordinateur, située sur la carte mère. Mémoire vidangée à chaque reboot.
- **Disque dur** : Stockage des données, sauvegarde au long terme.
- Quelques ordres de grandeurs :

Type	Taille	Vitesse	Coût/bit
Registre	< 1 KB	< 1 ns	\$\$\$\$
SRAM On-chip	8 KB - 6 MB	< 10 ns	\$\$\$
SRAM Off-chip	1 MB - 16 MB	< 20 ns	\$\$
DRAM	64 MB - 1 TB	< 100 ns	\$
Flash	64 MB - 32 GB	< 100 s	c
Disk	40 GB - 1 PB	< 20 ms	~ 0

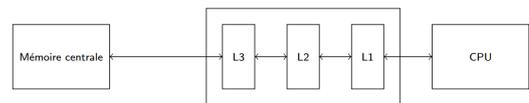


**Accès mémoire : problématique**

**Memory wall** : L'accès aux données est un des principaux facteurs limitant la performance

**Quels facteurs influencent les performances des accès mémoires ?**

- **Localisation** : cache, RAM, disque ?
- **Manière** dont on y accède :
  - au travers d'un chipset (jeu de composants électroniques qui permet le contrôle des échanges d'informations)
  - directement par le processeur
  - via le processeur voisin ...(?)



**Principes de localité**

**Plus une donnée est proche du processeur, plus elle est accessible rapidement.**

- **Localité spatiale** : Lorsqu'un programme accède à une donnée ou à une instruction, il est probable qu'il accèdera ensuite aux données ou instructions **voisines**
- **Localité temporelle** : Lorsqu'un programme accède à une donnée ou à une instruction, il est probable qu'il y accèdera à nouveau dans un **futur proche**



Lorsque le processeur tente d'accéder à une information (instruction ou donnée) - Si l'information se trouve dans le cache (**hit**), le processeur y accède sans état d'attente, sinon (**miss**) le cache est chargé avec un bloc d'informations de la mémoire (~ 1 ms).

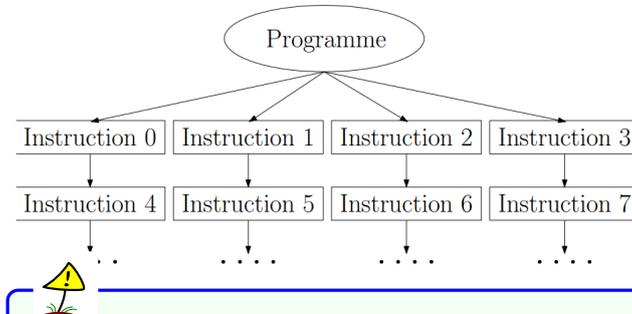
**Fonctionnement des caches**

- Le cache est divisé en **lignes (ou blocs) de mots**
- 2 niveaux de granularité :
  - le CPU travaille sur des mots (par ex 32 ou 64 bits)
  - les transferts mémoire se font par ligne (ou bloc, par ex 256 octets)
- Exploitation de la **localité spatiale** : le cache contient des copies des mots par ligne de cache
- Exploitation de la **localité temporelle** : choix judicieux des lignes de cache à retirer lorsqu'il faut rajouter une ligne à un cache déjà plein

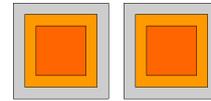
## Concept : calcul séquentiel

- **Calcul séquentiel** : Les instructions (et accès mémoires) s'exécutent les unes après les autres.
- **Conjecture de Moore** : "La puissance double tous les 18 mois!"
  - Limitation 1 : consommation
  - Limitation 2 : miniaturisation  $\implies$  gravés à 14nm ( $\approx$  100 atomes)  $\implies$  les coûts explosent!

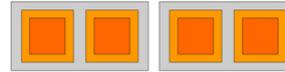
## Concept : Architecture parallèle



Les systèmes multiprocesseurs consomment beaucoup d'énergie et dégagent beaucoup de chaleur.



2 processeurs non multicœurs, chacun occupant un support.



2 processeurs, chacun multicœur, chacun occupant un support.

**Calcul parallèle** : Ensemble de techniques logicielles et matérielles permettant l'exécution simultanée de séquences d'instructions indépendantes, sur des processeurs différents.

Un ordinateur multiprocesseur est doté de plusieurs processeurs  $\rightarrow$  une forme d'architecture parallèle.

## Pourquoi paralléliser ?

- **Grands challenges** : météo et climat- biologie - géophysique - astrophysique - chimie - nucléaire
- **Applications commerciales** : bases de données parallèles - exploration pétrolière - moteurs de recherche web - réalité virtuelle

- Traiter des problèmes plus grands et/ou plus complexes.
- Mais aussi exploiter les architectures actuelles!

La multiplication du nombre d'unités de calcul ne divise pas spontanément le temps d'exécution des programmes !

## Classification de Flynn

Les programmes et les architectures sont classés selon le type d'organisation du flux de données et du flux d'instructions.

— 2 états possibles pour chacune : "single" ou "multiple"

SISD <i>Single Instruction, Single Data</i> $\implies$ machines séquentielles	SIMD <i>Single Instruction, Multiple Data</i> $\implies$ processeurs vectoriels, GPU
MISD <i>Multiple Instruction, Single Data</i> $\implies$ rare	MIMD <i>Multiple Instruction, Multiple Data</i> $\implies$ multiproc, multicores

- **SISD** : architecture séquentielle avec un seul flot d'instructions, un seul flot de données, exécution déterministe.
- **MISD** : un seul flot de données alimente plusieurs unités de traitement
  - $\implies$  unités de traitement indépendantes
  - $\implies$  instructions indépendantes     Ex : exécution en // de plusieurs algos de cryptographie pour le décodage d'un même message.
- **SIMD** architecture //
  - $\implies$  même instruction
  - $\implies$  données différentes

Exemple : rameurs.
- **MIMD** architecture la plus courante.
  - $\implies$  instructions indépendantes
  - $\implies$  données différentes

Exemple : équipe foot

## La carte mère

Comme le montre le schéma de l'architecture de von Neumann, on doit organiser la communication entre trois éléments principaux que sont : le processeur - la mémoire - les entrées/sorties (périphériques)



L'interconnexion des différents composants et périphériques est réalisée de nos jours grâce à la carte mère. La carte mère est un circuit imprimé qui permet de mettre en contact physique les différents composants et périphériques. Elle représente une sorte d'ossature sur laquelle viennent se connecter (greffer) les composants.

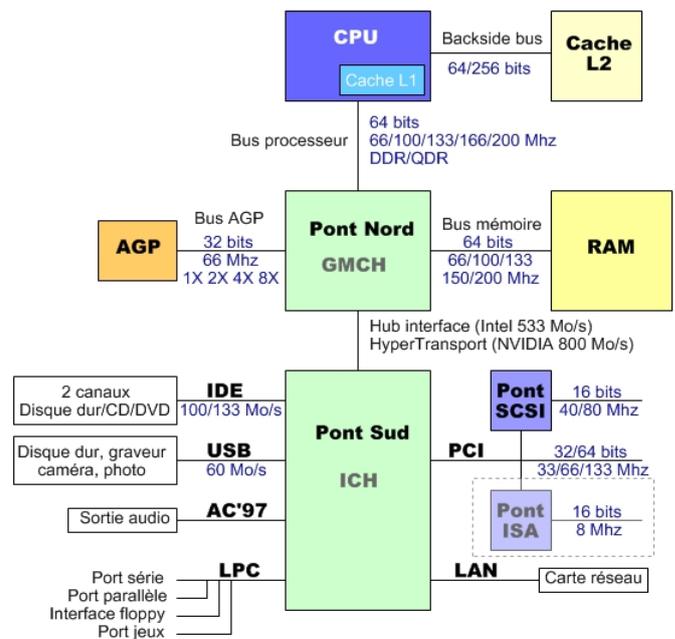
Les cartes mères actuelles se décomposent en 2 parties :

↪ le **pont nord** (encore appelé **northbridge** ou GMCH pour *Graphics and Memory Controller Hub*) chargé de gérer les composants qui ont besoin d'une bande passante importante :

- microprocesseur
- mémoire vive (RAM)
- carte graphique

↪ le **pont sud** (appelé **southbridge** ou ICH pour *Input/Output Controller Hub*) chargé de gérer les périphériques qui ont besoin d'une faible bande passante :

- clavier, souris, audio
- port parallèle, port série
- périphériques USB, FireWire
- réseau
- disques durs, CD/DVD Rom



Vue schématique d'une carte mère de type Intel (2004)



**Chipset** : L'un des éléments principaux de la carte mère, c'est un circuit électronique qui contrôle et régule les échanges de données entre les divers composants de la carte mère.

**Socket** : Support pour circuit intégré et notamment pour le microprocesseur qui permet de le relier électriquement à la carte mère sans le souder.

↪ [Architecture d'un ordinateur](#) + [Apprenez à monter votre ordinateur](#)

## Conclusion

Ce qu'il faut savoir faire à l'issue de cette partie :



- Présenter les concepts généraux du modèle d'architecture séquentielle (von Neumann)
- Distinguer les rôles et les caractéristiques des différents constituants d'une machine.
- Distinguer les architectures monoprocesseur et les architectures multiprocesseur.