

FONCTIONNEMENT DE L' ORDINATEUR

Date : Octobre 2005

But : Quelle image de la société et de l'homme véhicule l'objet ordinateur? Comment fonctionne-t-il?

Statut du document : Assemblages simples d'extraits glanés sur Internet (ressources disponibles en fin de chapitre) et sur quelques livres.

Pour toutes remarques : abel.jerome@free.fr

Quelques pionniers : Von Neumann (architecture machine), Shannon (binaire/contacteurs, théorie de l'information), Norbert Wiener (cybernétique), Turing (machine universelle), Babbage et Ada Lovelace (machine analytique), Vannevar Bush (memex).

Un objet porteur de sens

Le projet cybernétique

Au-delà des prouesses techniques et de l'ingéniosité du système, que nous allons aborder par la suite, les idées qui portent le développement de l'ordinateur se retrouvent essentiellement dans le projet cybernétique. Un projet mené presque exclusivement par des scientifiques. Ces derniers ont joué depuis la révolution industrielle une importance de plus en plus grande dans la transformation de la société à travers la technique. Les effets de la cybernétique sont visibles dans l'émergence de nouveaux domaines de recherches et d'application comme la systémique, la théorie de la communication et de l'information, l'intelligence artificielle, la bio-informatique, la robotique, etc... Tous ces domaines en imbriquent d'autres qui s'interpénètrent, comme l'économie, l'art, la philosophie et bien entendu la politique. La société occidentale, et maintenant le monde, dans son ensemble ont été transformés. Il est néanmoins important de noter le malentendu souvent volontaire qui enveloppe ces idées pour justifier une idéologie du progrès, avec un arrière goût amer de totalitarisme.

Pour un panorama plus détaillé de la cybernétique et de son rapport avec la société :

<http://www.terminal.sgdg.org/articles/61/identitespouvoirsacroix.html>

<http://perso.wanadoo.fr/metasytems/Cybernetics.html>

La cybernétique : Une nouvelle science

"(...) le mot cybernétique, que j'ai fait dériver du mot grec kubernetes, ou "pilote", le même mot grec dont nous faisons en fin de compte notre mot "gouverneur". Par ailleurs, j'ai trouvé par la suite que ce mot avait été déjà employé par Ampère en référence à la science politique, et qu'il avait été introduit dans un autre contexte par un savant polonais, cet emploi, dans les deux cas, datant des premières années du XIXe siècle."(extrait de la traduction française "cybernétique et société" de Norbert Wiener, 1948)(2)

"La cybernétique est une science du contrôle des systèmes, vivants ou non-vivants, fondée en 1948 par le mathématicien américain Norbert Wiener. Notre monde est

intégralement constitué de systèmes, vivants ou non-vivants, imbriqués et en interaction. Peuvent ainsi être considérés comme des "systèmes": une société, une économie, un réseau d'ordinateurs, une machine, une entreprise, une cellule, un organisme, un cerveau, un individu, un écosystème..." (1)

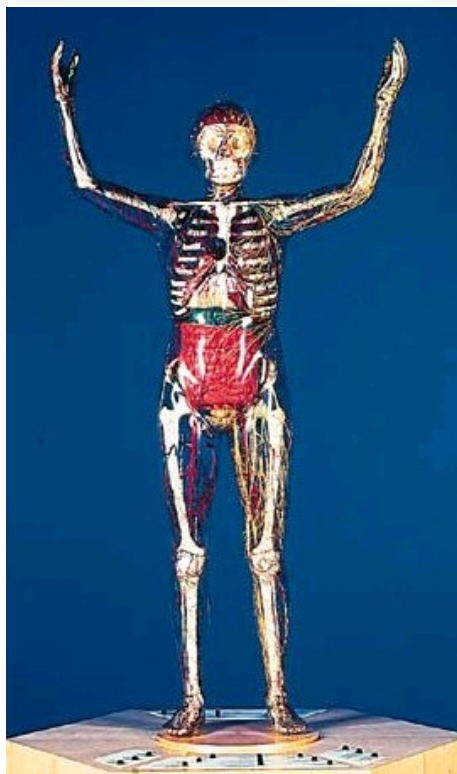
Une représentation informationnelle de l'Homme

Le but est de construire une réplique de l'homme via son cerveau et uniquement son cerveau. C'est une approche de l'homme sous l'angle presque exclusif de son intelligence, définie comme capacité à traiter et échanger de l'information, c'est-à-dire calculer et communiquer. Le **calcul** va ainsi se substituer progressivement à la perception humaine. *To compute*, "calculer", et son dérivé *computer*, ou "calculateur" sera d'ailleurs le terme anglais choisi pour désigner cette machine.

La cybernétique, c'est aussi une réflexion sur la société. Elle propose une représentation de l'Homme purement social, sans organes, vivant sans conflits dans une société autorégulée. C'est une position profondément égalitaire, une fusion de disciplines qui va à l'encontre de toutes les hiérarchies.

*"L'utopie de la communication : le mythe du village planétaire », Philippe Breton, Paris, La découverte, 1997.
"A l'image de l'homme ; du golem au créatures virtuelles", Philippe Breton, éd. du Seuil, novembre 1995.*

Malgré cela, l'usage travesti de ces idées a aussi permis l'apparition d'un nouveau type de guerre que l'on aime appeler la guerre "propre" pour se distinguer de façon illusoire de guerres plus primitives, où le contact humain était obligatoire. Ce type de guerre est à la fois une guerre à distance (missiles téléguidés, avions, ...) et une guerre de l'information et du renseignement (satellites, surveillance, cryptage, reconnaissance, médias, ...).



Modèle numérique / modèle analogique

Pour créer une machine qui tend vers une forme d'intelligence, Alan Turing et John Von Neumann (tout deux pionniers de l'informatique) l'imaginent comme un enfant qui apprendrait, donc dans le langage cybernétique, qui stockerait de l'information. Turing pense même que le siège du raisonnement se situe dans la mémoire.

Pour stocker ces informations, ils perfectionnent le modèle numérique, qui prendrait son origine du boulier chinois et par la suite, de la recherche d'un certain nombre de mathématiciens ou scientifiques géniaux tout au long de l'histoire (voir le fichier "HistoriqueOrdinateur.doc" pour avoir plus de renseignements). On peut distinguer le modèle numérique du modèle analogique de la façon suivante :

- le modèle analogique transforme une énergie en une autre, en sympathie et en continu.
- le modèle numérique transforme une énergie en une suite discontinue (ou discrète) d'états "tout ou rien".

Par exemple dans le domaine de l'enregistrement sonore, le numérique permet d'enregistrer et de dupliquer sans fin les informations, sans y ajouter de "bruits" (terminologie adoptée dans la théorie de l'information), contrairement à un enregistrement analogique.

Codage et perception

Turing et Neumann s'appuient sur une croyance : le cerveau fonctionnerait sur un mode discret, par "changements d'états successifs". Neumann est persuadé que les tubes à vide peuvent constituer un strict équivalent aux neurones humains. La perception peut, effectivement, être considérée comme une transformation d'évènements continus en évènements discontinus. Par exemple, en deçà du seuil d'audition, en dessous de 20 Hz, dans le domaine des infrasons, l'oreille cesse de percevoir une vibration continue, pour la remplacer par une série de pulsations discrètes.

Les sensations ne sont pourtant pas linéaires et toutes égales, on dit qu'elles sont liées aux phénomènes physiques par des lois logarithmiques. Toute perception est relative, elle dépend de l'âge, de l'expérience, de l'attention, et de bien d'autres paramètres. Il est commun de dire par exemple que la sensation de temps est élastique. Emile Leipp précise, à propos de l'audition, que "contrairement à ce qui est encore soutenu couramment, et l'expérience le montre bien, le système auditif humain n'est pas un système d'analyse spectrographique et de mesure. Aucun auditeur au monde n'est capable de dire : "tel son à 972 Hz, 87 dB, 35 harmoniques, ce son dure 98 ms, etc..." Notre intelligence ne fonctionne pas comme un mécanisme infallible et objectif. Turing l'avait compris : "Si une machine n'a pas le droit à l'erreur, on ne peut attendre d'elle qu'elle soit intelligente".

"L'utopie de la communication : le mythe du village planétaire », Philippe Breton, Paris, La découverte, 1997.

"A l'image de l'homme ; du golem au créatures virtuelles", Philippe Breton, éd. du Seuil, novembre 1995.

« Acoustique et musique », Emile Leipp, 1989, éd. Masson.

La sensation de continuité de notre perception ne serait qu'une illusion, comme l'illusion du mouvement au cinéma, le modèle discret serait dans la structure même de l'univers ! Comme le décrit Albert Jacquart : "La physique quantique, développée à partir d'une hypothèse proposée par Max Planck en 1900, a pris en compte le caractère « granulaire » de la plupart des caractéristiques décrivant le monde réel. La longueur, la masse, et même la durée ne peuvent être non seulement mesurées mais définies en dessous d'un certain seuil : compte tenu de la nature même de notre univers, aucune longueur plus petite que $1,6 \cdot 10^{-33}$ cm, aucune masse inférieure à $2,2 \cdot 10^{-5}$ grammes, aucune durée moindre que $5 \cdot 10^{-44}$ secondes ne peut avoir d'existence. Il ne s'agit pas d'une limite technique provisoire que des progrès dans la précision de nos instruments permettraient de repousser, il s'agit de la structure même de la réalité du monde où nous vivons." (*Albert Jacquart, la Science à l'usage des non scientifiques, p148*)

La clé : Boole - binaire - interrupteurs

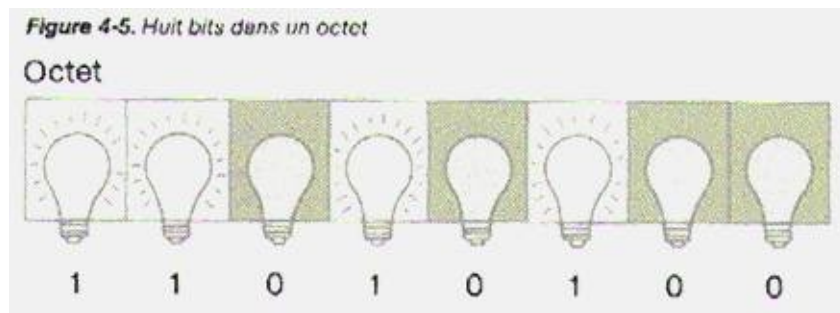
L'idée géniale est énoncée par Claude Shannon entre 1937 et 1938, dans la thèse qu'il présenta au M.I.T (*Massachusetts Institute of Technology*) de Boston. Il y démontra comment l'algèbre de Boole pourrait être utilisé dans l'analyse et la synthèse de relais électromagnétiques (interrupteurs) (3). Il démontre qu'à l'aide de "contacteurs" fermés pour "vrai" et ouverts pour "faux" on peut effectuer des opérations logiques en associant le nombre "1" pour "vrai" et "0" pour "faux" (4). Il définit le chiffre binaire ou bit, abréviation de *Binary digiT*, autrement dit "compter avec deux chiffres" pour nommer la plus petite unité manipulable, le 0 ou le 1.

Ainsi, il combine les découvertes de Boole, les nombres binaires et les circuits électriques. Il crée un pont entre deux mondes, entre le raisonnement humain à travers la logique booléenne, et la matière physique à travers la manipulation d'interrupteurs électriques puis électroniques.

Pourquoi avoir choisi la base 2 ?

* La base 2 présente l'avantage d'être aisément transcrite physiquement. Il suffit en effet d'un seul composant qui joue le rôle d'interrupteur pour pouvoir l'utiliser. Cette simplification permet un coût matériel et énergétique minimal. Par contre, il faut la compenser avec un nombre important de composants.

Par exemple, un des premiers ordinateurs, l' *ENIAC* en 1946 était composé de 19000 tubes à vides remplissant le rôle d'interrupteurs. Etant donné la dimension de ces tubes, la machine présente des caractéristiques impressionnantes : 42 armoires de 3m de haut, 80m² au sol, 30 tonnes !



Huit lampes (ou tubes à vide) représentant chacune 1 bit (4)

Ainsi le composant principal, la plus petite unité manipulable physiquement par le calculateur devient un enjeu important de recherche. A ces lampes succéderont au cours des années 1950, les fameux transistors, ouvrant la voie à la miniaturisation des processeurs, à leur capacité de calcul, et à la rapidité des opérations.

* Un autre avantage de la base 2 est, comme l'a démontré Shannon, que l'on peut la lier aisément à l'algèbre de Boole, aux fonctions logiques. L'algèbre de Boole se base essentiellement sur des propositions simples qui sont vérifiées ou non. On dit qu'elles sont vraies ou fausses. Il est alors possible en attribuant à "vrai" le chiffre binaire 1 et à "faux" le chiffre 0, d'utiliser toutes les propositions et organisations possibles de l'algèbre de Boole. Avec cette technique, les calculs sont considérablement simplifiés. Trois opérations de base (appelées portes logiques) AND, OR, NOT suffisent pour effectuer n'importe quelles opérations: additionner, soustraire, multiplier, diviser et comparer des nombres.

En effet, toute opération peut être décomposée par l'opération la plus simple : l'addition. Dans l'ordinateur toutes les opérations sont faites à partir de celle-ci, le calcul étant très rapide, on a l'illusion d'opérations plus complexes. Pour soustraire on ajoute un nombre négatif et pour diviser 42 par 7, l'ordinateur soustrait 7 de 42 (il additionne le négatif de 7 à 42 jusqu'à obtenir 0 et il compte le nombre de soustraction = 6). Nous verrons plus en détail le fonctionnement de la logique booléenne dans une prochaine rubrique.

Le processeur

Le processeur est considéré comme le "cerveau" de l'ordinateur, c'est lui qui effectue tous les calculs. Par le biais de ces calculs, il exécute toutes les instructions écrites dans les programmes. Les instructions sont placées en mémoire centrale suivant différents niveaux, plus ou moins proches du processeur. Il lit les instructions en mémoire centrale et la copie dans un registre ensuite il exécute les instructions, et ainsi de suite jusqu'à la dernière. Le premier microprocesseur (Intel 4004) a été inventé en 1971. Il s'agissait d'une unité de calcul de 4 bits, cadencé à 108 kHz.



Fonctionnement général

(4) Le processeur (noté CPU, pour *Central Processing Unit*) est un circuit électronique cadencé au rythme d'une horloge interne, grâce à un cristal de quartz qui, soumis à un courant électrique, envoie des impulsions, appelées « top ». La fréquence d'horloge (appelée également cycle, correspondant au nombre d'impulsions par seconde, s'exprime en Hertz (Hz). Ainsi, un ordinateur à 200 MHz possède une horloge envoyant 200 000 000 de battements par seconde. La fréquence d'horloge est généralement un multiple de la fréquence du système (FSB, Front-Side Bus), c'est-à-dire un multiple de la fréquence de la carte mère

(4) A chaque top d'horloge le processeur exécute une action, correspondant à une instruction ou une partie d'instruction. L'indicateur appelé CPI (Cycles Par Instruction) permet de représenter le nombre moyen de cycles d'horloge nécessaire à l'exécution d'une instruction sur un microprocesseur. La puissance du processeur peut ainsi être caractérisée par le nombre d'instructions qu'il est capable de traiter par seconde. L'unité utilisée est le MIPS (Millions d'Instructions Par Seconde) correspondant à la fréquence du processeur que divise le CPI.

Composants

(8) Le processeur, ainsi que la mémoire centrale (MC), sont des circuits intégrés, c'est-à-dire une ensemble de portes logiques, formées par des transistors. Ces circuits logiques ont le comportement fonctionnel de l'algèbre linéaire (algèbre de Boole). Ils sont élaborés à partir de composants électroniques primaires : les transistors. L'assemblage des transistors permet de créer des portes, qui elles-mêmes assemblées créent les circuits logiques. Un circuit logique a un comportement binaire correspondant aux deux seuls états possible du signal électrique émanant des transistors :

- 1- au signal compris entre 0 et 1 volt, on associe par exemple l'état binaire 0
- 2- au signal compris entre 2 et 5 volts, on associe par exemple l'état binaire 1

Chaque circuit logique est symbolisé par un dessin et caractérisé par une table de vérité, qui donne en fonction des entrées possibles pour le circuit, les valeurs de sortie. En fonction des données en entrée, on énumère ainsi les 2^n états possibles de la fonction.

Un transistor seul correspond à un circuit inverseur. Les autres portes (ET, OU, OU EXCLUSIF) sont obtenues en plaçant les transistors en série et/ou en parallèle

Le transistor

Le transistor fait le même travail que la lampe à vide des premiers ordinateurs mais il est infiniment plus petit, moins cher à fabriquer et beaucoup plus fiable. Les transistors et les semi-conducteurs en général vont ouvrir la voie à l'électronique, c'est-à-dire une manipulation au plus près des électrons, une évolution vers la miniaturisation des composants. (7) En dépit de son apparente "simplicité", le transistor demeure un composant assez complexe, aussi bien sur le plan théorique que pour sa mise en oeuvre. Plusieurs types de transistors : transistor à jonction bipolaire, transistor à effet de champ, transistor MOS.

(7) Inventé en 1948 par les Américains J. Bardeen, W. Brattain et W. Shockley, le transistor (contraction de *transfer resistor*, en français *résistance de transfert*) est un composant à semi-conducteur qui remplit deux fonctions vitales en électronique : celles d'amplificateur (c'est un générateur de fort courant en sortie commandé par un faible courant en entrée) et de commutateur (à la manière d'un interrupteur marche/arrêt). Ces transistors sont caractérisés par une tension de seuil, correspondant à la tension de grille qui fait la transition entre le comportement bloqué du transistor et son comportement conducteur.

Les semi-conducteurs

(7) Les **semi-conducteurs** (*Définition petit Robert*) : *conducteur électronique dont la résistance se place entre celle des métaux et celle des isolants.*

Ils sont composés de silicium et germanium pour l'essentiel, sont des corps qui, après un traitement appelé "dopage", possèdent la propriété très remarquable de se comporter comme des conducteurs électriques, **mais dans un seul sens**.

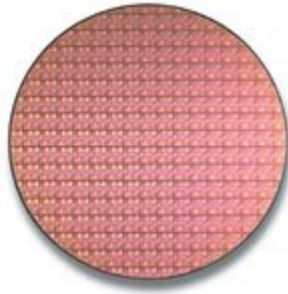
Au contraire d'un fil de cuivre, qui laisse indifféremment passer un courant dans un sens ou dans l'autre, les semi-conducteurs sont polarisés: **le courant ne peut les traverser que dans un sens prédéfini**, selon leur dopage. Il devient donc possible de contrôler très finement les flux d'électrons.

(7) Par rapport aux composants qui étaient autrefois utilisés, ils présentent au moins trois avantages décisifs:

- **un contrôle très fin et très sophistiqué de la conduction électrique, c'est-à-dire des flux d'électrons**
- **des valeurs de tension et d'intensité beaucoup plus faibles**
- **un encombrement très réduit (miniaturisation poussée)**

Méthodes de fabrication des microprocesseurs (9):

Les **processeurs** sont tous gravés sur des plaques appelées **Wafers** :



Outre la **qualité de fabrication**, les différentes séries de processeurs n'ont pas forcément la même **finesse de gravure** (mesurée en micromètres : μm). On utilise souvent le mot **micron** et son symbole μ pour désigner la finesse de gravure d'un **microprocesseur**. Les processeurs actuels sont gravés en 0.13μ et 0.09μ . Diminuer la finesse de gravure permet de produire plus de processeurs à la fois sur un Wafer et permet donc d'abaisser leur coût de fabrication. Cette technique permet également de diminuer la quantité de chaleur produite et donc d'abaisser la consommation d'énergie, ce qui permet de monter plus haut en fréquence.

Une finesse de gravure accrue permet également de loger plus de transistors dans le core (aussi appelé die) du processeur, et donc d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires tout en gardant une surface compacte.

Les architectures :

- La technique du **pipeline** : afin d'optimiser le rendement des processeurs, la technique du pipeline est apparue sur les 386 d'Intel. Le pipeline permet de commencer à traiter l'instruction suivante avant d'avoir terminée la précédente via un mécanisme de "travail à la chaîne". L'inconvénient de cette technique est que plus le pipeline est profond (contient d'étapes) plus la perte de performances est importante si une erreur de prédiction survient. L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'augmenter la fréquence du processeur plus facilement.
- L'architecture super scalaire : cette astuce consiste à doubler le nombre d'unités de traitement pour traiter plusieurs instructions par cycle.
- **L'hyperthreading** : sous ce terme un peu barbare se cache une optimisation d'Intel pour ses processeurs Pentiums 4 (à partir du core C). L'hyperthreading consiste à émuler au sein d'un seul processeur physique deux processeurs logiques, ce qui permet de gaver le processeur de plus d'instructions et améliorer son rendement.

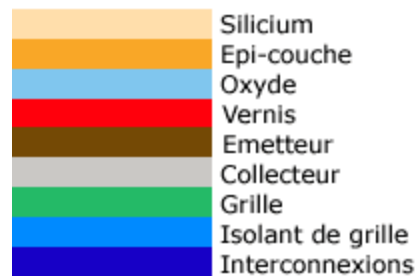
Fabrication d'un processeur





Il est possible que les premières étapes de la conception se fassent 10 ans avant la date finale de lancement du produit.

Concevoir toute une architecture coûte très cher, c'est pourquoi le fabricant de microprocesseurs décide de fixer cette architecture pour les futurs processeurs pendant X temps. L'architecture P6 a ainsi longtemps été utilisée par Intel (elle a duré plus de 10 ans avant d'être remplacée par l'architecture NetBurst du Pentium 4).

Une fois l'architecture choisie, il s'agit maintenant de développer le processeur. Et oui, **un processeur est avant tout un programme informatique**, qui ne sera réalisé "en dur" qu'une fois ce programme fini. Il y a plusieurs équipes qui participent à la conception d'un processeur (chaque équipe peut ainsi s'occuper d'une unité ou d'une zone bien précise).

- Une fois le programme réalisé, il faut le convertir en structures logiques (transistors interconnectés, portes logiques...). On vérifie ensuite toute la structure pour s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble.
- Toute cette structure est ensuite convertie en plans physiques appelés masques. Un masque est une image en noir et blanc taillée au laser sur une couche de chrome déposée sur du quartz pur. Un processeur est composé de plusieurs couches. Les couches basses accueillent les transistors et les couches hautes accueillent les interconnexions reliant les transistors. Il faut au moins un masque pour chaque couche (il en faut généralement plusieurs). Les processeurs récents nécessitent environ 25 masques.



- Tout d'abord, la pureté du wafer n'est souvent pas suffisante pour les derniers processeurs. On dépose donc une fine couche de silicium très pur par un procédé appelé **épitaxie**. La fine couche de silicium déposée s'appelle **l'épi-couche**.

- On chauffe ensuite le wafer. Une couche d'oxyde va alors se former sur sa surface. On dépose ensuite une couche de vernis photosensible. On utilisera ensuite le premier masque : là où le masque laisse passer la lumière, le vernis sera brûlé.

- Le vernis est brûlé là où le masque laisse passer la lumière. On appelle cela la **photolithographie**.

- L'oxyde est un élément qui sera souvent modifié pendant la fabrication. Ici, nous devons atteindre **l'épi-couche** et donc enlever **l'oxyde** là où a été enlevé le vernis. Pour ce faire, on réalise une **excavation au plasma** (on envoie un flux de plasma sur le wafer).

- On envoie ensuite un **flux** d'ions sur le wafer. On appelle ce processus le **dopage**. Cette technique va permettre de créer des zones chargées (appelées **collecteur** et **émetteur**, l'émetteur **émet les électrons**). La distance entre le collecteur et l'émetteur est en fonction de la **finesse de gravure du processeur**. (0.13 micron ou encore 90 nm par exemple). L'émetteur et le collecteur sont les bornes d'un transistor et laissent ou non passer le courant à la manière d'un interrupteur. On enlève ensuite la couche de vernis.



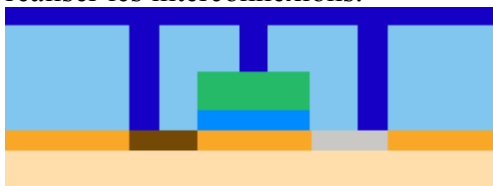
- On répète ensuite les opérations consistant à déposer une couche d'oxyde surmontée d'une couche de vernis. On utilise un nouveau masque pour fabriquer les grilles des transistors. On dépose une couche d'isolant très fine (1.2 nm chez Intel pour le prescott 90 nm) qui permettra de laisser passer le champ magnétique crée par la variation du courant traversant la porte logique mais pas le courant . Ce champ magnétique permettra au signal de passer entre l'émetteur et le collecteur. Plus l'isolant est mince et plus rapide est la commutation du transistor. Cependant, un isolant trop mince entraîne des courants de fuite (appelés leakage) qui augmentent la consommation et la température du processeur.



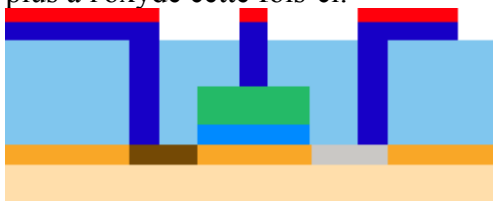
- On répète encore les étapes qui sont de déposer une couche d'oxyde surmontée d'une couche de vernis. On crée ensuite un nouveau masque destiné aux interconnexions des transistors. Ces interconnexions se font généralement en cuivre ou en aluminium.



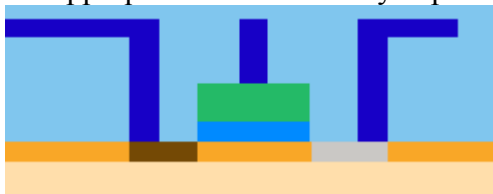
- Après avoir retiré le vernis, on remplit les trous de cuivre (ou d'aluminium) pour réaliser les interconnexions.



- On dépose une couche de vernis et on utilise un nouveau masque pour dégager les zones où le métal doit disparaître. On utilise encore un flux plasma qui ne s'attaque plus à l'oxyde cette fois-ci.



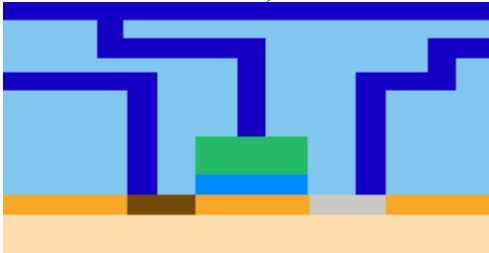
- On applique une couche d'oxyde polie.



- On dépose du vernis et on utilise encore un nouveau masque pour dégager les zones de liaisons entre deux niveaux d'interconnexions. On remplit ensuite les interconnexions.



- On répète les opérations qui consistent à appliquer une couche de vernis, brûler une partie de cette couche avec le métal constituant les interconnexions pour appliquer ensuite de l'oxyde, puis une couche de vernis suivie d'un nouveau masque. On remplit ensuite encore les interconnexions, et ainsi de suite un certain nombre de fois (7 chez Intel et 9 chez AMD).



- On inspecte ensuite les Wafers à l'aide de microscopes à Balayage. Le wafer est ensuite placé sur un appareillage permettant de tester tous les processeurs présents sur un Wafer en une seule fois. Les blocs de cache sont aussi testés et peuvent le cas échéant si une partie de ces blocs est défectueuse, servir dans des processeurs de gamme inférieure.
- Les erreurs étant courantes, des circuits redondants permettent de les éviter au maximum. On évite ainsi de désactiver le cache quand c'est possible.
- Les puces sont ensuite découpées. Elles sont prêtes à être assemblées. On place les puces dans ce qu'on appelle le packaging (qui sert de lien entre le die (core) et l'extérieur, à savoir la carte-mère via le socket).
- Le processeur est ensuite utilisable. Il va être une nouvelle fois testé pour déterminer sa fréquence maximale de fonctionnement (avec une marge d'erreur, c'est sur cette marge que l'on joue lorsqu'on pratique l' *overclocking* de son processeur). On marque ensuite le CPU en indiquant ses spécifications.
- Le processeur est ensuite fin prêt à la vente.

Echauffement

L'**échauffement** des microprocesseurs est dû au fait que les transistors pour passer d'un état "ouvert" à 5 V et un état "fermé" passent par un état supérieur à 5 Volts (???????).

(6) L'échauffement reste grosso modo et malgré l'usage de techniques de gravures de plus en plus fines, proportionnel au carré de leur tension à architecture donnée. Avec V la tension, f la fréquence, et k un coefficient d'ajustement, on peut calculer la puissance dissipée P :

- Un i686 à 500 MHz (1,1V) consommait typiquement 9W.
- Un i686 à 1 GHz (1,7V), deux fois plus rapide, consomme typiquement 34 W, ce qui n'est pas loin du quadruple.
- À 2 GHz un Opteron dissipe 107 W et un G5 55 W.

Ce problème est lié à un autre, celui de la dissipation thermique et donc souvent des ventilateurs, sources de nuisances sonores difficilement compatibles avec un environnement de bureau. Le refroidissement liquide (à eau) est proposé.

Famille de processeurs

(6) Chaque type de processeur possède son propre jeu d'instruction. On distingue ainsi les familles de processeurs suivants, possédant chacun un jeu d'instruction qui leur est propre :

- 80x86 : le « x » représente la famille. On parle ainsi de 386, 486, 586, 686, etc.
- ARM
- IA-64
- MIPS
- Motorola 6800
- PowerPC
- SPARC
- ...

Cela explique qu'un programme réalisé pour un type de processeur ne puisse fonctionner directement sur un système possédant un autre type de processeur, à moins d'une traduction des instructions, appelée **émulation**. Le terme « **émulateur** » est utilisé pour désigner le programme réalisant cette traduction.

Jeu d'instructions

(6) On appelle **jeu d'instructions** l'ensemble des opérations élémentaires qu'un processeur peut accomplir. Le jeu d'instruction d'un processeur détermine ainsi son architecture, sachant qu'une même architecture peut aboutir à des implémentations différentes selon les constructeurs.

Le processeur travaille effectivement grâce à un nombre limité de fonctions, directement câblées sur les circuits électroniques. La plupart des opérations peuvent être réalisées à l'aide de fonctions basiques. Certaines architectures incluent néanmoins des fonctions évoluées courantes dans le processeur.

En résumé, l'organisation des transistors intégrés dans les couches du processeur génère automatiquement une réponse électrique suivant l'entrée en voltage. Cette organisation suit les règles exprimées dans la logique booléenne qui permet, en mettant plusieurs petites organisations de base (appelées portes logiques) de réaliser des opérations beaucoup plus complexes.

l'ordinateur *EDSAC* développé en Angleterre. Le premier assembleur commercial s'appelle *SAP (Symbolic Assembly Program)*; il tourne sur un IBM 704 et a été mis au point par la United Aircraft Corporation.

Microsoft, en août 1979, met en marché un assembleur pour micro-ordinateur à base de microprocesseur 8080/Z80.

Exemple écrit en assembleur pour le microprocesseur Intel 8088

étiquette	mnémotique	opérande	commentaires du programmeur
PERIOD :	CALL	CONIN	;prendre un caractère du clavier
CMP	AL,	'!	;le comparer à un point
JNE	INST		;aller plus loin s'ils ne coïncident pas
RET			;s'ils coïncident, afficher le drapeau de retenue
INST :	STC		;s'ils ne coïncident pas, libérer le drapeau de retenue
RET			

(11) Contrairement aux assembleurs, un langage de haut niveau peut être utilisé sur plusieurs ordinateurs avec des modifications mineures, ce qui permet de réduire les coûts de la programmation. Ils sont plus faciles à utiliser car plus faciles à apprendre, mieux documentés et plus rapides à utiliser. Ils sont construits aussi autour de mnémoniques qui rappellent le langage naturel.

Pour plus de clarté, il est plus pratique de trouver un langage intermédiaire, compréhensible par l'homme, utilisant des abréviations faciles à mémoriser de mots courants. On les appelle des langages de haut-niveau, parce qu'ils rajoutent une couche entre le programmeur et le matériel. C'est le cas du langage C, Visual Basic, Fortran, ... qui seront ensuite transposés en langage machine pour être exploitables par le processeur.

Ainsi, le programme exprimé en langage de haut-niveau est indépendant de la machine (architecture matérielle de la machine), tandis que le langage machine est dépend du matériel. La couche intermédiaire, le système d'exploitation s'occupe de gérer et partager le matériel, elle fait l'intermédiaire entre l'utilisateur et la machine. Elle cache à l'utilisateur toutes les caractéristiques matérielles de l'ordinateur.

Base binaire

On a vu qu'au niveau le plus bas, l'ordinateur ne traitait que de l'information codées sous forme binaire. Comment s'effectuent les calculs avec la base binaire ? Un petit rappel historique.

(6) Depuis le siècle des Lumières en Europe, on utilise officiellement un système de calcul qui utilise 10 chiffres (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), on parle alors de base décimale (ou base 10).

Le système décimal a été inventé par les Indiens vers l'an 500, et nous a été apporté par les Arabes au Moyen-Âge, qui les appelèrent maladroitement les "chiffres arabes". Ce choix de 10 est un choix naturel dicté par le nombre des doigts des deux mains, ce format est largement utilisé dans la vie courante. La persistance d'autres systèmes dans l'énonciation (onze et non pas dix-et-un, quatre-vingts plutôt que huitante ou octante) ajoute à la difficulté d'apprentissage des nombres.

Toutefois dans des civilisations plus anciennes ou pour certaines applications actuelles d'autres bases de calcul ont et sont toujours utilisées :

- base sexagésimale (60), utilisée par les Sumériens. Cette base est également utilisée dans le système horaire actuel, pour les minutes et les secondes ;
- base vicésimale (20), utilisée par les Mayas ;
- base duodécimale (12), utilisée par les anglo-saxons dans leur système monétaire jusqu'en 1960 : un « pound » représentait vingt « shilling » et un « shilling » représentait douze « pences ». Le système d'heure actuel fonctionne également sur douze heures (notamment dans la notation anglo-saxonne) ;
- base quinaire (5), utilisée par les Mayas ;
- base binaire (2), utilisée par l'ensemble des technologies numériques.

* Ainsi en base 2, une addition sur 4 bits s'effectuera comme ceci : $0011 + 0001 = 0100$. La retenue de 1, que nous avons l'habitude de mettre sur le chiffre précédent à partir de 10, s'effectue cette fois à partir de 2. On remplace 2 par 0 et on ajoute 1 au chiffre précédent.

* Convertir un nombre décimal en base binaire :

Base décimal : $123 = 1 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0 = 100 + 20 + 3$

Base binaire, on soustrait aux puissances de 2 les plus fortes, à savoir sur 8 bits 128 (2^7), 64 (2^6), 32 (2^5), 16 (2^4), 8 (2^3), 4 (2^2), 2 (2^1), 1 (2^0) pour atteindre 0.

$123 - 64 = 59$;

$59 - 32 = 27$;

$27 - 16 = 11$;

$11 - 8 = 3$;

$3 - 2 = 1$;

$1 - 1 = 0$;

Donc $(123)_{10} = 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = (01111011)_2$

*(6) Longtemps l'informatique s'est singularisée par l'utilisation de différentes valeurs pour les unités du système international. Ainsi beaucoup d'informaticiens ont appris que 1 kilooctet valait 1024 octets. Or, depuis décembre 1998, l'organisme international IEC a statué sur la question (<http://physics.nist.gov/cuu/Units/binary.html>). Voici donc les unités standardisées :

- Un kilooctet (ko ou kB) = 1000 octets
- Un Mégaoctet (Mo ou MB) = 1000 ko = 1 000 000 octets

- Un Gigaoctet (Go ou GB) = 1000 Mo = 1 000 000 000 octets
- Un Téraoctet (To) = 1000 Go = 1 000 000 000 000 octets

Attention ! De nombreux logiciels (parfois même certains systèmes d'exploitation) utilisent toujours la notation antérieure à 1998 pour laquelle :

- Un kilooctet (ko) = 2^{10} octets = 1024 octets
- Un Mégaoctet (Mo) = 2^{20} octets = 1024 ko = 1 048 576 octets
- Un Gigaoctet (Go) = 2^{30} octets = 1024 Mo = 1 073 741 824 octets
- Un Téraoctet (To) = 2^{40} octets = 1024 Go = 1 099 511 627 776 octets

Conventions de représentation

Dans l'ordinateur, les données binaires occupent une certaine place dans la mémoire. Physiquement, le procédé d'enregistrement peut être différent suivant les types de mémoires.

Exemples de l'utilisation de la physique en tout ou rien (5) :

TECHNOLOGIE	Etat 0	Etat 1
Transistor n	Passant vers masse	Non passant
Transistor p	Non passant	Passant vers alim.
DRAM	Capacité déchargée	Capacité chargée
PROM	Fusible grillé	Fusible intact
Fibre optique	Pas de lumière	Lumière
Disque dur	\vec{B} non retourné	\vec{B} retourné
CD	Surface brute	Cuvette

Ces bits sont organisés en octets et en mots. Ainsi, l'ensemble des informations représentables est contraint, on ne peut pas dépasser un certain nombre de bits pour représenter un nombre ou un caractère. Les principaux types de données représentables sont les nombres, les caractères, les instructions.

Un nombre peut être entier ou flottant.

1. Un nombre à virgule flottante (ou réel, **float** en anglais) prend 4 octets. Ils sont très utilisés en audionumérique. Les nombres réels sont des nombres à virgule flottante, c-a-d un nombre dans lequel la position de la virgule n'est pas fixe, et est repérée par une partie de ses bits (appelé exposant), le reste des bits permettent de coder le nombre sans virgule (la mantisse). Cela peut être un entier décimal : 895, un nombre comportant un point: 845.32, une fraction 27/11, un nombre exponentiel : 2.75e-2 ou 35.8E+10. Un nombre flottant sera représenté par la convention IEEE 754 Simple Précision, mais nous ne l'étudierons pas ici.

2. Un nombre entier (integer ou **int** en anglais) est un nombre sans virgule, il prend 2 octets en mémoire, voir 4 pour les processeur 32 bits. Il existe deux conventions pour les représenter : la convention de la valeur signée et la convention du complément à deux.

(8) VS (valeur signée) : Le bit de poids fort sert de bit de signe et vaut 1 si le nombre est négatif, 0 sinon. Les autres bits codent la valeur absolue en binaire.

$$(124)_{10} = 64 + 32 + 16 + 8 + 4 = 1.2^6 + 1.2^5 + 1.2^4 + 1.2^3 + 1.2^2 + 0.2^1 + 0.2^0 = (1111100)_2$$

Ici, 7 bits suffisent, on l'adapte ensuite à la valeur signée. => **01111100**,
donc $(-124)_{10} = (11111100)_2$

Ensemble des nombres négatifs => 11111111 (-127) à 10000000 (-0)

Ensemble des nombres positifs => 01111111 (+127) à 00000000 (+0)

Ici, il y a deux représentations du 0

(8) Complément à deux :

Un nombre positif est représenté par sa conversion en binaire sur n bits.

Un nombre négatif est représenté par le complément à 2 de son équivalent positif.

$$\begin{array}{r}
 (+124)_{10} \quad 01111100 \\
 (-124)_{10} \quad 01111100 (+124) \\
 \quad \quad \quad 10000011 \text{ <= inversion (complément à 1)} \\
 + \quad \quad \quad 00000001 \text{ <= rajoute 1 au complément à 1 = complément à 2} \\
 \hline
 \quad \quad \quad 10000100
 \end{array}$$

Ensemble des nombres négatifs => 10000000 $(-128)_{10}$ à 11111111 $(-1)_{10}$

le -128 c'est par CONVENTION !!

Ensemble des nombres positifs => 01111111 $(+127)_{10}$ à 00000000 $(+0)_{10}$

Eventail des nombres représentables $[-128, +127] \Rightarrow [-2^p, 2^p-1]$



Le choix entre ces deux conventions se décide lors de la construction du processeur, ensuite les nombres sont automatiquement interprétés suivant cette convention. L'avantage de la convention du complément à 2 est qu'elle n'a qu'un seul 0, et qu'elle permet de faire des soustractions plus simplement car la soustraction est en fait une addition.

Cas particuliers :

$$127 + 2 = 129 \Rightarrow 01111111 + 00000010 = 10000001 \text{ (-127 et non 129)} \Rightarrow \text{OVERFLOW}$$

$$127 - 2 = 125 \Rightarrow 01111111 + 11111110 = \mathbf{1} 01111101 \text{ (résultat sur 9 bits !)} \Rightarrow \text{CARRY}$$

Ces anomalies sont mémorisées par le circuit additionneur dans des indicateurs.

RESUME

- Le rôle d'un ordinateur est d'exécuter un programme qui est issu du codage d'un algorithme. L'algorithme est l'expression d'une solution à un problème donné
- Le plus petit élément manipulable par la machine physique est le *bit*, qui ne peut prendre que les valeurs 0 et 1 (base 2)
- Toutes les informations que l'humain souhaitent voir manipulées par l'ordinateur doivent être représentées sous forme de bits. On utilise pour cela différentes conventions qui permettent d'interpréter une chaîne binaire et de lui attribuer un sens.
- L'arithmétique des ordinateurs est différente de l'arithmétique humaine : l'infini n'existe pas pour une machine.

COMPLEMENTS

(6) L' ORIGINE DU MOT ORDINATEUR:

Un **ordinateur** est un ensemble de circuits électroniques permettant de manipuler des données sous forme binaire, c'est-à-dire sous forme de [bits](#). Le mot « **ordinateur** » provient de la société *IBM France*. François Girard, alors responsable du service promotion générale publicité de l'entreprise IBM France, eut l'idée de consulter son ancien professeur de lettres à Paris, afin de lui demander de proposer un mot caractérisant le mieux possible ce que l'on appelait vulgairement un « **calculateur** » (traduction littérale du mot anglais « **computer** »). Ainsi, Jaques Perret, agrégé de lettres, alors professeur de philologie latine à la Sorbonne, proposa le 16 avril 1955 le mot « **Ordinateur** » en précisant que le mot « Ordinateur » était un adjectif provenant du *Littré* signifiant « *Dieux mettant de l'ordre dans le monde* ». Ainsi, il expliqua que le concept de « mise en ordre » était tout à fait adapté.

(6) L' ORIGINE DU MOT INFORMATIQUE :

L'informatique désigne donc un concept, une science, tandis que l'ordinateur est un outil, une machine conçue pour réaliser des opérations informatiques.

Le mot « **informatique** » est un néologisme créé par contraction des mots « information » et « automatique ».

On doit l'origine du mot « informatique » à Philippe DREYFUS, ancien directeur du Centre National de Calcul Électronique de Bull dans les années 50, qui, en 1962, a utilisé pour la première fois ce terme dans la désignation de son entreprise « Société d'Informatique Appliquée » (*SIA*). Dans la mesure où Philippe DREYFUS s'est abstenu (sciemment ?) de déposer le terme « informatique » en tant que marque, l'Académie Française a adopté ce terme en 1967 afin de désigner la « science du traitement de l'information » ou plus exactement la « Science du traitement rationnel, notamment par des machines automatiques, de l'information considérée comme le support des connaissances humaines et des communications dans les domaines techniques, économiques et sociaux ».

En juillet 1968 le mot fût repris dans le discours d'un ministre allemand, M. STOLTENBERG, sous la forme germanisée « **informatik** ». De fil en aiguille le mot s'est rapidement répandu dans plusieurs pays d'Europe :

- « informática » en Espagne et au Portugal,
- « informatica » en Hollande et en Italie,
- « informatikk » en Norvège,
- « informatika » en Hongrie, Russie et Slovaquie.

Les anglo-saxons et américains lui préfèrent généralement le terme « computer science » (« science des ordinateurs ») mais le terme « informatics » est parfois usité en Grande-Bretagne.

Le terme **informaticien** est donc un terme générique désignant une personne dont le travail est en grande partie lié à l'informatique.

LES SEMI-CONDUCTEURS

(2) A titre documentaire, disons que **silicium** et **germanium** sont des corps qui, au niveau atomique, possèdent 4 électrons de valence, électrons susceptibles de former des liaisons avec d'autres atomes. (Rappel: l'électron est une charge négative élémentaire.) L'atome de silicium, par exemple, met ses 4 électrons de valence en commun avec ceux de 4 autres atomes de silicium, de manière à former un cristal, structure très stable. Toutefois, l'énergie nécessaire pour libérer quelques atomes n'est pas considérable, ce qui signifie qu'en élevant sa température on peut rendre le silicium conducteur, ou du moins augmenter sa conductibilité. A noter que le silicium est beaucoup plus répandu, car beaucoup plus facile à produire, que le germanium.

C'est en réalité le **dopage**, ou l'adjonction de ce qu'on appelle des "impuretés", en fait des atomes d'antimoine, de phosphore, d'arsenic, ou encore de bore, de gallium ou d'indium, dont la valence n'est pas la même (elle de 5 ou de 3), qui détermine le type de semi-conducteur, type N (négatif) dans un cas, type P (positif) dans l'autre, et qui dispense de créer une agitation thermique pour produire la conduction.

En effet, on obtient alors, pour le type N, des électrons libres excédentaires ou, pour le type P, des "trous" (déficit d'électrons, qu'on peut assimiler à des charges positives), et on réalise par là même la condition essentielle au passage d'un courant, qui est un déplacement d'électrons. En résumé, c'est en incorporant au cristal de silicium tels ou tels atomes que l'on détermine le sens de conduction.

Par rapport aux composants qui étaient autrefois utilisés, ils présentent au moins trois avantages décisifs:

- **un contrôle très fin et très sophistiqué de la conduction électrique, c'est-à-dire des flux d'électrons**
- **des valeurs de tension et d'intensité beaucoup plus faibles**
- **un encombrement très réduit (miniaturisation poussée)**

LE TRANSISTOR

(6) Un transistor est un composant électronique semi-conducteur, possédant trois électrodes, capable de modifier le courant qui le traverse à l'aide d'une de ses électrodes (appelée électrode de commande). On parle ainsi de «composant actif», par opposition aux « composants passifs », tels que la résistance ou le condensateur, ne possédant que deux électrodes (on parle de « bipolaire »).

(6) Le transistor MOS (*métal, oxyde, silicium*) est le type de transistor majoritairement utilisé pour la conception de circuits intégrés. Le transistor MOS est composé de deux zones

chargées négativement, appelées respectivement **source** (possédant un potentiel quasi-nul) et **drain** (possédant un potentiel de 5V), séparées par une région chargée positivement, appelée **substrat** (en anglais *substrate*). Le substrat est surmonté d'une électrode de commande, appelée **porte** (en anglais *gate*, parfois également appelée *grille*), permettant d'appliquer une tension sur le substrat.

Le **transistor à effet de champ**. Son organe de commande est la grille (*gate* en anglais). Celle-ci n'a besoin que d'une tension (ou un potentiel) entre la grille et la source pour contrôler le courant entre la source et le drain. Le courant de grille est nul (ou négligeable) en régime statique, puisque la grille se comporte vis-à-vis du circuit de commande comme un condensateur de faible capacité.

La plupart des circuits intégrés digitaux (microprocesseurs entre autres) utilisent la technologie C-MOS qui intègre à grande échelle (plusieurs millions) des transistors à effet de champ (à enrichissement) complémentaires (c'est-à-dire qu'on retrouve des N et des P). Pour une même fonction, l'intégration de transistors bipolaires consommerait beaucoup plus de courant. Un circuit C-MOS ne consomme quasiment rien si la fréquence d'horloge est modérée, ce qui permet le développement de circuits à piles ou batteries (téléphones ou ordinateurs portables, appareils photos ...)

(2) Les premiers transistors avaient comme base le germanium. Ce matériau, de nouveau utilisé pour certaines applications, avait été vite remplacé par le silicium plus résistant et plus souple d'emploi.

Evolution du nombre de transistors dans les processeurs (*source Wikipedia*):

- 1971 : 4004 : 2 300 transistors
- 1978 : 8086 : 29 000 transistors
- 1982 : 80286 : 275 000 transistors
- 1989 : 80486 : 1,16 millions de transistors
- 1993 : Pentium : 3,1 millions de transistors
- 1995 : Pentium Pro : 5,5 millions de transistors
- 1997 : Pentium II : 27 Millions de transistors
- 2001 : Pentium 4 : 42 millions de transistors

LA LOGIQUE BOOLENNE

(4) C'est à Leibnitz qu'on doit l'arithmétique binaire, peut-être par suite d'une fausse interprétation de la philosophie du yin et du yang et des trigrammes et hexagrammes chinois. Moins d'un siècle plus tard, en 1854, le mathématicien anglais George Boole, conçoit une sorte d'algèbre, un système de symboles et de règles, applicable à la pensée logique. De cette manière, il était possible de coder des propositions en langage symbolique puis de les traiter comme des nombres ordinaires.

UN LANGAGE DE PROGRAMMATION

(11) Un langage de programmation est un logiciel de communication usager-machine composé de symboles, de caractères et de règles. Tous les langages d'ordinateur comportent des instructions qui permettent à l'ordinateur d'effectuer des opérations. Ces instructions tombent généralement dans les catégories suivantes:

Des instructions d'entrée/sortie : par exemple *input* et *print* en Basic.
Des instructions de calculs : addition, soustraction, multiplication, division.
Des instructions logiques : pour permettre à l'ordinateur de prendre des décisions, par exemple d'effectuer un branchement conditionnel ou une boucle.
Des instructions de mouvements, de recherche et d'emmagasinage de données

1843 : Lady Lovelace, premier programmeur

(11) Augusta Ada Lovelace Byron (1816-1852) est née à Londres et son père est Lord Byron. Elle est la grande collaboratrice de Babbage. C'est à elle qu'on doit la description systématique de la calculatrice analytique de Babbage. Sa description publiée en 1843, comprend de véritables programmes et elle préfigure les ordinateurs modernes. Elle est reconnue comme ayant écrit les premiers programmes. Elle a été en contact avec la machine analytique de Babbage et elle a composé un programme pour calculer les nombres de Bernoulli (calcul exponentiel et infinitésimal). Elle a aussi écrit des notes sur l'utilisation répétitive de séries de cartes de mêmes instructions, préfigurant les sous-routines que l'on connaît dans la programmation moderne sous le nom de boucles et de branchements. La boucle est une série d'instructions répétitives qui sont effectuées jusqu'à ce qu'une condition soit remplie pour sortir de la boucle. Le branchement suppose que le résultat d'une opération détermine l'ordre dans lequel le reste des instructions est exécuté. Le langage ADA créé en 1979 a été nommé en son honneur.

Références en ligne:

- 1 <http://perso.wanadoo.fr/metasystems/Cybernetics2.html>
- 2 <http://fr.wikipedia.org/>
- 3 <http://www.research.att.com/~njas/doc/shannonbio.html>
- 4 http://www.up.univ-mrs.fr/wcilsh/cours_infZ10CTE/index.htm
- 5 http://contraintes.inria.fr/~langevin/efrei/micro_info/intro_micro_info.pdf
- 6 <http://www.commentcamarche.net/>
- 7 cd *Elektronic*
- 8 <http://deptinfo.cnam.fr/new/IMG/pdf/ED4-2.pdf>
- 9 <http://www.vulgarisation-informatique.com/fabrication-processeur.php>
- 10 <http://homestudio.thing.net/database/txts/connaissanceDesOrdi.pdf>
- 11 <http://www.scedu.umontreal.ca/sites/histoiredestec/histoire/chap6.htm>