

**Texte de la 248<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 4 septembre 2000.**

## **DE VON NEUMANN AUX SUPER-MICROPROCESSEURS**

Par François Anceau

### **Histoire des machines informatiques**

L'histoire des machines à traiter l'information est une saga qui trouve ses racines loin dans l'histoire et qui se poursuit actuellement avec un rythme très rapide. Pour remonter aux origines, nous diviserons cette histoire en trois grandes périodes.

#### **La préhistoire**

Ce qui va donner l'informatique peut être vu comme la convergence de trois courants :

- La *notion d'algorithme*. Celle-ci prend ses racines dans l'Antiquité. Elle a été formulée en Perse dès le IX<sup>e</sup> siècle par Al Khowarizmi. Elle consiste à décrire précisément les processus nécessaires à la réalisation des calculs complexes. Cette notion ne sera réellement formalisée que onze siècles plus tard par Alan Turing en 1936 et Alonzo Church en 1944.
- La *mécanisation des opérations de calcul* qui a débuté au XVII<sup>e</sup> siècle avec les travaux de Wilhelm Schickard en 1623, la série des Pascalines de Blaise Pascal en 1642 puis la machine à effectuer les multiplications de Gottfried Wilhelm Leibniz en 1694.
- La *programmation*. Celle-ci est vraisemblablement apparue au Moyen Âge pour les carillons automatiques dans lesquels un tambour muni de picots déclenchait une séquence de frappes sur les cloches. Cette technologie s'est ensuite développée pour l'animation des automates et la commande des métiers à tisser automatiques (Basile Bouchon 1725, Jacques de Vaucanson 1745 puis Joseph Marie Jacquard 1810 qui eut l'idée de remplacer les tambours par des cartes perforées, inventées par Falcon).

La synthèse de ces trois courants fut réalisée par Charles Babbage qui proposa en 1840 les plans de sa *machine analytique*. Celle-ci est la première description d'une machine à calculer programmable. La comtesse Ada de Lovelace a écrit des programmes mathématiques pour cette machine. Elle fut donc la première programmeuse de l'histoire.

#### **L'Antiquité**

Les machines à calculer programmables étaient utilisées pour calculer les tables numériques civiles et militaires, ainsi que pour effectuer des statistiques. Il s'agissait de réaliser de manière répétitive des séquences de calculs assez simples sur de grands volumes de données. La croissance de ces besoins fit passer ces machines de la technologie mécanique à l'électromécanique puis à l'électronique en utilisant des tubes électroniques. Les premières machines à calculer programmables électroniques furent la machine ABC de John Vincent Atanasoff en 1939 et le calculateur ENIAC réalisé par John Pesper Eckert et John Mauchy en 1947. La mise en forme de l'algèbre binaire par George Boole en 1847 allait ouvrir la voie à son utilisation comme base de numération pour les machines. George R. Stibitz bricola le premier additionneur binaire en 1937 et Konrad Zuse réalisa le premier calculateur binaire électromécanique programmable en 1938. Pendant ce temps, Alan Turing formalisa la notion de calcul en 1936 en montrant qu'une telle machine peut être *universelle*, c'est-à-dire capable de réaliser n'importe quel calcul (pourvu que l'on lui en laisse le temps et qu'elle dispose de suffisamment de mémoire).

Cette période s'achève par la proposition de John von Neumann de ranger les programmes dans la même mémoire que les données. Cette idée sera matérialisée par Eckert et Mauchy

(machine BINAC en 1949) puis par Turing (*Automatic Computing Engine* en 1950) qui ajoutera la possibilité aux programmes de s'auto-modifier.

### Les Temps Modernes

Les premières machines des années 1950 contenaient déjà tous les ingrédients nécessaires à un ordinateur. Une formidable évolution technologique va leur donner la puissance, la fiabilité et la miniaturisation que nous leur connaissons. La première de ces mutations va se produire vers 1960 avec le développement des premiers ordinateurs à transistors au silicium. Ces composants vont donner à l'ordinateur une fiabilité qui va lui permettre d'être effectivement utilisé. Le développement des *circuits intégrés*, dont le premier exemplaire est dû à Jack Kilby (Texas Instruments) en 1958, va permettre, dès 1965, un nouveau pas dans l'augmentation de la complexité et de la fiabilité des ordinateurs.

Pendant les années 1960 le statut des ordinateurs va progressivement passer de celui de machines à effectuer des calculs, jusqu'à celui de traiter de l'information de toute nature. Des applications comme le traitement de texte et les bases de données vont apparaître. En 1971 Marcian Hoff de chez Intel conçoit le premier processeur monolithique (*microprocesseur*) commercial (Intel 4004), c'est-à-dire réalisé sous la forme d'un seul circuit intégré. C'est cette technologie qui va progressivement se développer pour s'imposer à partir des années 90.

### La fantastique évolution des microprocesseurs

À la suite de l'Intel 4004, de nombreux autres modèles de microprocesseurs sont apparus, de plus en plus puissants et de plus en plus complexes. À partir de cette date, un rythme très rapide d'évolution s'est installé. Il s'est maintenu sans fléchir jusqu'à aujourd'hui. La complexité de ces machines monolithiques est passée de 2 800 transistors pour l'Intel 4004 à plusieurs dizaines de millions pour les microprocesseurs modernes. Pendant la même durée, leur puissance de traitement est passée de 60 000 instructions exécutées par seconde par l'Intel 4004 à plus d'un milliard par les machines actuelles les plus puissantes. L'histoire des microprocesseurs sur les trente dernières années est certainement la plus formidable évolution technologique de l'histoire humaine, tant en durée qu'en ampleur.

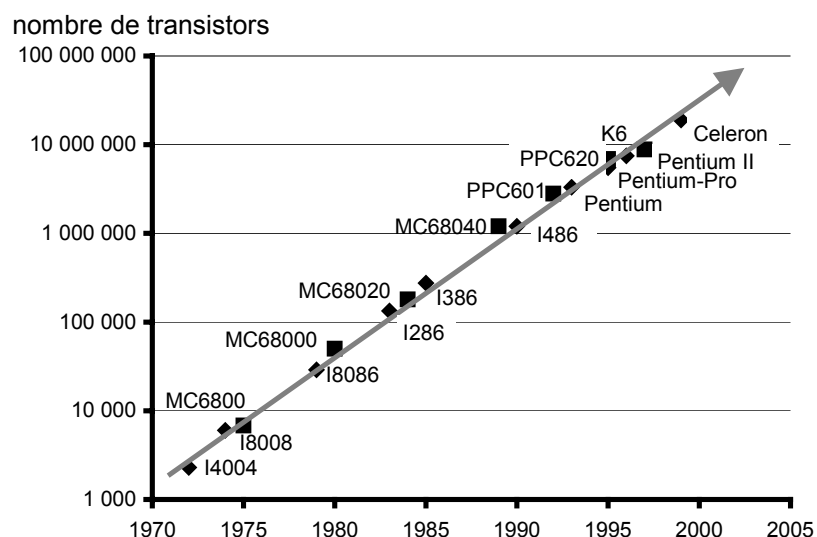


Figure 1 – Évolution de la complexité des microprocesseurs

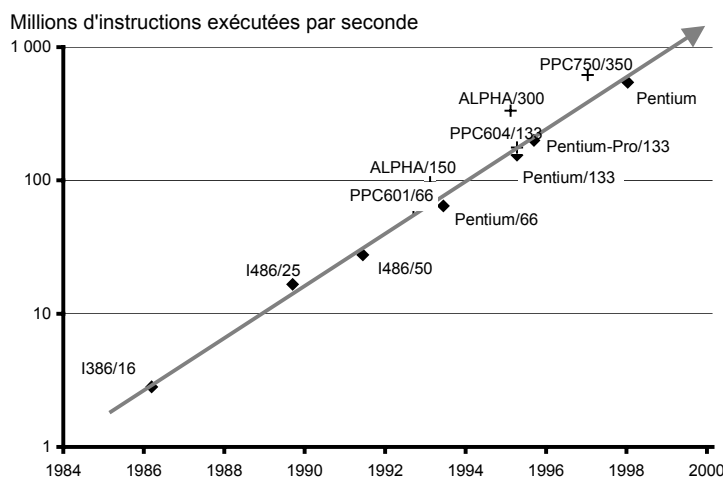


Figure 2 – Évolution de la performance des microprocesseurs

Ce rythme d'évolution effréné est appelé loi de Moore (du nom du directeur de la compagnie Intel qui l'a formulée dans les années 1970). Il provient pour moitié de l'évolution technologique des circuits intégrés et pour l'autre moitié de l'évolution de l'architecture de ces machines. Les microprocesseurs actuels sont dessinés avec des motifs de 0,18  $\mu\text{m}$  de largeur. Cette dimension diminue régulièrement depuis plus de trente ans et ce rythme tend même actuellement à s'accélérer. Si cette évolution se poursuit, nous devrions atteindre, avant la fin de la décennie, des dimensions pour lesquelles des phénomènes quantiques devraient se manifester et dégrader le fonctionnement des transistors.

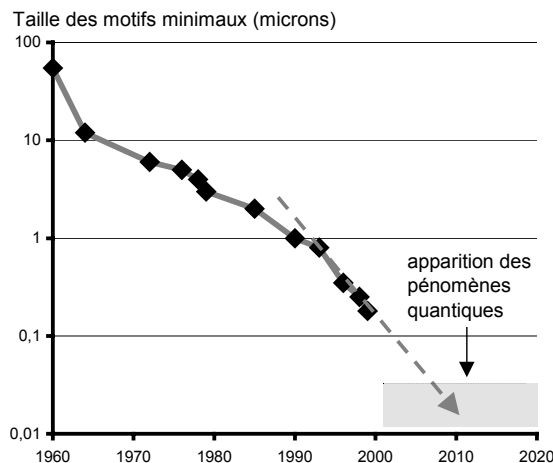


Figure 3 – Évolution de la technologie des circuits intégrés

### Types d'ordinateurs

Les ordinateurs peuvent être classés en deux grandes familles suivant que nous connaissons, ou ignorons, leur existence.

- Les ordinateurs « visibles » qui constituent tout ce que nous appelons ordinateur et surtout ceux qui se présentent comme des machines universelles, bien qu'ils soient souvent utilisés de manière spécifique. Ceux-ci peuvent être des *ordinateurs personnels* ou des *stations de travail*, portables ou fixes, des *ordinateurs serveurs* qui fournissent de l'information sur un réseau, des ordinateurs de contrôle de processus chargés de piloter des processus

industriels (raffinerie, usine automatisée, gros appareils, navires,...), des *super-ordinateurs* chargés de résoudre de gros problèmes numériques (prévisions météorologiques, simulations, ...).

- Des ordinateurs « cachés » qui se présentent comme des composants électroniques évolués et dont nous ignorons généralement l'existence : surveillance et pilotage de véhicules (automobiles, trains, avions, fusées), dispositifs de communication et de localisation (terminaux GSM, répondeurs, GPS), électroménager (chaîne Hi-Fi, magnétoscope, machine à laver), horlogerie (montres numériques, séquenceurs).

La demande en puissance de calcul des ordinateurs « visibles » semble insatiable. On ne distingue pas de limite à court terme. Toute application (par exemple un traitement de texte), peut utiliser des puissances de calcul de plus en plus élevées pour offrir des fonctions dont nous n'osions même pas rêver il y a seulement quelques années (correction orthographique et grammaticale en ligne, extraction de sens, génération automatique de texte, entrée vocale, ...). Notre imagination pour ce genre de fonctions semble être sans limite.

Les ordinateurs « cachés » sont de loin les plus nombreux. Ils apportent de l'intelligence aux objets qui nous entourent et permettent l'occurrence de nouveaux objets inconcevables sans leur présence (GSM, GPS, ...). Ils transforment la nature de beaucoup de métiers en capturant les connaissances et le savoir-faire qui leur sont associés (par exemple, avec un GPS un capitaine de navire n'a plus besoin de savoir faire le point astronomique avec un sextant). De ce fait, ces objets nous deviennent de plus en plus indispensables.

L'ensemble de ces machines influe sur l'évolution de la société. Ils permettent l'interconnexion des individus et nous donnent accès, via les réseaux, à des informations que nous n'aurions pas eues autrement. Ceux qui sont cachés transforment subrepticement la nature des objets qui nous entourent (automobile, électroménager, ...) mais aussi nous écartent de plus en plus de la connaissance de leur fonctionnement détaillé.

### **Absorption des gammes d'ordinateur par les microprocesseurs**

L'évolution des microprocesseurs se traduit par la mise sur le marché de machines de plus en plus puissantes, appelées micro-ordinateurs, dont le coût reste au voisinage de 1 000 à 2 000 euros. Lorsque la puissance de ces micro-ordinateurs dépasse celle d'une gamme traditionnelle d'ordinateurs (généralement de coût plus élevé), celle-ci disparaît et sa fonction vient s'ajouter à la liste, déjà longue, des applications des micro-ordinateurs. Ce phénomène s'est d'abord produit pour la gamme des mini-ordinateurs, nés dans la seconde moitié des années 1960 et absorbés au début des années 1980. De même, les ordinateurs de centre de calcul, nés avec l'informatique, se sont fait absorber vers le milieu des années 1990. L'histoire ne s'arrête pas là, car la puissance de calcul des micro-ordinateurs va devenir comparable à celle des super-ordinateurs avant la fin de la décennie ce qui va provoquer l'absorption de cette gamme.

Il faut remarquer que ces phénomènes d'absorption ne sont pas recherchés par les concepteurs des micro-ordinateurs. En effet, ceux-ci visent le marché des applications personnelles et surtout celui des jeux. Il se trouve que l'amélioration de ceux-ci passe par la capacité de réaliser des simulations complexes en temps réel et par l'affichage associé de points de vues mobiles dans un espace tri-dimensionnel. Ces caractéristiques sont très voisines de celles demandées aux super-ordinateurs.

### **Structure d'un micro-ordinateur**

La technologie *micro-électronique* fournit des dispositifs pour le traitement de l'information extrêmement rapides (une transition en quelques centaines de pico-secondes) mais qui sont aussi beaucoup plus complexes que ceux utilisés pour sa mémorisation (par un facteur de 5 à 50), il est donc naturel de réaliser une unité de traitement sous la forme d'une structure

bouclée dans laquelle les informations sont puisées dans des organes de mémorisation pour être fournies à un organe de transformation, appelé *opérateur*. Les résultats de l'opération (très simple) sont ensuite réécrits dans les organes de mémorisation. Cette organisation bouclée permet de minimiser le matériel nécessaire par une forte réutilisation des opérateurs dans un fonctionnement séquentiel. Le même matériel est donc utilisé répétitivement pour toutes les opérations. Le nombre de cycles nécessaires à un traitement « visible » devient très important. Il transforme la rapidité de la machine en sa puissance de traitement.

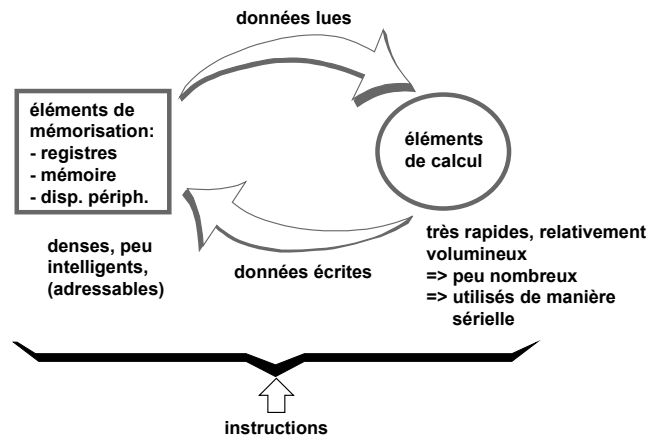


Figure 4 – La boucle fondamentale d'exécution

La nature de l'opération à réaliser, ainsi que l'emplacement des opérands et du résultat sont décrit par une chaîne de bits appelée une *instruction*. L'ensemble des instructions nécessaire à un traitement constitue un *programme*. Depuis von Neumann, ceux-ci sont rangés dans les organes de mémorisation.

### Hierarchie mémoire

Les caractéristiques des technologies utilisées pour réaliser les dispositifs de mémorisation font que leur taille et leur vitesse varient de manière opposée. Plus un élément de mémorisation est rapide, plus sa taille est réduite. Par exemple, les registres utilisés dans le processeur ne permettent le stockage que de quelques dizaines ou centaines d'octets mais ils peuvent être accédés à la vitesse des cycles élémentaires de la boucle de traitement. À l'opposé, les disques magnétiques peuvent contenir des dizaines de milliards d'octets mais leur fonctionnement séquentiel limite leur temps d'accès à la dizaine de millisecondes.

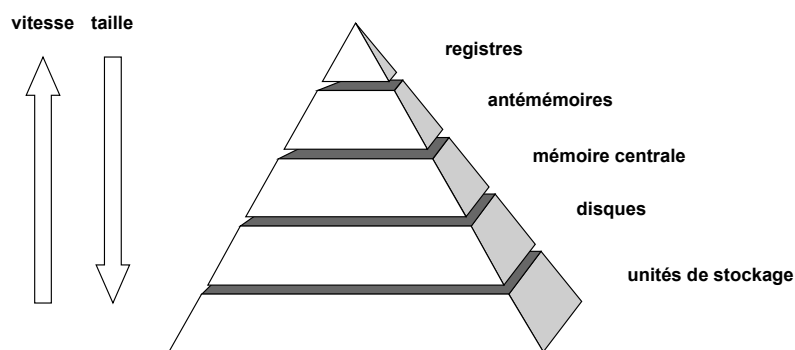


Figure 5 – Hiérarchie des organes de mémorisation

Comme l'idéal serait de disposer d'organes de mémorisation à la fois rapides et de capacité importante, on les simule par l'utilisation de *hiérarchies de mémoires* dans lesquelles une mémoire rapide de taille réduite est utilisée pour contenir les informations, utiles à un instant donné, extraites d'une grande mémoire plus lente. Cette technique exploite la propriété de localité de l'information qui fait que la probabilité de réutiliser de l'information est supérieure à celle d'en accéder de nouvelles. La mise en œuvre d'une hiérarchie de mémoire demande l'utilisation de dispositifs complexes pour faire migrer l'information utile de la mémoire de grande capacité vers la mémoire rapide ainsi que la réinscription de l'information modifiée dans la mémoire de grande capacité.

## Familles de processeurs

On peut classer les processeurs en deux grandes familles suivant la complexité de leur jeu d'instruction :

- Les machines CISC (pour *Complex Instruction Set Computers*)

Ces machines sont directement issues de la longue histoire des ordinateurs. Leurs instructions peuvent commander des opérations complexes comme par exemple la recherche d'un caractère dans une table. Ces instructions lisent souvent leurs opérandes dans la mémoire centrale et doivent donc en préciser le mode d'accès. Ce fut le type de jeu d'instruction de tous les processeurs conçus jusqu'au début des années 1980. À titre d'exemples citons : la gamme des machines IBM 360-370-390, la gamme des microprocesseurs Motorola 680x0, la gamme des microprocesseurs Intel x86.

- Les machines RISC (pour *Reduced Instruction Set Computers*)

Ces machines sont nées des travaux de John Cocke des laboratoires IBM. Celui-ci remarqua dès 1975 que certaines instructions des machines CISC avaient un taux d'utilisation très faible qui ne justifiait pas le matériel mis en œuvre pour les exécuter. L'idée de réaliser des machines simplifiées vit le jour. Dans les machines RISC, les instructions sont très simples et très rapides. La majorité d'entre elles n'accèdent qu'aux registres (qui sont plus nombreux). Les accès à la mémoire centrale sont traités comme des accès aux organes périphériques. Cette approche permet de tirer un meilleur parti du matériel mais provoque un allongement sensible des programmes. Toutes les machines conçues pendant les années 1980 furent de ce type. Nous pouvons citer : la gamme des microprocesseurs PowerPC de IBM/Motorola, la gamme SPARC de SUN, celle des processeurs ALPHA de Digital Equipment/Compaq.

En plus de cette classification, il est intéressant de distinguer deux sous-classes importantes des machines CISC qui ont été développées avec l'idée de faire migrer des fonctions logicielles vers le matériel pour en améliorer les performances.

- Les *machines-langage* qui possèdent un jeu d'instructions adapté à l'exécution des langages informatiques évolués. De telles machines ont eu leur heure de gloire à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Depuis cette époque, des résurgences périodiques font apparaître des machines de ce type pour des applications plus ou moins spécifiques. À titre d'exemple, nous pouvons citer la Pascaline de Western Digital apparue vers 1980 pour exécuter le langage Pascal et récemment, la série des machines SUN Pico-Java et MAJC 5200 adaptées à l'exécution du langage Java.
- Les *machines-système* qui possèdent un jeu d'instructions adapté à l'exécution des fonctions de base d'un système d'exploitation. Ce type de machine découle directement du projet Multics développé au MIT à la fin des années 1960. De nombreuses machines de ce type ont été conçues au début des années 1970. Certaines continuent d'exister comme la gamme BULL DPS 7000. Une gamme célèbre de machines de ce type a été lancée par

Intel en 1982 sous la dénomination 80286 dont les successeurs : 80386, i486, Pentium®, équipent toujours les PC.

### **L'héritage des ordinateurs**

Tout au long de leur histoire, les microprocesseurs ont réutilisé toutes les innovations techniques qui ont été développées pour accroître la puissance des gammes précédentes d'ordinateurs. Tous ces dispositifs sont maintenant utilisés dans les microprocesseurs modernes qui sont actuellement les processeurs les plus avancés disponibles sur le marché. Ceux-ci sont ainsi devenu les descendants de l'histoire technique des ordinateurs. Pour maintenir le rythme de cette évolution, il est nécessaire de découvrir de nouvelles techniques pour accroître encore la performance de ces machines. Les dernières en date sont spécifiques aux microprocesseurs car aucun ordinateur des gammes précédentes ne les avait jamais utilisé auparavant.

Les microprocesseurs sont devenus les composants principaux des ordinateurs. Réaliser un processeur d'une manière non monolithique, par exemple par l'assemblage de circuits à faible taux d'intégration, est maintenant complètement dépassé et loin de l'optimum économique. Actuellement, tous les nouveaux ordinateurs sont basés sur l'utilisation de microprocesseurs (par exemple le super-ordinateur CRAY T3E utilise des microprocesseurs ALPHA).

### **Les microprocesseurs vus comme des circuits intégrés complexes**

Les microprocesseurs sont des circuits intégrés complexes. Dans de tels composants, le circuit lui-même définit un monde interne qui est beaucoup plus petit et plus rapide que le monde extérieur. Les fonctions internes de ces circuits intégrés fonctionnent beaucoup plus vite que celles des circuits à moindre taux d'intégration (des cartes électroniques par exemple). C'est cet effet qui est responsable de la très grande rapidité des circuits intégrés complexes. Cette différence ne fait que s'accroître lorsque la dimension des motifs technologiques diminue.

Pour un signal électronique, le coût de passage du monde interne d'un circuit intégré au monde externe est très élevé. Des amplificateurs multi-étages et un adaptateur géométrique, constitué par le boîtier lui-même, sont nécessaires. La différence géométrique et électrique entre ces deux mondes est si importante qu'elle est comparable au fait de piloter des organes électromécaniques à partir d'une carte électronique. La différence de vitesse et de coût d'interface entre l'intérieur et l'extérieur d'un circuit conduit les concepteurs de circuits intégrés à mettre le maximum de blocs fonctionnels dans un seul circuit au lieu d'utiliser des architectures multi-boîtiers qui multiplient les (coûteuses) interfaces. Cet effet constitue le principal moteur de l'accroissement du niveau d'intégration et donc de la complexité des circuits.

Un autre paramètre important est la notion de distance sur le circuit intégré lui-même. À son échelle, un circuit complexe est un monde très grand ! Nous pouvons le comparer avec un pays carré de 1000 km de côté parcouru par des routes de 10 m de large. L'organisation d'une telle surface demande que les différents blocs qui l'occupent s'imbriquent et s'interconnectent le mieux possible. Le coût de transfert de l'information d'une extrémité à l'autre d'un même circuit est très élevé. Les interconnexions entre les différents blocs doivent donc être minutieusement étudiées pour accroître les échanges locaux et diminuer les communications à longue distance.

### **Techniques d'accélération de l'exécution**

L'histoire des microprocesseurs est celle d'une course effrénée à la vitesse. La pression économique qui pousse à l'augmentation continue de leurs performances conduit les concepteurs à trouver de nouvelles approches pour concevoir des machines de plus en plus rapides. Nous avons vu que cette accélération provient d'une part de la réduction de la

dimension des motifs technologiques qui permet d'accroître la fréquence d'horloge et d'autre part de l'utilisation d'architectures plus rapides basées sur l'utilisation de superpositions dans l'exécution des instructions. Dans ces machines, l'exécution d'une nouvelle instruction démarre avant que celles qui la précèdent ne soit terminées. Le prix à payer pour l'utilisation de ces architectures est une importante augmentation de la complexité de la machine qui peut aller jusqu'à une multiplication par plusieurs unités de la taille du circuit.

### Exécution *pipeline*

L'idée directrice de cette technique d'exécution est de découper le traitement d'une instruction en plusieurs sous-tâches exécutées par autant de modules matériels qui travaillent successivement comme dans une chaîne de montage industrielle. Chacun de ces modules reçoit ses données (une instruction en cours d'exécution) des modules qui le précèdent.

Avec cette technique, une nouvelle instruction entre dans la chaîne d'exécution à chaque cycle d'horloge, ce qui augmente fortement la puissance de la machine.

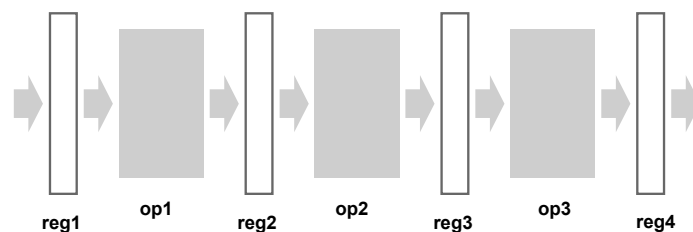


Figure 6 – Principe de l'exécution pipeline

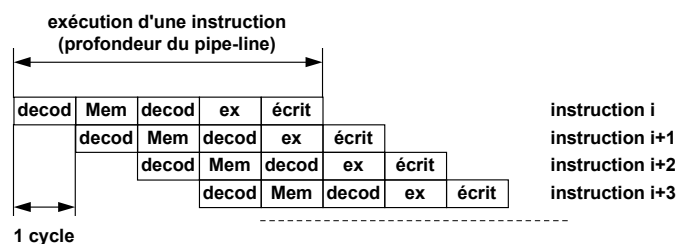


Figure 7 – Progression des instructions dans une exécution pipeline

Le problème des architectures pipelines est celui des *dépendances*. Le parallélisme introduit dans l'exécution des instructions peut faire que certaines informations nécessaires à l'exécution d'une instruction particulière ne soient pas encore élaborées par celles situées en amont et dont l'exécution n'est pas encore terminée (elles sont encore dans la chaîne d'exécution). Des études statistiques montrent que la probabilité de rencontrer une telle dépendance est assez élevée.

Plusieurs techniques sont utilisées pour contourner les dépendances. Certaines consistent à établir des voies directes pour raccourcir le chemin entre la génération d'un résultat (par un opérateur) et son utilisation comme opérande d'une instruction suivante. D'autres mécanismes, plus avancés, consistent à faire des hypothèses (prédictions) sur la valeur de l'information manquante et à continuer l'exécution en espérant qu'elles soient confirmées. Il faut évidemment pouvoir revenir en arrière si elles se trouvent infirmées. Ce mécanisme intervient, entre autre, lorsque l'information manquante concerne l'enchaînement même des instructions. Lorsque l'hypothèse s'avère fautive, toutes les instructions qu'elle a permis de charger dans la chaîne d'exécution doivent être éliminées. La dégradation de performance qui





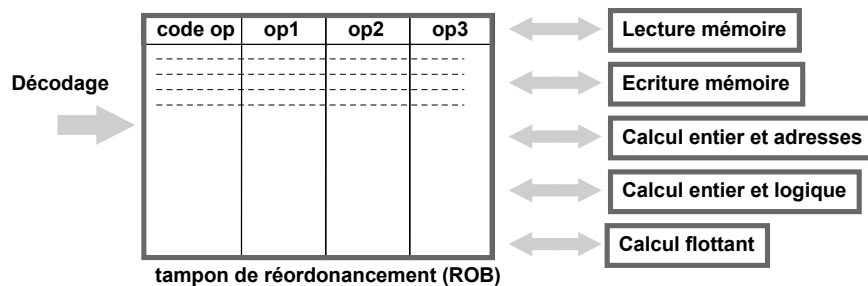


Figure 9 – Principe de l'exécution dans le désordre

Cette technique d'exécution très puissante, mais aussi très coûteuse, est utilisée dans les microprocesseurs Pentium Pro, II, III, 4.

### Regroupement des instructions en mots très longs

Dans ce type de machines appelées VLIW (pour *Very Long Instruction Words*), plusieurs instructions élémentaires (supposées sans dépendance) sont groupées dans des mots très longs par les outils logiciels de préparation des programmes (compilateurs) ou dynamiquement en cours d'exécution. Ces instructions groupées sont extraites en parallèle de la mémoire exécutées ensemble par plusieurs voies matérielles d'exécution. Cette organisation architecturale semble très prometteuse car plusieurs constructeurs s'orientent dans cette direction pour leurs futurs produits, c'est le cas, par exemple, des machines Intel Itanium®, Transmeta Crusoe®, TEXAS TMS320C62xx et SUN MAJC 5200.

### Multiprocesseurs monolithiques

Puisque les microprocesseurs ont déjà utilisé toutes les techniques connues d'accélération de l'exécution, plusieurs auteurs suggèrent périodiquement le regroupement de plusieurs processeurs sur un même circuit monolithique. Cette idée n'est pas nouvelle et plusieurs projets de tels *multi-microprocesseurs* ont déjà été envisagés (par exemple un projet de double MC 6800 a été envisagé à la fin des années 1970). Malheureusement, les nouvelles générations de monoprocesseurs monolithiques se sont montrées plus attractives et beaucoup de projets de multi-microprocesseurs furent abandonnés. Maintenant, la situation a peut-être un peu changé puisque pratiquement toutes les techniques d'accélération des monoprocesseurs ont été exploitées. En fait, tous les processeurs modernes peuvent être vus comme des structures multiprocesseurs (pipeline, exécution dans le désordre, VLIW) travaillant sur le même programme.

### Conclusions

L'évolution des ordinateurs est l'une des plus excitantes histoires techniques de la fin du XX<sup>e</sup> siècle et probablement du début du XXI<sup>e</sup>. La puissance de traitement de ces machines a été multipliée par plus de vingt millions depuis leur apparition au début des années 1950. Aucun autre domaine technique n'a connu un tel rythme d'évolution sur une durée aussi longue.

Les microprocesseurs constituent maintenant le cœur des machines informatiques. Ils sont en train de se substituer à toutes les autres technologies de construction d'ordinateur.

Avec l'occurrence des microprocesseurs, l'humanité est en train de réaliser le composant « intelligent » qui permet de changer profondément la nature des objets de notre environnement et d'en créer de nouveaux.

Nous pouvons aussi nous poser la question de savoir où une telle évolution nous mène. Les puissances de calcul qui se profilent à l'horizon sont impressionnantes. Il y a pourtant fort à parier qu'elles resteront encore longtemps en deçà de la demande car celle-ci semble

insatiable. Cette puissance de calcul, déjà impressionnante, ouvre à un large public l'utilisation de technologies réservées jusqu'alors à des spécialistes, faisant de l'ordinateur individuel le plus puissant des outils que l'homme ait jamais créé.

### **Bibliographie**

- Amblard (P.), Fernandez (J. C.), Lagnier (F.), Maraninchi (F.), Sicard (P.) et Waille (P.), *Architectures logicielles et matérielles*, Dunod, 2000
- Anceau (F.), *The Architecture of Microprocessors*, Addison-Wesley, 1986
- Anceau (F.), Architecture matérielle des PC Windows-Intel, dans : *Techniques de l'Ingénieur*, H 1 008, 1998
- Anceau (F.), La saga des microprocesseurs, la course à la puissance, dans : *Cerveau et machines*, V. Bloch (éd), Hermes Science, 1999
- Anceau (F.), *La saga des PC Wintel*, dans : *Technique et science informatique*, Vol 19 n°6, juin 2000
- Chevance (R. J.), *Serveurs multiprocesseurs, clusters et architectures parallèles*, Eyrolles, 2000
- Etiemble (D.), *Architecture des processeurs RISC*, Armand Colin, 1991
- Hennessy (J. L.) et David A. Patterson (D. A.), *Architecture des ordinateurs, une approche quantitative*, traduction : International Thomson Publishing France, 1996
- Messer (H. P.), *Pentium et compagnie*, traduction : Addison-Wesley, 1994
- von Neumann (J.), *L'Ordinateur et le cerveau*, traduction : Champs, Flammarion, 1996
- Qui a inventé l'ordinateur ?*, Les cahiers de Science & Vie, Grands ingénieurs, hors série n°36, décembre 1996
- Tanenbaun (A.), *Architecture de l'ordinateur*, Dunod 2000
- Teifreto (D.), *Cours d'architecture des ordinateurs*, 2000  
<http://lifc.univ-fcomte.fr/PEOPLE/teifreto/Teifreto.html>
- Zanella (P.) et Ligier (Y.), *Architecture et technologie des ordinateurs*, Dunod, 1998