Architecture des ordinateurs

F. Pellegrini
ENSEIRB

Langages et exécution

- Les ordinateurs ne comprennent que le langage machine
  - Trop élémentaire, trop long à programmer
- Nécessité de construire des programmes à un niveau d'abstraction plus élevé
  - Meilleure expressivité et généricité
  - Moins de risques d'erreurs
- Besoin de passer d'un langage humainement compréhensible à une exécution machine

Langages et machines virtuelles

- Exécuter un programme écrit dans un langage L^1 au moyen d'une machine comprenant le langage L^0 peut se faire de deux façons différentes
  - Par traduction
  - Par interprétation

Traduction

- Consiste à remplacer chaque instruction de L^1 par une séquence équivalente d'instructions de L^0
- Le résultat de la traduction est un programme équivalent écrit en L^0
- L'ordinateur peut alors exécuter ce programme en L^0 à la place du programme écrit en L^1

Interprétation

- Consiste à utiliser un programme écrit en L^0 qui prend comme entrée un programme écrit en L^1, parcourt ses instructions l'une après l'autre, et exécute directement pour chacune d'elles une séquence équivalente d'instructions en L^0
- Après que chaque instruction en L^0 a été examinée et décodée, on la met en oeuvre
- On ne génère pas explicitement de programme écrit en L^0

Machines virtuelles

- On peut repenser le problème en postulant l'existence d'une machine M^1 exécutant directement le code L^1
- Si ces machines pouvaient être facilement réalisées, on n'aurait pas besoin de machines M^0 utilisant nativement le L^0
- Sinon, ces machines sont dites virtuelles
- Par nature, les langages L^1 et L^0 ne doivent pas être trop différents

Machines multi-couches (1)

- En itérant ce raisonnement, on peut concevoir un ensemble de langages, de plus en plus complexes et expressifs, jusqu'à arriver à un niveau d'abstraction satisfaisant pour le programmeur
- Chaque langage s'appuyant sur le précédent, on peut représenter un ordinateur construit selon ce principe comme une machine multi-couches

Machines multi-couches (2)

- Les premières machines ne disposaient que de la couche matérielle M^0
  - Réalisation de calculs élémentaires
  - Exécution directe des instructions du langage machine
- La mémoire étant rare et chère, il fallait avoir des instructions plus puissantes
  - Difficiles à câbler dans le matériel
  - Introduction d'une couche micro-codée réalisant l'interprétation des instructions complexes

Machines multi-couches (3)

- Avec la nécessité de partager l'utilisation des machines, apparition des systèmes d'exploitation
  - Nouveau modèle de gestion de la mémoire et des ressources
  - Abstraction supplémentaire
- Après l'inflation des jeux d'instruction micro-programmés, retour à des jeux d'instructions plus restreints (RISC)
  - Disparition de la micro-programmation
  - Report de la charge de travail sur les compilateurs

Machines multi-couches (4)

- La frontière entre ce qui est implémenté par matériel et ce qui est implémenté par logiciel est mouvante
  - Toute opération réalisée par logiciel peut être implémentée matériellement
  - Toute fonction matérielle peut être émulée par logiciel
- Le choix d'implémentation dépend de paramètres tels que le coût, la vitesse, la robustesse, et la fréquence supposée des modifications

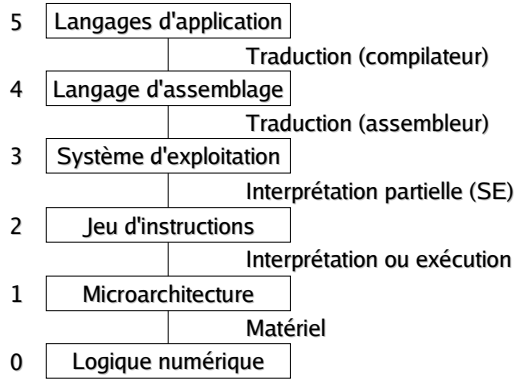
Machines multi-couches (5)

- À un même jeu d'instructions peuvent correspondre plusieurs implémentations de coûts différents, utilisant des techniques différentes
  - Familles de processeurs
  - Utilisation d'un coprocesseur arithmétique câblé ou émulation des instructions par logiciel ?

Architecture des ordinateurs

- Les ordinateurs modernes sont conçus comme un ensemble de couches
- Chaque couche représente une abstraction différente, capable d'effectuer des opérations et de manipuler des objets spécifiques
- L'ensemble des types de données, des opérations, et des fonctionnalités de chaque couche est appelée son architecture
- L'étude de la conception de ces parties est appelée « architecture des ordinateurs »

Machines multi-couches actuelles



Couche logique numérique

- Les objets considérés à ce niveau sont les portes logiques, chacune construite à partir de deux ou trois transistors
- Chaque porte prend en entrée des signaux numériques (0 ou 1) et calcule en sortie une fonction logique simple (ET, OU, NON)
- De petits assemblages de portes peuvent servir à réaliser des fonctions logiques telles que mémoire, additionneur, ainsi que la logique de contrôle de l'ordinateur

Couche microarchitecture

- On dispose à ce niveau de plusieurs registres mémoire et d'un circuit appelé UAL (Unité Arithmétique et Logique, ALU) capable de réaliser des opérations arithmétiques élémentaires
- Les registres sont reliés à l'UAL par un chemin de données permettant d'effectuer des opérations arithmétiques entre registres
- Le contrôle du chemin de données est soit microprogrammé, soit matériel

Couche jeu d'instruction

- La couche de l'architecture du jeu d'instructions (Instruction Set Architecture, ISA) est définie par le jeu des instructions disponibles sur la machine
- Ces instructions peuvent être exécutées par microprogramme ou bien directement

Couche système d'exploitation

- Cette couche permet de bénéficier des services offerts par le système d'exploitation
  - Organisation mémoire, exécution concurrente
- La plupart des instructions disponibles à ce niveau sont directement traitées par les couches inférieures
- Les instructions spécifiques au système font l'objet d'une interprétation partielle (appels système)

Couche langage d'assemblage

- Offre une forme symbolique aux langages des couches inférieures
- Permet à des humains d'interagir avec les couches inférieures

Couche langages d'application

- Met à la disposition des programmeurs d'applications un ensemble de langages adaptés à leurs besoins
- Langages dits « de haut niveau »

Structure d'un ordinateur (1)

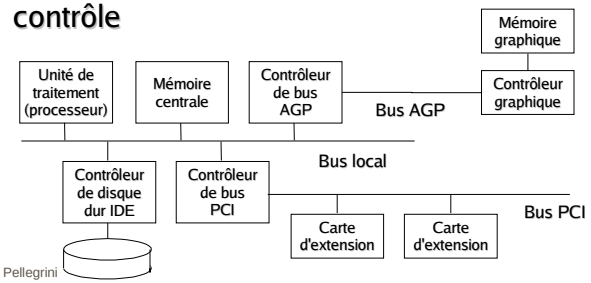
- Un ordinateur est une machine programmable de traitement de l'information
- Pour accomplir sa fonction, il doit pouvoir :
  - Acquérir de l'information de l'extérieur
  - Stocker en son sein ces informations
  - Combiner entre elles les informations à sa disposition
  - Restituer ces informations à l'extérieur

Structure d'un ordinateur (2)

- L'ordinateur doit donc posséder :
  - Une ou plusieurs unités de stockage, pour mémoriser le programme en cours d'exécution ainsi que les données qu'il manipule
  - Une unité de traitement permettant l'exécution des instructions du programme et des calculs sur les données qu'elles spécifient
  - Différents dispositifs « périphériques » servant à interagir avec l'extérieur : clavier, écran, souris, carte graphique, carte réseau, etc.

Structure d'un ordinateur (3)

- Les constituants de l'ordinateur sont reliés par un ou plusieurs bus, ensembles de fils parallèles servant à la transmission des adresses, des données, et des signaux de contrôle



Unité de traitement (1)

- L'unité de traitement (ou CPU, pour « *Central Processing Unit* ») est le coeur de l'ordinateur
- Elle exécute les programmes chargés en mémoire centrale en extrayant l'une après l'autre leurs instructions, en les analysant, et en les exécutant

Unité de traitement (2)

- L'unité de traitement est composé de plusieurs sous-ensembles distincts
  - L'unité de contrôle, qui est responsable de la recherche des instructions à partir de la mémoire centrale et du décodage de leur type
  - L'unité arithmétique et logique (UAL), qui effectue les opérations spécifiées par les instructions
  - Un ensemble de registres, zones mémoires rapides servant au stockage temporaire des données en cours de traitement par l'unité centrale

Registres

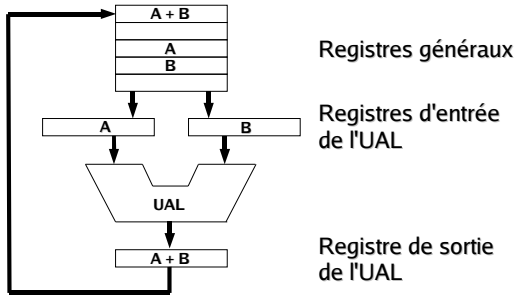
- Chaque registre peut stocker une valeur entière distincte, bornée par la taille des registres (nombre de bits)
- Certains registres sont spécialisés, comme :
  - le compteur ordinal (« *program counter* ») qui stocke l'adresse de la prochaine instruction à exécuter
  - le registre d'instruction (« instruction register »), qui stocke l'instruction en cours d'exécution
  - l'accumulateur, registre résultat de l'UAL, etc.

Chemin de données (1)

- Le chemin de données représente la structure interne de l'unité de traitement
  - Comprend les registres, l'UAL, et un ensemble de bus internes dédiés
  - L'UAL peut posséder ses propres registres destinés à mémoriser les données d'entrées afin de stabiliser leurs signaux pendant que l'UAL calcule
- Le chemin des données conditionne fortement la puissance des machines
  - Chemins multiples pour la superscalarité

Chemin de données (2)

- Chemin de données d'une machine de type Von Neumann



Exécution d'une instruction (1)

- L'exécution d'une instruction par l'unité centrale s'effectue selon les étapes suivantes :
  1. Charger la prochaine instruction à exécuter depuis la mémoire vers le registre d'instruction
  2. Décoder (analyser) l'instruction venant d'être lue
  3. Faire pointer le compteur ordinal vers l'instruction suivante (cas des branchements)
  4. Localiser en mémoire les données nécessaires
  5. Charger si nécessaire les données dans l'UAL
  6. Exécuter l'instruction, puis recommencer

Principes de conception

- L'augmentation continuelle de la vitesse de traitement du cycle du chemin de données provient de la mise en oeuvre d'un ensemble de principes généraux de conception efficaces
  - Simplification des jeux d'instructions
  - Utilisation du parallélisme au niveau des instructions (« *Instruction-Level Parallelism* », ou ILP)

RISC et CISC (1)

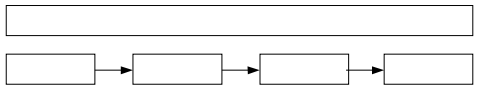
- Plus les instructions sont simples à décoder, plus elles pourront être exécutées rapidement
- Après une tendance à la complexification des jeux d'instructions (« *Complex Instruction Set Computer* », ou CISC), pour économiser la mémoire, on a conçu à nouveau des processeurs au jeu d'instructions moins expressif mais pouvant s'exécuter beaucoup plus rapidement (« *Reduced Instruction Set Computer* », ou RISC)

RISC et CISC (2)

- Les architectures RISC se distinguent par un certain nombre de choix de conception
  - Toute instruction est traitée directement par des composants matériels (pas de micro-code)
  - Le format des instructions est simple (même taille, peu de types différents)
  - Seules les instructions de chargement et de sauvegarde peuvent accéder à la mémoire
  - Présence d'un grand nombre de registres
  - Architecture orthogonale : toute instruction peut utiliser tout registre : que des registres généralistes

Pipe-line

- Lorsqu'un même traitement se répète dans le temps, et peut être découpé en sous-tâches élémentaires, on peut mettre en place une chaîne de traitement appelée pipe-line
  - Le nombre de sous-unités fonctionnelles est appelé nombre d'étages du pipe-line
  - Un pipe-line à d étages sort son premier résultat au temps d, puis un résultat par cycle (d fois plus vite)



Superscalarité

- Afin d'augmenter le nombre d'instructions traitées par unité de temps, on fait en sorte que le processeur puisse lire et exécuter plusieurs instructions en même temps
  - Problèmes de dépendances entre instructions
  - Entrelacement de code effectué par le compilateur
  - Réordonnancement dynamique des instructions par le processeur

Mémoire

- La mémoire principale sert au stockage des programmes et de leurs données
- L'unité élémentaire de mémoire est le bit, pour « *binary digit* » (« chiffre binaire »), prenant deux valeurs, 0 ou 1
- Le stockage physique des bits dépend des technologies employées : différentiels de tension, moments magnétiques, cuvettes ou surfaces planes, émission de photons ou non, etc.

Adressage mémoire (1)

- Les mémoires informatiques sont organisées comme un ensemble de cellules pouvant chacune stocker une valeur numérique
- Chaque cellule possède un numéro unique, appelé adresse, auquel les programmes peuvent se référer.
- Toutes les cellules d'une mémoire contiennent le même nombre de bits
- Une cellule de n bits peut stocker 2^n valeurs numériques différentes

Adressage mémoire (2)

- Deux cellules mémoire adjacentes ont des adresses mémoires consécutives
- Les ordinateurs, basés sur le système binaire, représentent également les adresses sous forme binaire
- Une adresse sur m bits peut adresser 2^m cellules distinctes, indépendemment du nombre de bits contenus dans chaque cellule

Adressage mémoire (3)

- La cellule est la plus petite unité mémoire pouvant être adressée
  - Il y a maintenant consensus autour d'une cellule à 8 bits, appelée « octet » (« byte » en anglais)
- Afin d'être plus efficaces, les unités de traitement ne manipulent plus des octets individuels mais des mots de plusieurs octets
  - 4 octets par mot pour une machine 32 bits
- La plupart des mémoires travaillent aussi par mots

Correction d'erreurs mémoire (1)

- Les mémoires d'ordinateurs peuvent parfois stocker des valeurs erronées, du fait de sautes de tension ou autres
- Pour se protéger de ces phénomènes, les mémoires récentes utilisent des codes auto-correcteurs
  - La mémoire possède des capacités de stockage supplémentaires permettant l'enregistrement d'informations de contrôle
  - On vérifie la cohérence de ces informations chaque fois qu'un mot est lu à partir de la mémoire

Correction d'erreurs mémoire (2)

- Si, pour chaque ensemble de m bits, on ajoute r bits de contrôle, on lit à chaque fois un ensemble de (m + r) bits constituant un mot de code, à traduire en le mot de m bits voulu
- Le nombre minimum de bits dont deux mots de code quelconques diffèrent est appelée distance de Hamming
  - Si la distance de Hamming d'un code est de 3, on peut corriger une erreur et en détecter deux

Hiérarchie mémoire (1)

- La mémoire rapide est très chère et consomme beaucoup
- On a donc une hiérarchie mémoire, avec au sommet des mémoire rapides et de petites tailles, et en bas des mémoires de grande capacité, très peu chères et peu rapides
  - Registres
  - Caches
  - Mémoire centrale
  - Disque dur ...

Hiérarchie mémoire (2)

- La hiérarchie mémoire fonctionne grâce au principe de localité
  - Localité temporelle : plus un mot mémoire a été accédé récemment, plus il est probable qu'il soit ré-accédé à nouveau
  - Localité spatiale : plus un mot mémoire est proche du dernier mot mémoire accédé, plus il est probable qu'il soit accédé
- Les caches tirent parti de ce principe
  - Sauvegardent les informations les plus récemment accédées, en cas de ré-accès

Contrôleur de périphérique (1)

- Tout périphérique d'entrée/sortie est constitué de deux parties
  - Un sous-système contenant la plupart de l'électronique de commande, appelé le contrôleur de périphérique
  - Le matériel du périphérique proprement dit

Contrôleur de périphérique (2)

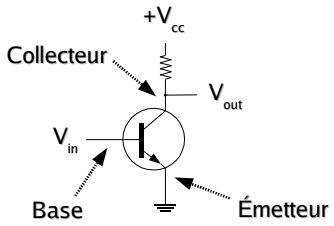
- Lors des échanges entre l'unité centrale et les périphériques, le processeur doit intervenir pour initialiser l'opération, mais il n'est pas nécessaire qu'il s'occupe des transferts mémoire
- Certains contrôleurs sont capables d'accéder la mémoire centrale sans que l'unité centrale soit mobilisée, faisant ainsi des DMA (« Direct Memory Access »)

Circuits logiques

- Un circuit logique est un circuit qui ne manipule que deux valeurs logiques : 0 et 1
- À l'intérieur des circuits, on représente typiquement un état 0 par un signal de basse tension (proche de 0V) et un état 1 par un signal de haute tension (5V, 3,3V, 2,5V, ou 1,8V selon les technologies)
- De minuscules dispositifs électroniques, appelées « portes », peuvent calculer différentes fonctions à partir de ces signaux

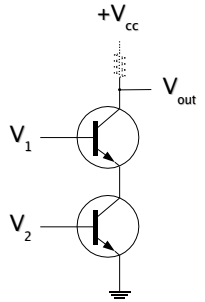
Transistors (1)

- L'électronique numérique repose sur le fait qu'un transistor peut servir de commutateur logique extrêmement rapide
- Quand V_{in} est bas, V_{out} est haut
- Quand V_{in} est haut, V_{out} est bas
- Ce circuit est un inverseur



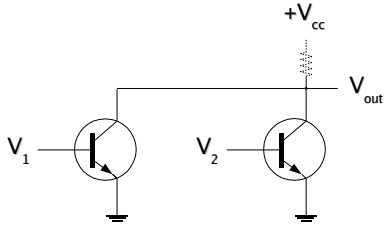
Transistors (2)

- En combinant deux transistors en série, on obtient un circuit tel que V_{out} n'est dans l'état bas que quand V1 et V2 sont tous les deux dans l'état haut



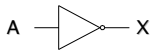
Transistors (3)

- En combinant deux transistors en parallèle, on obtient un circuit tel que V_{out} est dans l'état bas si V_1 ou V_2, ou bien les deux, sont dans l'état haut



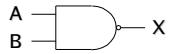
Portes logiques (1)

- En identifiant l'état haut à la valeur 1 et l'état bas à la valeur 0, on peut exprimer la valeur de sortie de ces trois circuits à partir des valeurs de leurs entrées



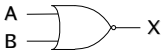
A	X
0	1
1	0

NON



A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NAND



A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

NOR

Portes logiques (2)

- Les portes NAND et NOR ne nécessitent que deux transistors, alors que les portes AND et OR en nécessitent trois (un inverseur en plus)
- Les circuits des ordinateurs sont donc plutôt construits avec des portes NAND et NOR
- Ces portes ont parfois plus de deux entrées, mais en ont rarement plus de 8
  - Problème de dissipation de puissance : *fan-in*

Algèbre booléenne

- Pour décrire les circuits réalisables en combinant des portes logiques, on a besoin d'une algèbre opérant sur les variables 0 et 1
  - Algèbre booléenne (G. Boole : 1815 - 1864)

Fonctions booléennes (1)

- Une fonction booléenne à un ou plusieurs paramètres est une fonction qui renvoie une valeur ne dépendant que de ces paramètres
- La fonction NON est ainsi définie comme :
  - f(A) = 1 si A = 0
  - f(A) = 0 si A = 1

Fonctions booléennes (1)

- Une fonction booléenne à n variables a seulement 2^n combinaisons d'entrées possibles
- Elle peut être complètement décrite par une table à 2^n lignes donnant la valeur de la fonction pour chaque combinaison d'entrées
  - Table de vérité de la fonction
- Elle peut aussi être décrite par le nombre à 2^n bits correspondant à la lecture verticale de la colonne de sortie de la table
  - NAND : 1110, NOR : 1000, AND : 0001, etc.

Fonctions booléennes (2)

- Toute fonction peut être décrite en spécifiant lesquelles des combinaisons d'entrée donne 1
- On peut donc représenter une fonction logique comme le « ou » logique (OR) d'un ensemble de conditions « et » (AND) sur les combinaisons d'entrée

Fonctions booléennes (3)

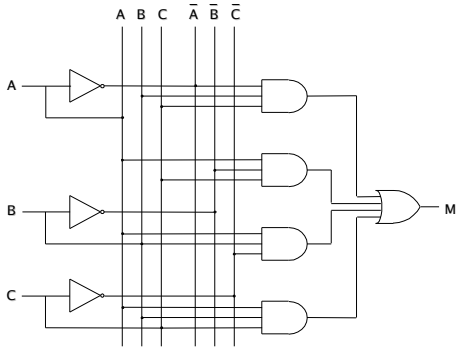
- En notant :
  - $\overline{A}$ le NOT de A
  - A + B le OR de A et B
  - A.B ou AB le AND de A et B

  on peut représenter une fonction comme somme logique de produits logiques
- Par exemple :
  - $A\overline{B}C$ vaut 1 seulement si A = 1 et B = 0 et C = 1
  - $A\overline{B} + B\overline{C}$ vaut 1 si et seulement si (A = 1 et B = 0) ou bien (B = 1 et C = 0)

Fonctions booléennes (4)

- Exemple : la fonction majorité M

A	B	C	M
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1



Fonctions booléennes (5)

- Toute fonction logique de n variables peut donc être décrite sous la forme d'une somme logique d'au plus 2^n produits de termes
  - Par exemple : M = $\overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$
- Cette formulation fournit une méthode directe pour câbler n'importe quelle fonction booléenne

Câblage des fonctions booléennes

- La méthode est la suivante :
  1-Calculer la table de vérité de la fonction
  2-Câbler des inverseurs pour fournir le complément de chacune des entrées
  3-Placer une porte AND par ligne de la table de vérité renvoyant un 1
  4-Lier chaque porte AND à ses entrées
  5-Lier toutes les sorties des portes AND à une porte OR

Câblage avec NAND et NOR (1)

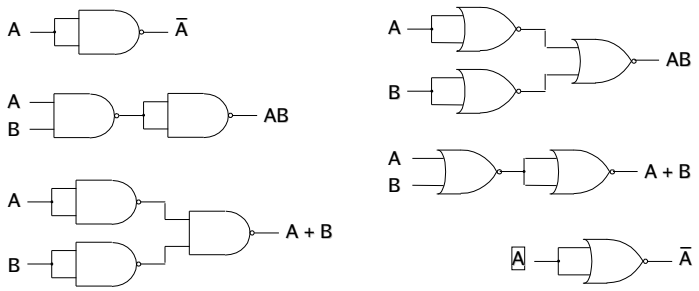
- Il est généralement plus simple de ne câbler un circuit qu'avec un seul type de porte logique
- Les portes NAND et NOR sont dites « complètes », en ce sens que toute fonction booléenne peut être câblée uniquement au moyen de l'un de ces types de portes

Câblage avec NAND et NOR (2)

- Méthode de câblage avec NAND et NOR
  1-Appliquer la méthode précédente pour câbler la fonction avec des portes AND et OR multiples
  2-Remplacer toutes les portes multi-entrées par des arbres de portes à deux entrées
  3-Remplacer les portes AND, OR et NOT par des circuits équivalents de portes NAND et NOR

Câblage avec NAND et NOR (3)

- Câblage de AND, OR et NOT avec NAND ou NOR



Simplification du câblage (1)

- Deux circuits sont équivalents si et seulement si leurs tables de vérité sont identiques
- Il est intéressant de câbler un circuit avec le moins de portes possible
  - Économie de place sur le processeur
  - Réduction de la consommation électrique
  - Réduction du temps de parcours du signal
- L'algèbre booléenne peut être un outil efficace pour simplifier les circuits

Simplification du câblage (2)

- La plupart des règles de l'algèbre ordinaire restent valides pour l'algèbre booléenne
- Exemple : AB + AC = A (B + C)
  - On passe de trois portes à deux
  - Le nombre de niveaux de portes reste le même

Simplification du câblage (3)

- Pour réduire la complexité des circuits booléens, on essaye d'appliquer des identités simplificatrices à la fonction initiale décrivant le circuit
- Besoin d'identités remarquables pour l'algèbre booléenne

Identités booléennes (1)

Nom	Forme AND	Forme OR
Identité	$1A = A$	$0 + A = A$
Nul	$0A = 0$	$1 + A = 1$
Idempotence	$AA = A$	$A + A = A$
Inverse	$A\overline{A} = 0$	$A + \overline{A} = 1$
Commutativité	$AB = BA$	$A + B = B + A$
Associativité	$(AB)C = A(BC)$	$(A + B) + C = A + (B + C)$
Distributivité	$A + BC = (A + B)(A + C)$	$A(B + C) = AB + AC$
Absorbtion	$A(A + B) = A$	$A + AB = A$
De Morgan	$\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$	$\overline{A + B} = \overline{A}\,\overline{B}$

Identités booléennes (2)

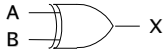
- Chaque loi a deux formes, qui sont duales si on échange les rôles respectifs de AND et OR et de 0 et 1
- La loi de De Morgan peut être étendue à plus de deux termes
  - $\overline{ABC} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C}$

Application de la loi de De Morgan

- La loi de De Morgan suggère une notation alternative des portes logiques
- Une porte OR avec ses deux entrées inversées est équivalente à une porte NAND
- Une porte NOR peut être dessinée comme une porte AND avec ses deux entrées inversées

Porte XOR (1)

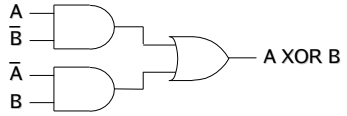
- Grâce aux identités, il est facile de convertir la représentation en somme de produits en une forme purement NAND ou NOR
- Exemple : la fonction « ou exclusif » ou XOR
  - XOR = $A\bar{B} + \bar{A}B$

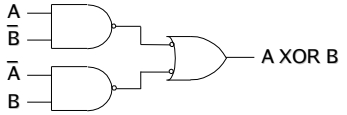


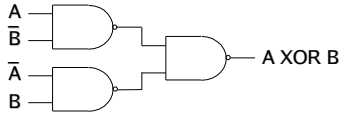
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XOR

Porte XOR (2)







Circuits digitaux élémentaires

- Pour implémenter des circuits logiques complexes, on ne part pas des portes logiques elles-mêmes mais de sous-ensembles fonctionnels tels que :
  - Circuits combinatoires
  - Circuits arithmétiques
  - Horloges

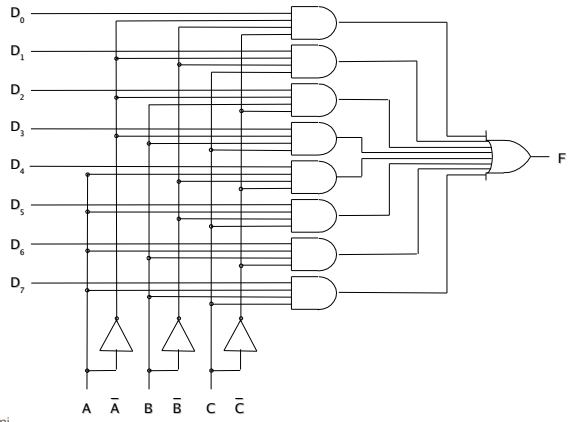
Circuits combinatoires

- Un circuit combinatoire est un circuit possédant des entrées et des sorties multiples, telles que les valeurs des sorties ne dépendent que des valeurs d'entrée
- Cette classe comprend les circuits tels que :
  - Multiplexeurs
  - Décodeurs
  - Comparateurs
  - Circuits logiques programmables (« *Programmable Logic Arrays* », ou PLA)

Multiplexeur (1)

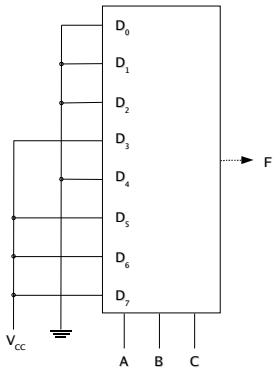
- Un multiplexeur est un circuit possédant 2^n entrées de données, une unique sortie, et n entrées de contrôle servant à sélectionner l'une des entrées
- La valeur de l'entrée sélectionnée est répercutée (routée) sur la sortie
- Les n entrées de contrôle codent un nombre binaire à n bits spécifiant le numéro de l'entrée sélectionnée

Multiplexeur (2)



Multiplexeur

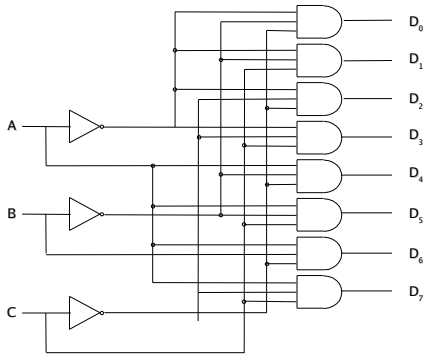
- Câblage d'un multiplexeur pour calculer la fonction majorité



Décodeur (1)

- Un décodeur est un circuit qui prend un nombre binaire à n bits en entrée et se sert de celui-ci pour sélectionner l'une de ses 2^n sorties
- Le décodeur est le circuit dual du multiplexeur

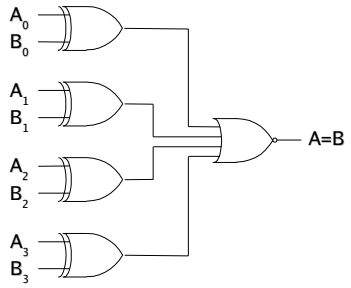
Décodeur (2)



Comparateur (1)

- Un comparateur est un circuit qui compare deux mots et qui produit 1 s'ils sont égaux bit à bit ou 0 sinon
- On le construit à partir de portes XOR, qui produisent 1 si deux bits en regard sont différents

Comparateur (2)



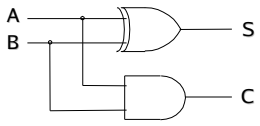
Circuits arithmétiques

- Les circuits arithmétiques sont des circuits logiques capables d'effectuer des opérations arithmétiques simples telles que l'addition
- Les circuits les plus courants comprennent des circuits tels que :
  - Additionneur
  - Registre à décalage
  - Unité arithmétique et logique

Additionneur (1)

- Tous les processeurs disposent d'un ou plusieurs circuits additionneurs
- Ces additionneurs sont construits à partir de circuits appelés « demi-additionneurs »

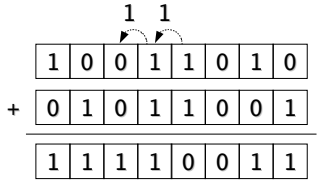
A	B	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0



S : Somme
C : Retenue (« carry »)

Additionneur (2)

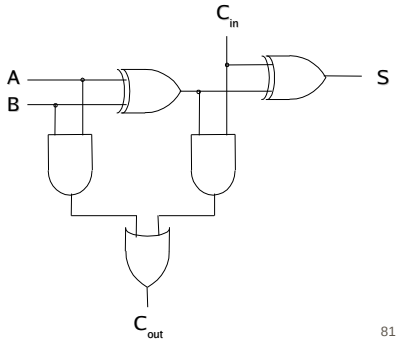
- En fait, pour additionner deux bits situés au milieu d'un mot, il faut aussi prendre en compte la retenue provenant de l'addition du bit précédent et propager sa retenue au bit suivant



Additionneur (3)

- On utilise donc deux demi-additionneurs pour réaliser une tranche d'additionneur complet

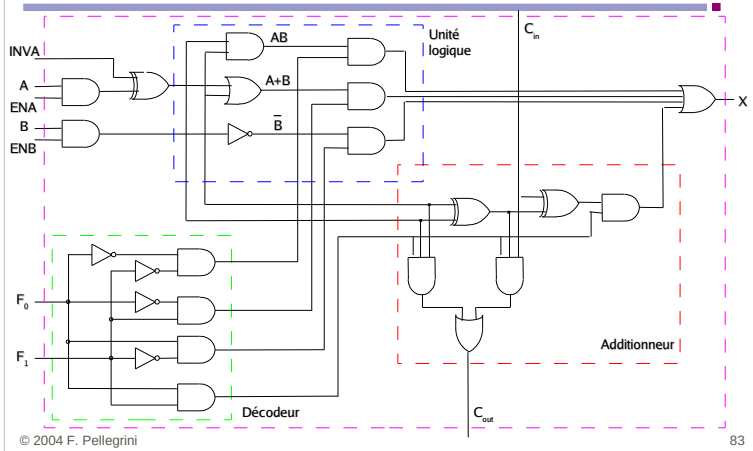
A	B	Cin	Cout	S
0	0	0	0	0
0	1	0	0	1
1	0	0	0	1
1	1	0	1	0
0	0	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	1	1	0
1	1	1	1	1



Unité arithmétique et logique (1)

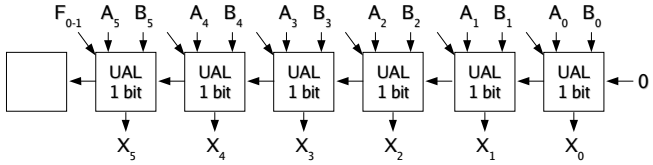
- La plupart des ordinateurs possèdent un circuit unique pour réaliser la somme, le AND ou le OU de deux mots machines : l'Unité Arithmétique et Logique
- Le type de la fonction a calculer est déterminé par des entrées de contrôle

Unité arithmétique et logique (2)



Unité arithmétique et logique (2)

- Pour opérer sur des mots de n bits, l'UAL est constituée de la mise en série de n tranches d'UAL de 1 bit

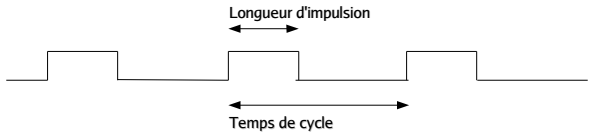


Horloge (1)

- Dans de nombreux circuits digitaux, il est essentiel de pouvoir garantir l'ordre dans lequel certains événements se produisent
  - Deux événements doivent absolument avoir lieu en même temps
  - Deux événements doivent absolument se produire l'un après l'autre
- Nécessité de disposer d'une horloge pour synchroniser les événements entre eux

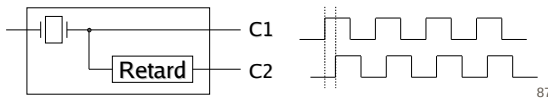
Horloge (2)

- Une horloge est un circuit qui émet de façon continue une série d'impulsions caractérisées par :
  - La longueur de l'impulsion
  - L'intervalle entre deux pulsations successives, appelé temps de cycle de l'horloge



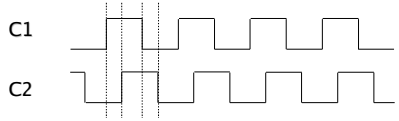
Cycles et sous-cycles (1)

- Dans un ordinateur, de nombreux événements ont à se produire au cours d'un cycle d'horloge
- Si ces événements doivent être séquencés dans un ordre précis, le cycle d'horloge doit être décomposé en sous-cycles
- Un moyen classique pour cela consiste à retarder la copie d'un signal d'horloge primaire afin d'obtenir un signal secondaire décalé en phase



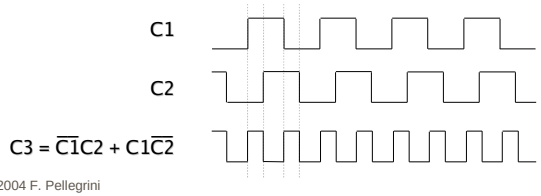
Cycles et sous-cycles (2)

- On dispose alors de quatre bases de temps au lieu de deux
  - Fronts montant et descendant de C1
  - Fronts montant et descentant de C2



Cycles et sous-cycles (3)

- Dans certains circuits, on s'intéressera plutôt aux intervalles qu'à des instants précis
  - Action possible seulement lorsque C1 est haut
- On peut alors construire des sous-intervalles en s'appuyant sur les signaux original et retardé

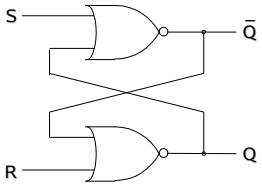


Mémoire

- Pour stocker les informations, il faut un circuit capable de « se souvenir » de la dernière valeur d'entrée qui lui a été fournie
- À la différence d'un circuit combinatoire, sa valeur ne dépend donc pas que de ses valeurs d'entrée courantes
  - Présence de boucles de rétroaction pour préserver l'état courant
- On peut construire un tel circuit à partir de deux portes NAND ou deux portes NOR rebouclées

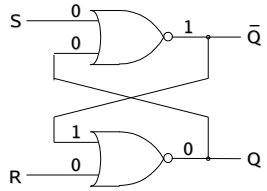
Bascule SR

- Une bascule SR est un circuit qui a deux entrées et deux sorties
  - Une entrée S pour positionner la bascule
  - Une entrée R pour réinitialiser la bascule
  - Deux sorties Q et $\overline{Q}$ complémentaires l'une de l'autre



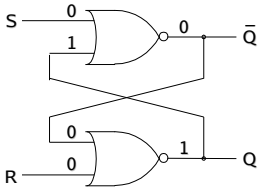
Bascule SR – État 0

- Si S et R valent 0, et que Q vaut 0, alors :
  - $\overline{Q}$ vaut 1
  - Les deux entrées de la porte du bas sont 0 et 1, donc Q vaut 0
- Cette configuration est cohérente et stable



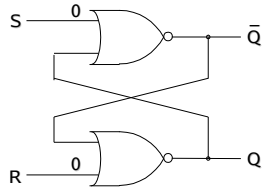
Bascule SR – État 1

- Si S et R valent 0, et que Q vaut 1, alors :
  - $\bar{Q}$ vaut 0
  - Les deux entrées de la porte du bas sont 0 et 0, donc Q vaut 1
- Cette configuration est cohérente et stable



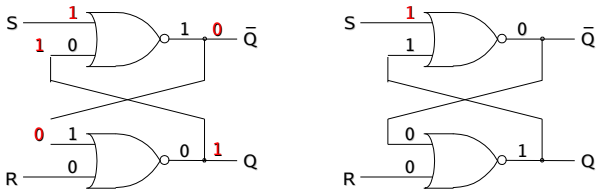
Bascule SR – États stables

- On ne peut avoir simultanément Q à 0 et $\bar{Q}$ à 0
- On ne peut avoir simultanément Q à 1 et $\bar{Q}$ à 1
- Lorsque S et R valent 0, la bascule possède deux états stables, tels que Q = 0 ou Q = 1



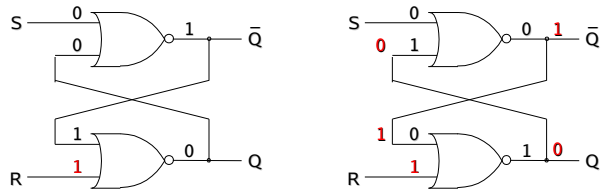
Bascule SR – Mise à 1

- Lorsque S vaut 1, que Q vaille 0 ou 1 :
  - La sortie de la porte du haut vaut 0, donc $\bar{Q}$ vaut 0
  - La sortie de la porte du bas vaut 1, donc Q vaut 1
  - Cet état est stable
- Même lorsque S repasse à 0, Q reste à 1



Bascule SR – Mise à 0

- Lorsque R vaut 1, que Q vaille 0 ou 1 :
  - La sortie de la porte du bas vaut 0, donc Q vaut 0
  - La sortie de la porte du haut vaut 1, donc $\bar{Q}$ vaut 1
  - Cet état est stable
- Même lorsque R repasse à 0, Q reste à 0

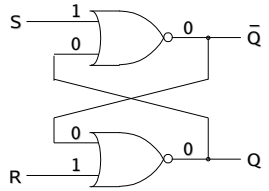


Bascule SR – Résumé (1)

- Lorsque S vaut temporairement 1, la bascule se stabilise dans l'état Q = 1, quel que soit son état antérieur
- Lorsque R vaut temporairement 1, la bascule se stabilise dans l'état Q = 0, quel que soit son état antérieur
- Le circuit mémorise laquelle des entrées S ou R a été activée en dernier
- Ce circuit peut servir de base à la création de mémoires

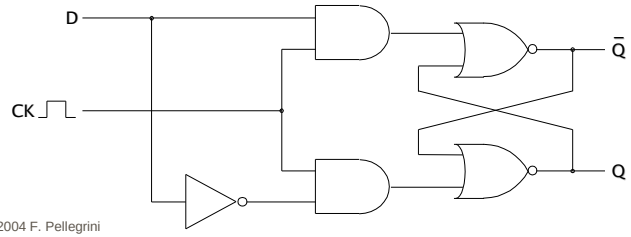
Bascule SR – Résumé (2)

- Cependant, l'état de la bascule peut être indéterminé
  - Lorsque S et R sont simultanément à 1, on est dans un état stable dans lequel Q et $\bar{Q}$ valent 0
  - Lorsque S et R repassent simultanément à 0, l'état final de la bascule est non prévisible



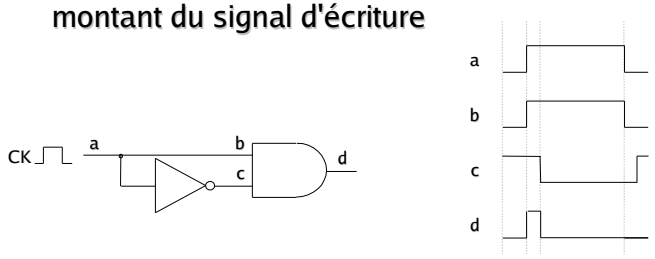
Bascule D (1)

- Pour éviter cela, on n'a qu'un seul signal D
  - Destiné à l'entrée S, et que l'on inverse pour R
  - On commande la bascule par un signal d'activation
- On a une mémoire à 1 bit

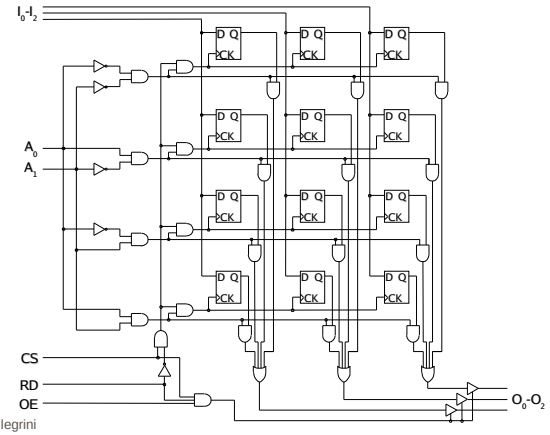


Bascule D (2)

- Pour que l'on soit sûr que la valeur conservée en mémoire soit bien celle présente en début de cycle d'écriture, il faudrait n'autoriser l'écriture qu'au début du cycle, sur le front montant du signal d'écriture



Circuit mémoire (1)



Circuit mémoire (2)

- Mémoire à 4 mots de 3 bits
- Ce circuit possède trois broches de commande
  - CS (« *chip select* ») : actif pour sélectionner ce circuit mémoire
  - RD (« *read* ») : positionné à 1 si l'on souhaite réaliser une lecture, et à 0 si l'on souhaite une écriture
  - OE (« *output enable* ») : positionné à 1 pour activer les lignes de sortie
    - Utilise des interrupteurs à trois états (0, 1, déconnecté)
    - Permet de connecter I_0-I_2 et O_0-O_2 sur les mêmes lignes de données

Types de mémoire

- Il existe différents types de mémoire
  - RAM
  - ROM
  - PROM
  - EPROM
  - EEPROM
  - Flash

Mémoire RAM

- « *Random Access Memory* » (« Mémoire vive »)
  - Les données stockées ne sont conservées que tant que la mémoire est alimentée électriquement
- Deux variétés :
  - RAM statique
    - Celle vue dans le circuit précédent
    - Conservent leurs valeurs sans intervention particulière
  - RAM dynamique
    - Basée sur des petits condensateurs, moins gourmands en place et en consommation électrique
    - Nécessite un rafraîchissement régulier des charges

Mémoire ROM

- « *Read Only Memory* » (« Mémoire morte »)
  - Les données stockées perdurent même quand la mémoire n'est pas alimentée
  - Le contenu, figé à la fabrication, ne peut plus être modifié d'aucune façon
  - Analogue au câblage d'une fonction booléenne dépendant des valeurs d'adresses fournies
- Coûteuse du fait de la fabrication

Mémoire PROM

- « Programmable ROM »
- Les ROMs sont trop longues à faire fabriquer par rapport aux cycles de développement des équipements
- La PROM, livrée vierge (tous bits à 1), peut être programmée avec un équipement adapté
  - Destruction de mini-fusibles par surtension
  - Une seule écriture possible

Mémoire EPROM

- Les mémoires PROM sont encore trop chères
  - Grande consommation lors des phases de développement
- Les mémoires EPROM peuvent être réutilisées en les réinitialisant par exposition aux rayons ultra-violets
  - Petite fenêtre en mica sur le boîtier (mais pastille adhésive pour éviter les UV des tubes à néon)
- Les mémoires EEPROM et Flash sont effaçables électriquement

Bus (1)

- Un bus est un chemin électrique commun reliant plusieurs équipements
- Défini par un protocole, qui spécifie ses caractéristiques mécaniques et électriques
- Exemples :
  - PC bus : bus interne des PC/XT conçu par IBM
  - AGP : bus pour carte graphique
  - SCSI : dialogue avec des périphériques
  - FireWire : connexion entre équipements grand public ...

Bus (2)

- Les équipements attachés au bus peuvent être :
  - Actifs, s'ils peuvent initier des transferts de données par eux-mêmes (maîtres)
  - Passifs, s'ils ne font qu'attendre des requêtes et y répondre de façon synchrone (esclaves)
- Certains équipements peuvent avoir les deux rôles à la fois
  - Un contrôleur de disque reçoit passivement les requêtes en provenance du processeur, mais pilote activement le transfert des blocs de données vers la mémoire une fois qu'ils ont été lus sur le disque

Bus (3)

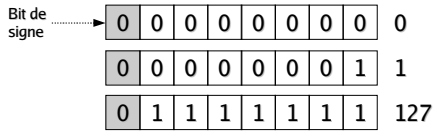
- Les lignes des bus sont divisées fonctionnellement en trois catégories
  - Lignes de contrôle
  - Lignes d'adresses
  - Lignes de données (éventuellement multiplexées avec les lignes d'adresses)
- Les bus peuvent être :
  - Synchrones : pilotés par une horloge maître
  - Asynchrones : nécessité de négociation entre le maître et l'esclave pour se synchroniser

Arithmétique entière (1)

- Avec n bits, on dispose de 2^n combinaisons possibles, qui permettent de représenter les nombres entiers naturels de 0 à $2^n - 1$
- Si l'on souhaite en plus pouvoir représenter des nombres négatifs, l'idée naturelle consiste à transformer le bit de poids le plus fort en bit de signe, pour coder 2^{n-1} nombres entiers positifs et 2^{n-1} nombres entiers négatifs

Arithmétique entière (2)

- Lorsque le bit de signe est à 0, on considère que le nombre est positif, et on code les entiers naturels de 0 à $2^{n-1} - 1$



Arithmétique entière (3)

- Lorsque le bit de signe est à 1, on considère que le nombre est négatif
- Plusieurs moyens sont envisageables pour coder les entiers négatifs avec les 2^{n-1} bits restants

Arithmétique entière (3)

- Codage des nombres négatifs au format naturel
  - Même codage des 2^{n-1} bits restants que pour les nombres positifs

1	0	0	0	0	0	0	1	-1

  - Problèmes :
    - On a deux zéros (gaspillage d'une configuration)

0	0	0	0	0	0	0	0	+0
1	0	0	0	0	0	0	0	-0

    - Nécessité d'un circuit spécifique pour la soustraction

Arithmétique entière (4)

- Pour éviter les problèmes du codage précédent, il faut un codage des nombres négatifs tel que :
  - Le bit de signe soit à 1
  - Il n'y ait qu'un seul zéro
  - On n'utilise que le circuit d'addition standard pour additionner nombres positifs et négatifs

Arithmétique entière (5)

- En particulier, avec les contraintes précédentes, on veut :

	0	0	0	0	0	0	0	1	1
+	1	.	.	.	.	.	.	.	-1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- La seule solution possible est donc :

1	1	1	1	1	1	1	1	-1

qui génère une retenue en sortie, perdue par débordement (« *overflow* »)

Arithmétique entière (6)

- Pour représenter l'opposé d'un nombre entier, on prend son complément bit à bit, auquel on ajoute 1
  - Ajouter un nombre à son complément bit à bit donne toujours un vecteur constitué uniquement de 1
  - Ajouter 1 à ce vecteur donne un vecteur constitué uniquement de 0, après débordement
- Cette notation est appelée « complément à deux »

Arithmétique entière (7)

- Exemple

	0	0	1	0	1	1	1	0	46
+	1	1	0	0	1	0	1	1	-53
	1	1	1	1	1	0	0	1	-7

Arithmétique entière (8)

- Principales valeurs en complément à deux pour un nombre sur 8 bits

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	-1
0	1	1	1	1	1	1	1	127
1	0	0	0	0	0	0	0	-128

Le domaine de validité d'un nombre entier signé sur n bits est donc $[-2^{n-1},2^{n-1}-1]$

Arithmétique flottante (1)

- Dans de nombreux calculs, il n'est pas possible d'utiliser des nombres entiers, et le domaine des nombres manipulés est très grand
  - Masse de l'électron : 9×10^{-28} grammes
  - Masse du soleil : 2×10^{33} grammes
  - Le domaine dépasse les 10^{60}
- Nécessité de trouver un format adapté pour représenter de tels nombres avec un petit nombre de bits (32 ou 64 en pratique)

Arithmétique flottante (2)

- Comme le domaine à représenter est infini, il faut l'échantillonner de façon représentative
- On représentera donc un nombre à virgule sous la forme scientifique

$$n = f \times 10^e$$

  - f : fraction, ou mantisse
  - e : exposant, sous la forme d'un entier signé

Arithmétique flottante (3)

- Par exemple :
  - $3.14 = 0.314 \times 10^1 = 3.140 \times 10^0$
  - $0.00001 = 0.01 \times 10^{-3} = 1.000 \times 10^{-5}$
- Le domaine dépend de la taille maximale de l'exposant
- La précision dépend du nombre maximal de chiffres significatifs de la mantisse

Arithmétique flottante (4)

- Il existe plusieurs représentations possibles du même nombre
- On privilégie toujours la forme normalisée, telle que le premier chiffre de la mantisse soit significatif, c'est-à-dire différent de zéro
- Cette forme maximise l'utilisation des chiffres significatifs de la mantisse, et donc la précision
  - $f = 0$ ou $f \in [1.0 ; 10.0 [$

$$f = \boxed{10^0}.\boxed{10^{-1}}\boxed{10^{-2}}\boxed{10^{-3}}\boxed{10^{-4}}\boxed{10^{-5}}\boxed{10^{-6}}\ldots$$

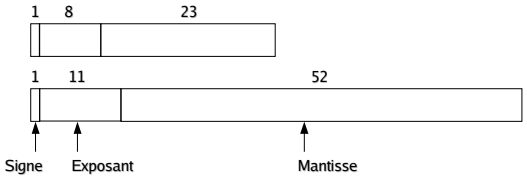
Norme IEEE 754 (1)

- Ce standard définit trois formats de nombres à virgule flottante
  - Simple précision (32 bits)
  - Double précision (64 bits)
  - Précision étendue (80 bits)
    - Utilisé pour stocker les résultats intermédiaires de calculs au sein des coprocesseurs arithmétiques
- Utilise la base 2 pour les mantisses et le codage par excédent pour les exposants

$$f = \boxed{2^0},\boxed{2^{-1}}\boxed{2^{-2}}\boxed{2^{-3}}\boxed{2^{-4}}\boxed{2^{-5}}\boxed{2^{-6}}\ldots$$

Norme IEEE 754 (2)

- Format des nombres
  - Commencent par un bit de signe (0 : positif)
  - Exposants définis par excès (127 pour la simple précision et 1023 pour la double précision)
    - Valeurs minimum (0) et maximum (255 ou 2047) réservées pour des codages spéciaux

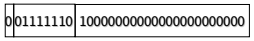


Norme IEEE 754 (3)

- Une mantisse normalisée est constituée d'un chiffre 1, de la virgule, et du reste de la mantisse
- Comme le 1 de tête doit toujours être présent, il n'est pas nécessaire de le stocker
- La pseudo-mantisse de la norme IEEE 754 est donc constituée implicitement d'un 1 et de la virgule, suivis des 23 ou 52 bits effectifs
  - On parle aussi de « significande »
  - Le significande code des valeurs dans [1;2[

Norme IEEE 754 (4)

- Exemple : représentation en simple précision du nombre 0.75_{10} :
  - $0.75_{10} = 1.1 \times 2^{-1}$
  - Le significande est donc : .1000...0
  - L'exposant est donc : -1 + 127 = 126 = 01111110_2
- Le codage du nombre est donc :



$3F400000_{16}$

Norme IEEE 754 (5)

- Un des problèmes principaux avec les nombres à virgule flottante est la gestion des erreurs numériques telles que :
  - Débordements (« *overflow* ») : le nombre est trop grand pour être représenté
  - Débordements inférieurs (« *underflow* ») : le nombre est trop petit pour être représenté
  - Résultat qui n'est pas un nombre (« *not-a-number* », ou NaN), comme par exemple le résultat d'une division par 0

Norme IEEE 754 (6)

- En plus des nombres normalisés classiques, la norme IEEE 754 définit donc quatre autres types numériques
  - Not-a-number : résultat impossible
  - Infini : infinis positif et négatif, pour le débordement
  - Zéro : zéros positif et négatif, pour le débordement inférieur
  - Nombres dénormalisés, pour les valeurs trop petites pour être représentables de façon normalisée

Norme IEEE 754 (7)

- Les nombres dénormalisés codent des nombres inférieurs au plus petit nombre normalisé représentable
  - Exposant égal à 0
  - Mantisse non nulle (sinon c'est le codage du zéro)
- Le plus petit nombre normalisé est 1.0×2^{-126}
- Le plus grand nombre dénormalisé est $0.111... \times 2^{-127}$ (équivalent au précédent), et le plus petit est $0.00...01 \times 2^{-127}$, c'est-à-dire $2^{-23} \times 2^{-127} = 2^{-150}$

Norme IEEE 754 (8)

- Codage des nombres
  - Normalisé :

±	0 < < max	Toute configuration

  - Dénormalisé :

±	00000000	Tout sauf tous les bits à 0

  - Zéro :

±	00000000	00000000000000000000000

  - Infini :

±	11111111	00000000000000000000000

  - NaN :

±	11111111	Tout sauf tous les bits à 0

Norme IEEE 754 (9)

- Tableau récapitulatif

	Simple précision	Double précision
Bit de signe	1	1
Bits d'exposant	8	11
Bits de mantisse	23	52
Taille totale	32	64
Codage de l'exposant	Excédent 127	Excédent 1023
Variation de l'exposant	-126 à +127	-1022 à +1023
Plus petit nombre normalisé	2^{-126}	2^{-1022}
Plus grand nombre normalisé	$< 2^{+128}$	$< 2^{+1024}$
Domaine décimal	$\simeq 10^{-38}$ à 10^{+38}	$\simeq 10^{-308}$ à 10^{+308}
Plus petit nombre dénormalisé	$\simeq 10^{-45}$	$\simeq 10^{-324}$

Micro-architecture (1)

- Le niveau de la micro-architecture réalise l'implémentation du jeu d'instructions spécifié par le niveau d'architecture du jeu d'instructions (ISA) en s'appuyant sur le niveau de la logique digitale
- La conception de la micro-architecture dépend du jeu d'instruction à implémenter, mais aussi du coût et des performances souhaités
  - Jeux d'instructions plus ou moins complexes (RISC/CISC)
  - Utilisation de l'ILP (« *Instruction-Level Parallelism* »)

Micro-architecture (2)

- L'exécution d'une instruction peut se décomposer en plusieurs sous-étapes
  - Recherche (« *Fetch* »)
    - Étant donné l'adresse de la prochaine instruction à exécuter, récupération de l'instruction
  - Decodage (« *Decode* »)
    - Détermination du type et de la nature des opérandes
  - Exécution (« *Execute* »)
    - Mise en oeuvre des unités fonctionnelles
  - Terminaison (« *Complete* »)
    - Modification en retour des registres ou de la mémoire

Micro-architecture (3)

- On peut imaginer la conception du niveau micro-architecture comme un problème de programmation
  - Chaque instruction du niveau ISA est une fonction
  - Le programme maître (micro-programme) est une boucle infinie qui détermine à chaque tour la bonne fonction à appeler et l'exécute
  - Le micro-programme dispose de variables d'état accessibles par chacune des fonctions, et modifiées spécifiquement selon la nature de la fonction
    - Compteur ordinal, registres généraux, etc.

Micro-architecture (4)

- Dans le cas d'un jeu d'instructions de type CISC, une instruction ISA doit être traduite en plusieurs micro-instructions
  - Cas des instructions « *REP SCAS* » des x86
- Chaque micro-instruction
  - S'exécute en un cycle élémentaire
  - Spécifie exactement les signaux de contrôle des différentes unités fonctionnelles
- Nécessité d'un séquenceur de micro-instructions
  - Machine d'états finis implémentable en ROM

Micro-architecture (5)

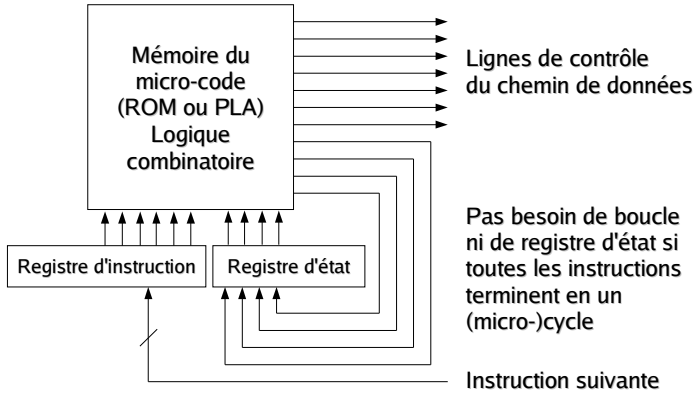
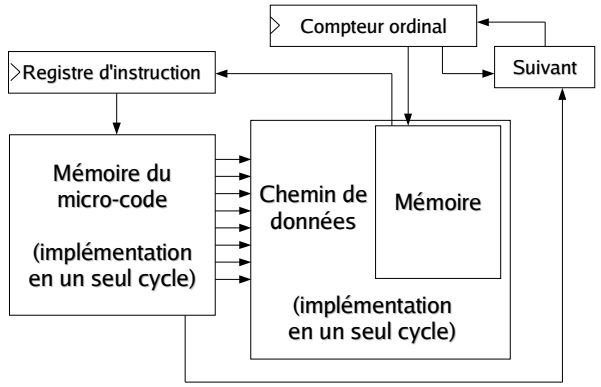


Schéma d'un processeur élémentaire

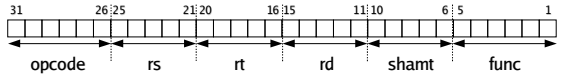


Instructions (1)

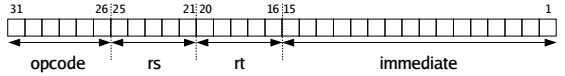
- Chaque instruction est composée d'un ou plusieurs champs
- Le premier, appelé « opcode », code le type d'opération réalisée par l'instruction
  - Opération arithmétique, branchement, etc.
- Les autres champs, optionnels, spécifient les opérandes de l'instruction
  - Registres source et destination des données à traiter
  - Adresse mémoire des données à lire ou écrire, etc.

Instructions (2)

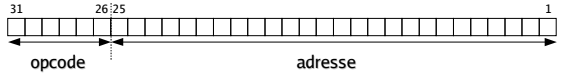
- Exemple : format des instructions RISC MIPS
  - Type R (registre)



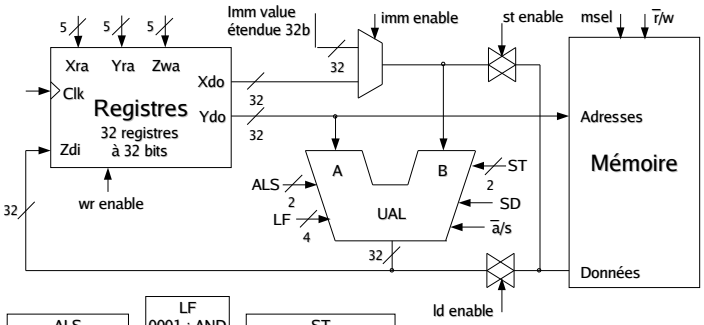
  - Type I (donnée immédiate)



  - Type J (branchement)



Contrôle du chemin de données



ALS
00 : Arithmétique
01 : Logique
10 : Décalage
11 : Desactivée

LF
0001 : AND
0011 : A
0101 : B
0110 : XOR
0111 : OR

ST
00 : Pas de décalage
01 : Arithmétique
10 : Logique
11 : Rotation

SD
0 : Décalage à gauche
1 : Décalage à droite

a/s
0 : Ajoute
1 : Soustrait

Micro-code (1)

- La logique de contrôle du micro-code associe à chaque (micro-)instruction un mot binaire commandant le chemin de données
  - Exemple : mise à zéro des mots mémoire situés aux adresses 0x0100 et 0x0104

Signaux de contrôle du chemin de données

Instruction	X (5)	Y (5)	Z (5)	we	imm_e	imm_val	ALS	a/s	LF	ST	SD	ld_e	st_e	r/w	msel
li r1,100	x	x	00001	1	1	0x0100	01	x	0101	x	x	0	0	x	0
sw r0,(r1)	00001	00000	x	0	0	x	11	x	x	x	x	0	1	1	1
add r1,r1,4	00001	x	00001	1	1	0x0004	00	0	x	x	x	0	0	x	0
sw r0,(r1)	00001	00000	x	0	0	x	11	x	x	x	x	0	1	1	1

Pile (1)

- Presque tous les langages de programmation incluent le concept de procédure disposant de variables locales
  - Ces variables peuvent être accédées pendant l'exécution de la procédure mais pas depuis la procédure appelante
  - Elles ne peuvent résider à une adresse absolue en mémoire, car cela empêcherait la réentrance
- Nécessité de créer dynamiquement des instances de ces variables lors des appels de procédures et de les supprimer à la fin

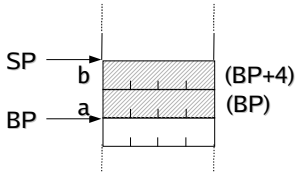
Pile (2)

- Une pile est une zone de la mémoire que l'on n'accède jamais de façon absolue mais toujours relativement à un registre
- Gérée en fait au moyen de deux registres
  - Un registre de base (« *Base Pointer* », ou BP) pointe sur le début de la zone mémoire allouée pour les variables locales de la procédure courante
  - Un registre de sommet de pile (« *Stack Pointer* », ou SP) pointe sur le dernier mot mémoire alloué

Pile (3)

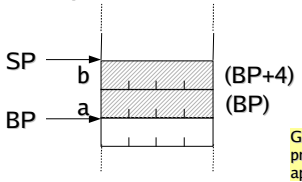
- Les variables locales à la procédue courante sont référencées par rapport à la valeur courante de BP
- La zone de données comprise entre BP et SP est appelée « contexte courant »

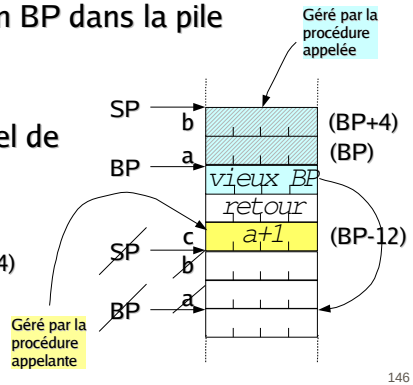
```
void
f (
int     c)
{
  int   a;
  int   b;
...
  f (a + 1);
...
}
```



Pile (4)

- Lors d'un appel de procédure, on sauve également l'ancien BP dans la pile
- BP permet aussi d'accéder aux paramètres d'appel de la procédure





Architecture du jeu d'instructions (1)

- La couche ISA (« *Instruction Set Architecture* ») définit l'architecture fonctionnelle de l'ordinateur
- Sert d'interface entre les couches logicielles et le matériel sous-jacent
- Définit le jeu d'instructions utilisable pour coder les programmes, qui peut être :
  - Directement implémenté de façon matérielle
    - Pas de registre d'état interne servant de compteur ordinal pour l'exécution des micro-instructions
  - Implémenté sous forme micro-programmée

Architecture du jeu d'instructions (2)

- Le jeu d'instructions est indépendant de considérations d'implémentation telles que superscalarité, pipe-lining, etc.
  - Liberté d'implémentation en fonction des coûts de conception et de fabrication, de la complexité de réalisation, et donc du coût souhaité
    - Définition de familles de processeurs en fonction des applications visées (du téléphone portable au super-calculateur)
  - Nécessité pour le compilateur de connaître l'implémentation de la machine cible pour générer du code efficace

Types de données (1)

- Le niveau ISA définit les types de données gérés nativement par le jeu d'instructions
  - Autorise l'implémentation matérielle des types considérés
  - Définit la nature (entier, flottant, caractère) et la précision des types supportés
- Le programmeur n'est pas libre de choisir le format de ses données s'il veut bénéficier du support matériel offert par la couche ISA

Types de données (2)

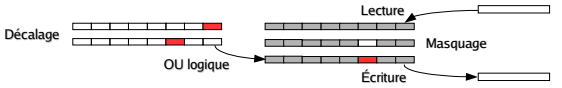
- Les types de données les plus couramment implémentés dans les jeux d'instructions sont :
  - Type entier
  - Type flottant
  - Type caractère

Types de données entiers (1)

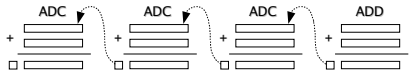
- Le type entier est toujours disponible
  - Sert au fonctionnement de la couche micro-architecture
- Toutes les architectures disposent de types entiers signés
  - Presque toujours codés en complément à deux
  - Il existe aussi souvent des types non signés
- Disponibles en plusieurs tailles
  - Quelques unes choisies parmi les tailles classiques de 8, 16, 32, 64 bits (jamais de type booléen)

Types de données entiers (2)

- Les types entiers non supportés :
  - Soit doivent être émulés de façon logicielle
    - Cas du type caractère (8 bits) sur le CRAY-1 (mots de 64 bits) au moyen de décalages et masquages de bits



  - Soit font l'objet d'un support partiel par le matériel
    - Cas des instructions ADD/ADC (« *add with carry* ») sur le 8080 pour faire des additions sur plus d'un octet



Types de données flottants

- Les types flottants sont très souvent disponibles
  - Sauf sur les processeurs bas de gamme, où les nombres flottants sont émulés logiciellement
- Disponibles en plusieurs tailles
  - 32, 64, 80, ou 128 bits
- Souvent gérés par des registres séparés
  - Cas des 8 registres flottants de l'architecture x86, organisés sous forme de pile

Types de données caractères

- La plupart des ordinateurs sont utilisés pour des tâches de bureautique ou de gestion de bases de données manipulant des données textuelles
- Quelques jeux d'instructions proposent des instructions de manipulation de suites de caractères
  - Caractères émulés par des octets (ASCII), des mots de 16 bits (Unicode), voire de 32 bits
  - Cas de l'architecture x86 avec les instructions micro-codées CMPS, SCAS, STOS, etc. utilisables avec les préfixes REP, REPZ, REPNZ

Type de données booléen

- Il n'existe pas de type booléen natif sur les processeurs
  - Pas de possibilité d'adressage en mémoire
- Le type booléen est généralement émulé par un type entier (octet ou mot)
  - Valeur fausse si la valeur entière est zéro
  - Valeur vraie sinon
  - Cas de l'instruction *beq r1,r0,addr* et *bne* du jeu d'instructions MIPS, compatibles avec cette convention de codage

Type de données référence

- Une référence est un pointeur sur une adresse
- Elle est émulée par un type de données entier
  - Soit registres entiers généralistes
  - Soit registres entiers spécifiques d'adresses
    - Cas du CRAY-1 : 8 registres d'adresses sur 24 bits et 8 registres entiers sur 64 bits
- Utilisation de ces registres pour accéder aux données en mémoire, en fonction des modes d'adressage disponibles
  - Cas des registres SP et BP de gestion de la pile

Format des instructions (1)

- Chaque instruction est composée d'un ou plusieurs champs
- Le premier, appelé « opcode », code le type d'opération réalisée par l'instruction
  - Opération arithmétique, branchement, etc.
- Les autres champs, optionnels, qui spécifient où rechercher les opérandes de l'instruction, sont appelés « adresses »
  - Les instructions ont toujours de zéro à trois adresses

Format des instructions (2)

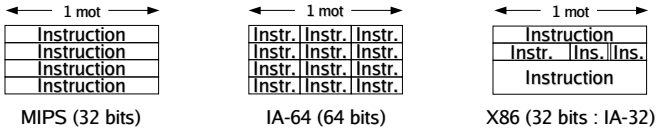
- Différentes façons de concevoir l'adressage
  - Architecture à trois adresses : on a deux adresses source et une adresse destination, qui peut être équivalente à l'une des adresses source
    - Cas de l'architecture MIPS : instruction `add s1,s2,dst` pouvant être utilisée en `add r1,r2,r1`
  - Architecture à deux adresses : on a toujours une adresse source, non modifiée, et une adresse destination, modifiée ou mise à jour selon que l'opération fait ou non intervenir son ancienne valeur
    - Cas de l'architecture x86 : instructions `MOV dst,src` ou `ADD dst,src`

Format des instructions (3)

- Différentes façons de concevoir l'adressage
  - Architecture à une adresse : toutes les instructions de calcul opèrent entre une adresse et un registre unique, appelé « accumulateur »
    - Anciennes architectures de type 8008
    - Trop de transferts entre l'accumulateur et la mémoire
  - Architecture à zéro adresses : les adresses des opérandes sont implicites, situées au sommet d'une pile d'opérandes, où seront placés les résultats
    - Cas de l'architecture JVM

Format des instructions (4)

- Les instructions peuvent soit toutes être de la même taille, soit être de tailles différentes
  - Avoir toutes les instructions de même taille facilite le décodage mais consomme plus de mémoire
- La taille des instructions peut être plus petite, plus grande, ou de longueur équivalente à celle du mot mémoire



MIPS (32 bits) IA-64 (64 bits) X86 (32 bits : IA-32)

Modes d'adressage

- Les modes d'adressage sont les différentes manières dont on peut accéder aux opérandes des instructions
  - Adressage immédiat
  - Adressage direct
  - Adressage registre
  - Adressage indirect par registre
  - Adressage indexé
  - Adressage basé indexé

Adressage immédiat

- Le plus simple pour une instruction est que sa partie d'adresse contienne directement la valeur de l'opérande
  - Réservé aux constantes
  - Aucun accés mémoire supplémentaire nécessaire
- Exemples
  - Branchements : l'adresse (déplacement relatif ou absolu) est spécifiée dans le corps de l'instruction : `b 0C2F4`
  - Chargement de registres : `li r1,100`

Adressage direct

- Une méthode pour accéder à une valeur en mémoire consiste à donner son adresse pour qu'on puisse y accéder directement
  - On accédera toujours à la même zone mémoire
  - Réservé aux variables globales dont les adresses sont connues à la compilation

Adressage registre

- Conceptuellement équivalent à l'adressage direct, mais on spécifie un numéro de registre plutôt qu'un numéro de mot mémoire
  - Mode le plus couramment utilisé
    - Les accès aux registres sont très rapides
    - Les numéros de registres se codent sur peu de bits (compacité des instructions à plusieurs adresses)
  - Une grande partie du travail des compilateurs consiste à déterminer quelles variables seront placées dans quels registres à chaque instant, afin de diminuer les temps d'accès et donc d'exécution

Adressage indirect par registre

- L'opérande spécifié provient de la mémoire ou y sera stockée, mais son adresse est contenue dans un registre de numéro donné plutôt que codée explicitement dans le corps de l'instruction
  - Le registre est un pointeur sur l'opérande
  - On peut référencer une zone mémoire sans avoir à coder son adresse dans l'instruction
  - On peut modifier dynamiquement l'adresse de la zone mémoire référencée en modifiant la valeur du registre

Adressage indexé

- Ce mode combine les caractéristiques de l'adressage direct et de l'adressage registre
- L'opérande considéré est localisé à une distance fixe de l'adresse fournie par un registre
  - Les adresses de l'instruction sont le numéro du registre ainsi que le déplacement relatif (« *offset* ») à ajouter à son contenu
- Exemple : accès aux variables locales et paramètres placés dans la pile, par rapport au registre BP : `MOV AX, (BP+4)`

Adressage basé indexé

- L'adresse mémoire de l'opérande est calculée à partir de la somme des valeurs de deux registres (un registre de base et un registre d'index) ainsi que d'une valeur de déplacement optionnelle
- Exemple : accès aux champs des structures contenues dans un tableau
  - Le registre de base est l'adresse de début du tableau
  - Le registre d'index référence l'adresse de début de la bonne structure par rapport à l'adresse du tableau
  - Le déplacement référence la position du début du champ par rapport au début de la structure

Format des instructions (5)

- Un jeu d'instructions est dit « orthogonal » si, quand une instruction opère sur un registre, elle peut opérer sur l'ensemble des registres de même type (registres entiers, registres flottants)
  - Facilite le décodage des instructions
  - Implémenté naturellement au sein des architectures de type RISC

Types d'instructions

- Les instructions de la couche ISA peuvent être groupées en une demi-douzaine de classes, que l'on retrouve sur toutes les architectures
  - Copie de données
  - Calcul
  - Branchements, branchements conditionnels et comparaisons
  - Entrées/sorties et interruptions
  - Gestion de la mémoire

Instructions de copie de données

- Les instructions de copie de données ont deux usages principaux
  - Réaliser l'affectation de valeurs à des variables
    - Recopie de valeurs dans des variables temporaires devant servir à des calculs ultérieurs
  - Placer une copie de valeurs utiles là où elles pourront être accédées le plus efficacement
    - Utilisation des registres plutôt que de la mémoire
- On a toujours des instruction de copie entre registres, ou entre registre et mémoire, mais moins souvent de mémoire à mémoire

Instructions de calcul (1)

- Ces instructions représentent les opérations réalisables par l'unité arithmétique et logique, mais sur des opérandes qui ne sont pas nécessairement tous des registres
  - Calculs entre mémoire et registres (cas du x86)
- Les instructions de calcul les plus couramment utilisées peuvent faire l'objet d'un format abrégé
  - Instruction `INC R1` remplaçant la séquence `MOV R2,1` et `ADD R1,R2`, par exemple

Instructions de calcul (2)

- Dans une architecture de type « *load/store* », les seules instructions pouvant accéder à la mémoire sont les instructions `load` et `store` de copie entre mémoire et registre
- Les instructions de calcul ne prennent dans ce cas que des opérandes registres
  - Simplifie le format et le décodage des instructions
  - Permet d'optimiser l'utilisation de l'unité arithmétique et logique (pas de cycles d'attente des opérandes mémoire)

Instructions de branchement (1)

- L'instruction de branchement inconditionnel déroute le flot d'exécution du programme vers une adresse donnée
- L'instruction d'appel de sous-programme déroute aussi le flot d'exécution mais en plus sauvegarde l'adresse située après l'instruction afin de permettre le retour à la fonction appelante
  - Sauvegarde dans un registre ou dans la pile

Instructions de branchement (2)

- Les instructions de comparaison et de branchement conditionnel servent à orienter le flot d'exécution en fonction du résultat de l'évaluation d'expressions booléennes
  - Implémentation des tests
  - Implémentation des boucles

Instructions de branchement (3)

- Deux implémentations possibles :
  - Instructions de comparaison et de branchement distinctes utilisant un registre d'état du processeur
    - Cas de l'architecture x86 : instruction `CMP` mettant à jour les bits Z, S, C du mot d'état programme PSW, et instructions de branchement `JEQ`, `JNE`, `JGE`, etc. les utilisant comme conditions de branchement
  - Instructions de branchement conditionnel prenant en paramètres les noms de deux registres comparés à la volée pour décider du branchement
    - Cas des architecture MIPS et Power : avoir une seule instruction facilite la réorganisation dynamique de code

Instructions d'entrée/sortie

- Diffèrent considérablement selon l'architecture
- Mettent en œuvre un ou plusieurs parmi trois schémas d'E/S différents
  - E/S programmées avec attente de disponibilité
    - Très coûteux car le processeur ne fait rien en attendant
    - Cas des instructions IN et OUT de l'architecture x86
  - E/S par interruptions
    - Le périphérique avertit le processeur, au moyen d'une interruption, chaque fois que son état change (coûteux)
  - E/S par DMA (« *Direct Memory Access* »)
    - Un circuit spécialisé se charge des échanges de données

Instructions de gestion de priorité (1)

- Les micro-architectures modernes implémentent nativement des mécanismes matériels permettant de distinguer entre deux modes d'exécution
  - Mode non privilégié : accès restreint à la mémoire, interdiction d'exécuter les instructions d'entrées-sorties
  - Mode privilégié : accès à tout l'espace d'adressage et à toutes les instructions
- Instructions spécifiques de passage entre les deux modes

Instructions de gestion de priorité (2)

- Servent à isoler le système d'exploitation des programmes d'application
  - Les appels système s'exécutent en mode privilégié, pour pouvoir accéder à l'ensemble des ressources de la machine
  - Les programmes d'application s'exécutent en mode non privilégié, et ne peuvent donc accéder directement au matériel sans passer par les routines de contrôle d'accès du système
  - Le passage du mode non privilégié au mode privilégié ne peut se faire que de façon strictement contrôlée (traps et interruptions)

Instructions d'interruptions (1)

- Les interruptions sont des événements qui, une fois reçus par le processeur, conduisent à l'exécution d'une routine de traitement adaptée
  - L'exécution du programme en cours est suspendue pour exécuter la routine de traitement
  - Analogue à un appel de sous-programme, mais de façon asynchrone
- Il existe plusieurs types d'interruptions, identifiées par leur numéro
  - Exemple : numéro d'IRQ (« *Interrupt ReQuest* »)

Instructions d'interruptions (2)

- Les interruptions peuvent être :
  - Asynchrones : interruptions « matérielles » reçues par le processeur par activation de certaines de ses lignes de contrôle
    - Gestion des périphériques
  - Synchrones : interruptions générées par le processeur lui-même :
    - Par exécution d'une instruction spécifique
      - Exemple : l'instruction *INT* de l'architecture x86
      - Sert à mettre en œuvre les appels système
    - Sur erreur logicielle (erreur d'accès mémoire, de calcul ...)
      - Sert à mettre en œuvre les exceptions

Instructions d'interruptions (3)

- Lorsque le processeur accepte d'exécuter une interruption :
  - Il sauvegarde dans la pile l'adresse de la prochaine instruction à exécuter dans le cadre du déroulement normal
  - Il se sert du numéro de l'interruption pour indexer une table contenant les adresses des différentes routines de traitement (« vecteur d'interruptions »)
  - Il se déroute à cette adresse
    - Passage en mode privilégié si le processeur en dispose

Instructions d'interruptions (4)

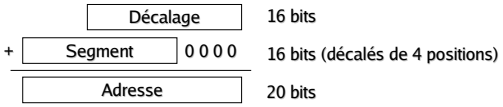
- Au niveau du jeu d'instructions, on trouve donc des instructions
  - Pour générer des interruptions logicielles
  - Pour autoriser ou non l'acceptation des interruptions
    - Ces instructions ne doivent pas être exécutables par les programmes d'application
    - Exécutables seulement en mode privilégié
- La modification du vecteur d'interruptions ne peut se faire qu'en mode privilégié
  - Protection par segmentation de la mémoire

Espace d'adressage (1)

- La plupart des couches ISA considèrent la mémoire comme un espace linéaire et continu commençant de l'adresse 0 à l'adresse 2^{32}-1 ou 2^{64}-1
  - En pratique, on n'utilise pas plus de 44 fils d'adresses (adressage de 16 TéraMots)

Espace d'adressage (2)

- Pour adresser plus de mots mémoire que ne peut en adresser un mot machine, on peut construire les adresses mémoires en combinant deux mots machine :
  - Un mot de poids fort définissant un segment mémoire
  - Un mot de poids faible définissant un déplacement (« *offset* ») dans le segment considéré
  - Cas du 8086 : mots de 16 bits et 20 fils d'adresses



Architecture ISA du Pentium II (1)

- Architecture appelée IA-32
- Est le résultat d'une évolution continue depuis le processeur 8 bits 8080
  - Maintien d'une compatibilité ascendente permettant toujours l'exécution de programmes écrits pour le processeur 16 bits 8086 selon le mode choisi :
    - Mode réel : le processeur se comporte comme un 8086
    - Mode virtuel : le processeur simule un 8086
    - Mode protégé : utilise toute la puissance du processeur
  - Passage à une architecture 32 bits avec le 80386
  - Ajout des instructions MMX sur certains Pentium

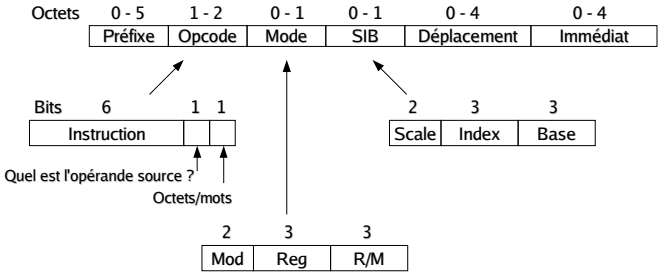
Architecture ISA du Pentium II (2)

- Architecture à deux adresses, non orthogonale
  - Registres généraux spécialisés

- Mémoire organisée en 16384 segments de 2^{32} octets

Architecture ISA du Pentium II (3)

- La structure des instructions est complexe et irrégulière
  - Code opération expansif

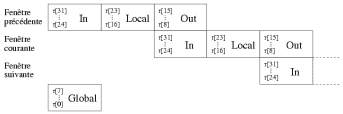


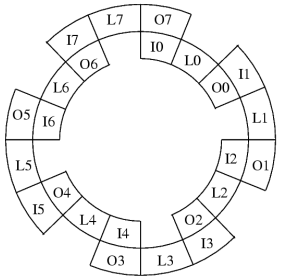
Architecture ISA de l'UltraSparc (1)

- Architecture SPARC version 9
  - Processeurs développés par différentes entreprises selon les spécifications de l'ISA
- Architecture RISC 64 bits, load/store, orthogonale, à trois adresses
- Espace d'adressage linéaire de 2^{64} octets
  - Seulement 44 lignes d'adresse implémentées jusqu'ici

Architecture ISA de l'UltraSparc (2)

- 32 registres visibles à un instant donné, parmi 192 réellement disponibles
  - Système de fenêtre glissante pour le passage des paramètres





Architecture ISA de l'IA-64 (1)

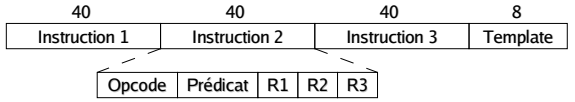
- L'architecture IA-32 a atteint ses limites
  - Le surcoût de complexité dû au support de la compatibilité ascendente devenait trop pénalisant
- L'architecture IA-64 repart de zéro
  - Architecture RISC 64 bits, load/store, orthogonale
    - 64 registres généraux de 64 bits
- Mais possibilité pour les processeurs Intel de fonctionner soit en mode IA-32, soit en mode IA-64

Architecture ISA de l'IA-64 (2)

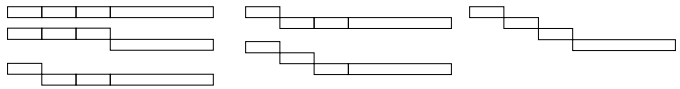
- Paradigme EPIC : « *Explicitely Parallel Instruction Computing* »
  - Le compilateur, lorsqu'il génère le code machine, identifie les instructions pouvant s'exécuter en parallèle sans risque de conflit
  - En fonction de la puissance du processeur, et plus précisément de son degré de superscalarité, plus ou moins de ces instructions indépendantes pourront être exécutées en parallèle
  - La complexité du séquencement des instructions est déportée vers le compilateur, permettant de simplifier, et donc d'accélérer, l'exécution

Architecture ISA de l'IA-64 (3)

- Les instructions sont groupées par trois en liasses (« *bundles* ») de 128 bits



  - Un champ « *template* » spécifique à la liasse spécifie les dépendances temporelles entre instructions de la liasse ainsi que vis-à-vis de la liasse suivante



Architecture ISA de l'IA-64 (4)

- Grâce à des instructions à prédicat, on peut fortement réduire le nombre de branchements conditionnels, qui sont une cause très importante de perte de performance
  - Moins d'instructions
  - Plus de rupture de pipe-line lors de mauvaises prédictions de branchements

```
if (R1 == 0)
  R2 = R3;
```

```
    CMP   R1,0
    BNE   ET1
    MOV   R2,R3
ET1: ...
```

```
    CMOVZ R2,R3,R1
    ...
```


Architecture ISA de l'IA-64 (5)

- Grâce à des instructions conditionnelles, dont le prédicat est la valeur d'un des 64 registres de prédiction, on peut étendre ce principe à tous les types d'instructions
  - Des instructions permettent de positionner P_i et P_{i+1}

```
if (R1 == R2)
  R3 = R4 + R5;
else
  R6 = R4 - R5
```

```
    CMP   R1,R2
    BNE   ET1
    MOV   R3,R4
    ADD   R3,R5
    JMP   ET2
ET1: MOV  R6,R4
    SUB   R6,R5
ET2: ...
```

```
    CMPEQ R1,R2,P4
<P4> ADD R3,R4,R5
<P5> SUB R6,R4,R5
```


Architecture ISA de l'IA-64 (6)

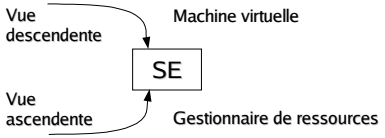
- Des instructions de pré-chargement (« *pre-fetching* ») permettent d'anticiper les accès à la mémoire et donc de recouvrir le temps d'accès aux données par des calculs utiles
  - Instruction LOAD spéculative pour démarrer une lecture par anticipation
  - Instruction CHECK pour vérifier si la donnée est bien présente dans le registre avant de l'utiliser
    - Si la donnée est présente, se comporte comme un NOP
    - Si l'accès est invalide, provoque une exception comme si la lecture venait d'avoir lieu

Système d'exploitation (1)

- Un système est un programme qui, du point de vue du programmeur, ajoute une variété d'instructions et de fonctionnalités en plus de celles déjà offertes par la couche ISA
- La couche système contient toutes les instructions de la couche ISA, moins les dangereuses, et plus celles ajoutées par le système, sous la forme d'appels système
- Les nouvelles instructions de la couche système sont toujours interprétées

Système d'exploitation (2)

- Buts d'un système d'exploitation
  - Décharger le programmeur d'une tâche de programmation énorme et fastidieuse, et lui permettre de se concentrer sur l'écriture de son application
  - Protéger le système et ses usagers de fausses manipulations
  - Offrir une vue simple, uniforme, et cohérente de la machine et de ses ressources



Système d'exploitation (3)

- En tant que machine virtuelle, le système fournit :
  - Une vue uniforme des entrées/sorties
  - Une mémoire virtuelle et partageable
  - La gestion sécurisée des accès
  - La gestion des processus
  - La gestion des communications inter-processus

Système d'exploitation (4)

- En tant que gestionnaire de ressources, le système doit permettre :
  - D'assurer le bon fonctionnement des ressources et le respect des délais
  - L'identification de l'usager d'une ressource
  - Le contrôle des accès aux ressources
  - L'interruption d'une utilisation de ressource
  - La gestion des erreurs
  - L'évitement des conflits

Gestion de la mémoire

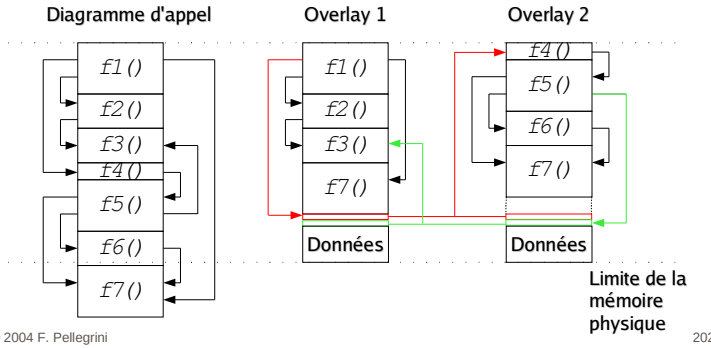
- Au début de l'informatique, les mémoires (vives et de masse) étaient de très faible capacité et très chères
  - Les plus gros programmes ne pouvaient tenir en mémoire, avec leurs données
- Deux solutions possibles :
  - Avoir plusieurs petits programmes
    - Mais surcoût de sauvegarde et de rechargement des données à chaque changement de programme
  - Remplacer à la volée le code en laissant les données en place en mémoire : système des overlays

Overlays (1)

- L'utilisateur, lors de l'édition de liens de son programme, répartit les différents modules qui le composent en sous-ensembles exécutables les plus indépendants possibles : les overlays
  - Cas des passes d'un compilateur, par exemple
- Lorsque l'overlay en cours d'exécution a besoin d'appeler une fonction qu'il ne contient pas, une routine de service charge à sa place l'overlay qui la contient
  - Possibilité de dupliquer les fonctions les plus couramment utilisées

Overlays (2)

- Exemple d'édition de liens d'un programme, conduisant à l'obtension de deux overlays



Overlays (3)

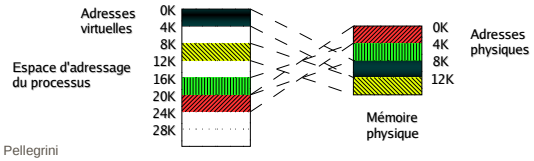
- La construction des overlays est fortement liée à la taille de la mémoire de la machine cible
  - Si moins de mémoire que la taille du plus grand overlay, le programme ne peut s'exécuter
  - Si taille plus grande, le programmeur aurait pu mieux utiliser la mémoire (moins de changements d'overlays)
- Problèmes :
  - Granularité des overlays trop élevée
  - Découpage statique et non pas dynamique

Overlays (4)

- Pour rendre le système plus efficace, il faudrait mieux utiliser l'espace mémoire et réduire les coûts de chargement
  - Pas de groupage statique figé à l'édition de liens
    - Décharge l'utilisateur de la tâche de groupage
  - Manipulation de blocs de code de plus petite taille
    - Coûts de chargement et de déchargement limités
  - Chargement dynamique des portions de code
    - Position en mémoire pas connue à l'avance
    - Traduction à la volée entre adresses virtuelles et physiques
  - Gérer la zone de données et pas seulement de code

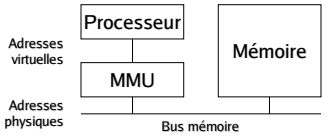
Mémoire virtuelle (1)

- Système permettant de découpler l'espace d'adressage et la mémoire physique
- Découpage en pages de l'espace d'adressage virtuel du processus et de la mémoire physique
  - Taille variant de 512 octets à 64 Ko, en général 4 Ko
- Placement (« mapping ») des pages en mémoire



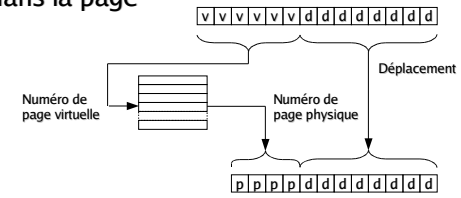
Mémoire virtuelle (2)

- Un dispositif matériel appelé MMU (« *Memory Management Unit* ») fait la conversion à la volée entre adresses virtuelles et adresses physiques
  - Convertit chaque adresse virtuelle émise par le processeur en adresse physique



Mémoire virtuelle (3)

- La conversion des adresses physiques en adresses virtuelles s'effectue au moyen de tables de pages
  - La partie haute de l'adresse virtuelle sert d'index
  - La partie basse sert de déplacement (« *offset* ») dans la page



Mémoire virtuelle (4)

- Les pages du processus sont chargées en mémoire à la demande
  - Si on émet une adresse virtuelle correspondant à une page présente en mémoire physique, la MMU fait silencieusement le transcodage
  - Si la page mémoire n'est pas présente en mémoire, la MMU génère une interruption de type « défaut de page » (« *page fault* ») à destination du processeur
  - Le processeur traite l'interruption en chargeant la page depuis le disque, avant de reprendre l'exécution
    - Politique de remplacement LRU (« *Least Recently Used* »)

Mémoire virtuelle (5)

- La taille des pages influe sur la performance
- Avec des pages trop grandes :
  - Fragmentation interne plus importante
  - Les accès aléatoires génèrent plus de trafic mémoire
    - Matrice stockée par lignes et accédée par colonnes
- Avec des pages trop petites :
  - Les chargements à partir du disque sont moins efficaces (pénalité de latence à chaque chargement)
  - Taille de la table des pages trop importante

Mémoire virtuelle (6)

- Certains problèmes persistent
  - Droits d'accès : gérer l'accès par pages est coûteux
    - Droits valables pour l'ensemble de zones mémoire fonctionnellement distinctes telles que : code, données initialisées constantes, données non constantes initialisées ou pas, pile, mémoire partagée, code du système, données du système, etc.
  - Granularité d'accès : les accès illégaux au delà des zones allouées d'une page ne sont pas détectés
    - Espace libre de la dernière page courante de la zone de données
    - Espace situé au delà du sommet de pile

Mémoire virtuelle (7)

- Continuité de l'adressage : lors des chargements dynamiques de bibliothèques, on doit placer le code et les données dans des zones de nature différente
  - Réserver à l'avance des plages libres dans l'espace d'adressage pose des problèmes :
    - Fragmentation externe si ces zones ne sont pas remplies
    - Collisions entre zones si une zone atteint sa taille maximale pré-allouée
- Nécessité d'un mécanisme de gestion de zones disjoint de la pagination

Segmentation (1)

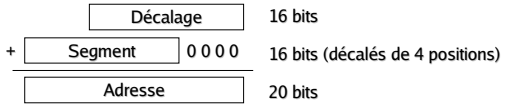
- La segmentation consiste à avoir autant d'espaces d'adressage que de zones mémoire d'usages différents
  - Adresses partent à partir de 0 pour chaque segment

Segmentation (2)

- Des descripteurs de segments sont associés à chaque segment
  - Taille à l'octet près (pas de problème de granularité)
  - Droits d'accès
  - Référence à la racine d'une table de pages privée ou bien adresse de début du segment dans la mémoire virtuelle (permet facilement les déplacements logiques de segments dans l'espace d'adressage)

Gestion mémoire du Pentium II (1)

- Sur le 8086, une adresse était obtenue par ajout d'une valeur de segment, sur 16 bits, multipliée par 16, avec une valeur de décalage sur 16 bits, pour former une adresse sur 20 bits

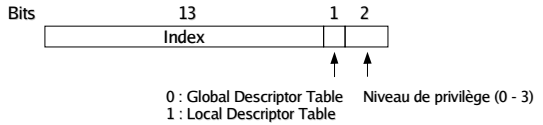


Gestion mémoire du Pentium II (2)

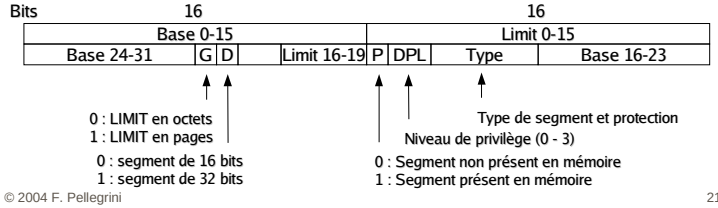
- À partir du 80286, on a un vrai adressage segmenté
- Les registres de segments deviennent des sélecteurs de segments indexant des descripteurs de segments dans des tables
- Deux tables sont maintenues par la MMU
  - GDT : table globale contenant les descripteurs communs à tous les processus (segments du système)
  - LDT : table locale à chaque processus

Gestion mémoire du Pentium II (3)

- Sélecteur de segment en mode protégé

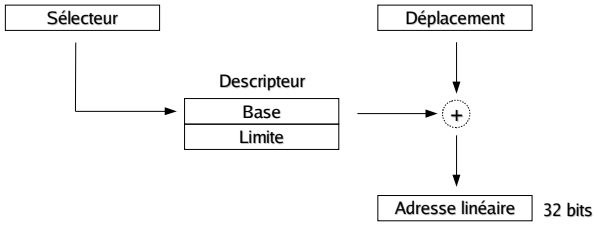


- Descripteur de segment en mode protégé



Gestion mémoire du Pentium II (4)

- L'adresse virtuelle linéaire est calculée en ajoutant la valeur du déplacement à l'adresse de base contenue dans le descripteur



Fichiers (1)

- La gestion des entrées-sorties est un autre apport majeur de la couche système
- Mise à disposition d'une abstraction de fichier sous forme de suite ordonnée d'octets
- Possibilités d'accès en lecture, en lecture/écriture, ou seulement en écriture suivant le type de périphérique modélisé
  - Sécurité
  - Confidentialité
  - Intégrité

Fichiers (2)

- Les fichiers existent en dehors de l'espace d'adressage des programmes
  - Nécessité de leur nommage
- Appel système d'ouverture de fichier permettant d'ouvrir un « canal » de communication entre le fichier et l'espace d'adressage du programme
  - Récupération d'un descripteur du fichier ouvert
- Utilisation de ce descripteur pour échanger des blocs de données entre le fichier et la mémoire

Fichiers (3)

- Les fichiers sont administrés au sein de systèmes de fichiers
  - Systèmes logiques ou physiques
    - Possibilité de partitionner un disque unique en plusieurs systèmes de fichiers
    - Possibilité de regrouper plusieurs disques au sein d'un système de fichiers logique unique
  - Fournissent des modèles d'organisation interne tels que répertoires, structures arborescentes de répertoires, clés, etc.

Langage d'assemblage (1)

- La couche langage d'assemblage diffère des précédentes en ce qu'elle est implémentée par traduction et non par interprétation
  - L'existence de moyens de stockage non volatils fournis par la couche système d'exploitation permet de rentabiliser le coût de traduction
- Deux sortes de traducteurs :
  - Assembleur : d'un langage d'assemblage vers un langage machine
  - Compilateur : d'un langage de haut niveau vers un langage d'assemblage ou un langage machine

Langage d'assemblage (2)

- Un langage d'assemblage offre une représentation symbolique d'un langage machine
  - Utilisation de noms symboliques pour représenter les instructions et leurs adresses
- L'assembleur convertit cette représentation symbolique en langage machine proprement dit
  - Possibilité d'accès aux fonctionnalités offertes par la couche système d'exploitation

Langage d'assemblage (3)

- Avantages du langage d'assemblage par rapport au langage machine
  - Facilité de lecture et de codage
    - Les noms symboliques des instructions (« codes mnémoniques ») sont plus simples à utiliser que les valeurs binaires dans lesquelles elles seront converties
  - Facilité de modification
    - Pas besoin de recalculer à la main les adresses des destinations de branchements ou des données lorsqu'on modifie le programme
- Aussi offerts par les langages de haut niveau

Langage d'assemblage (4)

- Avantages du langage d'assemblage par rapport aux langages de haut niveau
  - Accès à la machine
    - Le langage d'assemblage permet d'accéder à l'ensemble des fonctionnalités et des instructions disponibles sur la machine cible
  - Performance
    - Un programme en langage d'assemblage est souvent plus compact et plus efficace qu'un programme en langage de haut niveau

Langage d'assemblage (5)

- Inconvénients du langage d'assemblage par rapport aux langages de haut niveau
  - Coût de développement
    - Longueur du programme
    - Difficulté de programmation
      - Nombre de mnémoniques
      - Complexité des modes d'adressage
  - Difficulté de maintenabilité
    - Variation des performances relatives des instructions entre plusieurs processeurs de la même famille
  - Non portabilité entre familles de processeurs

Langage d'assemblage (6)

- Les utilisations principales des langages d'assemblage sont donc les applications critiques en termes de taille et/ou de performance et/ou d'accès au matériel
  - Applications embarquées et enfouies
  - Pilotes de périphériques
  - Modules de changement de contexte entre processus

Instructions des langages d'assemblage

- Les instructions des langages d'assemblage sont habituellement constituées de trois champs :
  - Un champ d'étiquette
  - Un champ d'instruction
  - Un champ de commentaires (commentaires ligne)

Champ étiquette

- Champ optionnel
- Associe un nom symbolique à l'adresse à laquelle il se trouve
  - Destination de branchement ou d'appel de sous-routine pour les étiquettes situées en zone de code
  - Adresses de variables ou constantes mémoire pour les étiquettes situées en zone de données

Champ instruction (1)

- Contient soit une instruction soit une directive destinée à l'assembleur lui-même
- Une instruction est constituée :
  - Du code mnémonique du type de l'opération
  - De représentations symboliques des opérandes
    - Noms symboliques de registres
    - Représentations de constantes numériques sous différents formats
      - Décimal, binaire, octal, hexadécimal
    - Expressions parenthésées ou à base de crochets permettant d'exprimer les différents modes d'adressage

Champ instruction (2)

- Les types et longueurs des opérandes manipulés peuvent être spécifiés
  - Par les noms des registres utilisés
    - Cas de l'architecture x86 : *AL* (8 bits), *AX* (16 bits), *EAX* (32 bits)
  - Par un code mnémonique différent
    - Cas de l'architecture SPARC : *LDSB*, *LDSH*, *LDSW* pour charger respectivement des octets, des demi-mots ou des mots signés
  - Par un suffixe accolé au code mnémonique
    - Cas de l'architecture M68030 : suffixes *.B*, *.W* ou *.L* pour manipuler des octets, des mots, ou des mots longs

Champ commentaire

- Ne sert qu'au programmeur et pas à l'assembleur
- Permet au programmeur de laisser des explications utiles sur ce que fait son programme, ligne par ligne
- Un programme en assembleur sans commentaires est affreusement difficile à lire
  - Difficulté de la rétro-ingéniérie à partir du code objet d'un programme

Directives

- Influent sur le comportement de l'assembleur
- Ont de multiples fonctions
  - Définition de constantes symboliques
    - Analogue au *#define* du pré-processeur C
    - Cas de l'architecture x86 : *etiquette EQU valeur*
  - Définition de segments pour le code binaire produits par l'assembleur (code ou données)
  - Alignement par mots du code et des données
  - Réservation et initialisation d'espace mémoire
  - Macro-instructions

Macro-instructions

- Une macro-définition permet d'associer un nom à un fragment de code en langage d'assemblage
  - Analogue à la directive `#define` du pré-processeur C
  - Possibilité de définir des paramètres formels
  - Cas de l'architecture x86 : directive `MACRO`... `ENDM`
- Après qu'une macro a été définie, on peut l'utiliser à la place du fragment de texte
  - Remplacement textuel avant l'assemblage

Assemblage (1)

- Problème des références descendantes
  - Comment savoir à quelle adresse se fera un branchement si on ne connait pas encore le nombre et la taille des instructions intermédiaires
  - Nécessité de connaître l'ensemble du code source avant de générer le code en langage machine
- L'assemblage s'effectue toujours en deux passes
  - Première passe : analyse du code source
  - Deuxième passe : génération du code en langage machine

Assemblage (2)

- Lors de la première passe, l'assembleur :
  - Vérifie la syntaxe du code assembleur
  - Collecte les définitions des macros et stocke le texte du code assembleur associé
  - Effectue l'expansion des noms de macros trouvés
  - Détermine les tailles mémoire nécessaires au stockage de chacune des instructions et directives rencontrées
  - Collecte dans une table des symboles les définitions des étiquettes et de leur valeur, déterminée à partir de la somme des tailles des instructions précédentes

Assemblage (3)

- Lors de la deuxième passe, l'assembleur :
  - Selon l'implémentation, relit le code assembleur ou le flot d'instructions résultant de l'expansion des macros réalisée lors de la première passe
  - Vérifie si les étiquettes éventuellement référencées par les instructions ont toutes été trouvées lors de la première passe
  - Génère le code en langage machine pour les instructions, en y intégrant les adresses mémoire des étiquettes qu'elles utilisent
  - Ajoute au fichier objet la table des symboles connus

Édition de liens

- Produit un exécutable à partir de fichiers objets
  - Ajout d'un en-tête de démarrage au début du fichier
- La plupart des programmes sont constitués de plus d'un fichier source
  - Problème des références croisées entre fichiers
    - Références définies dans un fichier et utilisées dans d'autres
  - Problème de relocation de code
    - Les adresses définitives des données et des fonctions dans le programme exécutable dépendent de la façon dont les différents modules sont agencés en mémoire

Références croisées

- Les symboles externes doivent être déclarés dans chacun des modules dans lesquels ils sont utilisés
  - Insérés dans la table des symboles en tant que références déclarées mais pas définies
  - L'assembleur ajoute les adresses des instructions utilisant ces références à la table des instructions non résolues
- Ne doivent être définis que dans un seul module
  - Message d'erreur de l'éditeur de liens si définitions multiples ou pas de définition

Relocation de code

- Lors de l'assemblage, les adresses des instructions de branchements et d'appels absolus sont stockées dans une table spécifique
  - Table de relocation incorporée au fichier objet
  - Les branchements relatifs locaux ne sont pas concernés
- Lors de l'édition de liens, les adresses absolues de toutes les références sont calculées et les déplacements absolus sont intégrés aux codes binaires des instructions

Fichier objet

- Un fichier objet contient :
  - Le code en langage machine résultant de l'assemblage ou de la compilation du fichier en code source correspondant
  - La table des symboles
    - Symboles définis localement et déclarés comme visibles de l'extérieur du module
    - Symboles non locaux déclarés et utilisés dans le module
  - La table de relocation
    - Adresses des instructions utilisant des adresses absolues (locales et non-locales)

Bibliothèques (1)

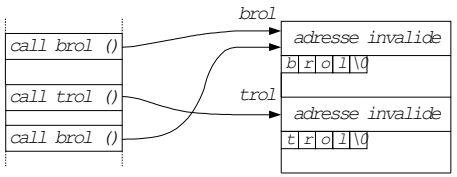
- Lorsqu'on fournit un ensemble de fonctions rendant un ensemble cohérent de services, il serait préférable de grouper les fichiers objets associés sous la forme d'un unique fichier
  - Facilite la manipulation et la mise à jour
- Ce service est rendu par les fichiers de bibliothèque
  - Fichiers servant à archiver des fichiers objet
  - Utilisables par l'éditeur de liens

Bibliothèques (2)

- Deux types de bibliothèques
  - Bibliothèques statiques
    - Format en « *lib**.*a* » (Unix) ou « *.*lib* » (DOS)
    - Liées à l'exécutable lors de la compilation
      - Augmentent (parfois grandement) la taille des exécutables
      - On n'a plus besoin que de l'exécutable proprement dit
  - Bibliothèques dynamiques
    - Format en « *lib**.*so* » (Unix, « *shared object* ») ou « *.*dll* » (Windows, « *dynamic loadable library* »)
    - Liées à l'exécutable lors de l'exécution
      - Permettent la mise à jour indépendante des bibliothèques
      - Problème si pas présentes (variable « *LD_LIBRARY_PATH* »)

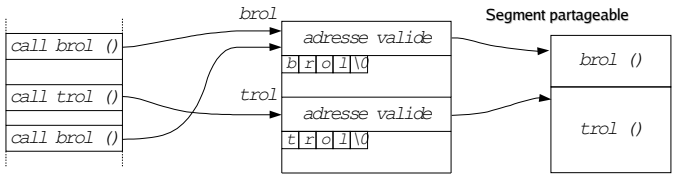
Édition dynamique de liens (1)

- Lorsque l'éditeur de liens trouve la définition d'un symbole dans une bibliothèque dynamique
  - Il ajoute au programme un fichier objet spécial, issu de la bibliothèque, appelé « module d'importation »
  - Le module contient les adresses (invalides) des branchements ainsi que le nom de la fonction



Édition dynamique de liens (2)

- Lors d'un appel à une fonction dynamique, il y a erreur de segmentation et traitement
  - Le contenu de la bibliothèque dynmique est chargé dans un nouveau segment partageable si elle n'était pas déjà présente dans le système
  - Les adresses modifiées pointent dans ce segment



Édition dynamique de liens (3)

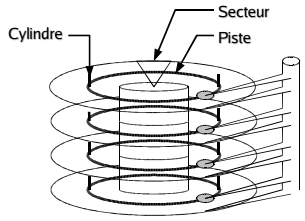
- Dans d'autres systèmes, il n'y a pas d'indirections sur les adresses des routines
  - Les adresses des instructions de branchements sont stockées dans la table de relocation et associées au nom de la bibliothèque dynamique à charger
  - Lors du chargement du programme, toutes les bibliothèques dynamiques nécessaires sont chargées en mémoire dans des segments partagés si elles ne l'étaient pas déjà, et les adresses des branchements sont modifiées en conséquence

Édition dynamique de liens (4)

- Certains systèmes permettent aussi le chargement dynamique de bibliothèques à la demande lors de l'exécution du programme
  - Analogue au chargement dynamique des modules dans le noyau
  - Demande explicite par le programmeur
    - Cas des systèmes de type Unix : `dlopen()`, `dlsym()`, `dlclose()`
  - Respecte le paradigme de l'éditeur de liens
    - Pas de symbole non résolu à l'édition de liens
    - Manipulation des symboles dynamiques par pointeurs

Disques durs (1)

- Constitués d'un empilement de disques métalliques rigides tournant sur le même axe et revêtus d'une couche magnétique
  - Diamètre d'une dizaine de centimètres à moins de trois centimètres
  - Surfaces survolées par des têtes de lecture/écriture magnétique montées sur un bras mobile



Disques durs (2)

- Une piste est la zone couverte par une tête de lecture en un tour de disque lorsque le bras reste dans une position donnée
- Un cylindre est la zone couverte sur tous les disques par l'ensemble des têtes de lecture en un tour de disque lorsque le bras reste dans une position donnée
- Un secteur est une portion de piste représentant une fraction de la surface angulaire totale

Disques durs (3)

- Les secteurs sont l'unité de stockage élémentaire sur le disque
  - On lit et écrit par secteurs
- Un secteur est constitué :
  - D'un préambule, servant à synchroniser la tête avant d'entamer l'opération de lecture/écriture
  - De la zone d'informations, en général de 512 octets
  - D'une zone de contrôle servant au contrôle et à la correction des données enregistrées
- Il existe un espace libre entre chaque secteur

Disques durs (4)

- La distance radiale entre la ou les têtes de lecture et le centre du disque sert à identifier la piste courante
- La largeur d'une piste dépend de la taille des têtes et de la précision de positionnement
  - Largeur d'une piste de 2 à 10 microns
  - Entre 1000 et 4000 pistes par centimètre, en tenant compte des espaces nécessaires entre pistes
  - Densité d'écriture sur la piste de 100 000 à 200 000 bits par centimètre linéaire

Disques durs (5)

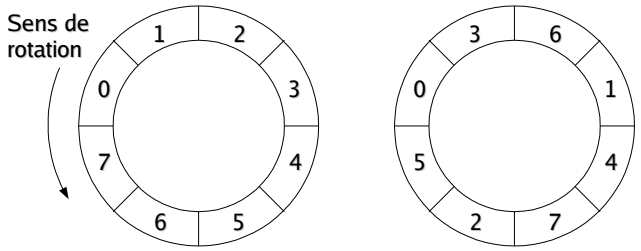
- La longueur des pistes n'est pas constante
  - Les pistes sont plus longues à la périphérie qu'au centre du disque ($c = 2 \pi r$)
- Deux méthodes possibles pour gérer cela :
  - Ne rien faire, et densité de stockage d'informations plus importante près de l'axe de rotation
  - Avoir un nombre de secteurs par piste variable
    - Surface du disque découpée en groupes de cylindres
    - Moins de secteurs par piste dans les groupes situés le plus près du centre, plus dans ceux de la périphérie
    - Augmente la capacité de stockage du disque

Disques durs (6)

- Les performances d'un disque dépendent :
  - Du temps de positionnement du bras entre deux cylindres quelconques
    - Entre 5 et 15 millisecondes en moyenne
    - Environ 1 milliseconde entre deux cylindres consécutifs
  - Du temps d'attente du passage du bon secteur sous la tête de lecture
    - Dépend de la vitesse de rotation du disque
      - 3600, 5400, 7200 ou 10800 tours par minute
      - Temps moyen de latence compris entre 3 et 8 millisecondes
  - Du débit de transfert de l'information
    - De 5 à 40 Mo/s

Disques durs (7)

- Afin de diminuer le temps de latence rotationnelle lors de la lecture de gros fichiers, les secteurs sont entrelacés sur les pistes



CD-ROM (1)

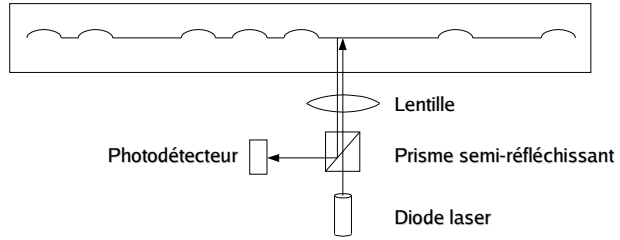
- Création du CD audio par Philips et Sony au début des années 1980
  - Héritier du disque vidéo grand format (30 cm) développé par Philips à la fin des années 1970
  - Spécifications techniques normalisées par l'ISO
    - Diamètre de 12 cm
    - Épaisseur de 1,2 mm
    - Diamètre du trou central de 1,5 cm
    - ...

CD-ROM (2)

- Un CD est constitué d'une mince pellicule d'aluminium prise entre deux couches de matériau plastique transparent (polycarbonate)
- La couche d'aluminium est constituée d'un ensemble de zone plates (« *lands* ») et de micro-cuvettes (« *tips* ») servant à coder l'information
  - Taille des trous de l'ordre de quelques microns

CD-ROM (3)

- La lecture se fait au moyen d'un rayon laser
  - Les zones plates réflechissent le rayon
  - Les cuvettes dispersent le rayon



CD-ROM (4)

- Les microcuvettes et les zones plates sont inscrites sur une spirale continue
  - Pas des cercles concentriques comme pour les disques magnétiques
- La spirale part du centre du disque vers le bord
  - 22188 révolutions
  - Environ 600 spires par mm
  - 5,6 km de long en déroulé

CD-ROM (5)

- Afin d'avoir un flot de données continu et constant en écoute audio, la vitesse de rotation du disque s'adapte en fonction de la distance radiale du bras portant la lentille
  - Vitesse linéaire de 120 cm/s
  - Vitesse angulaire de :
    - 530 tours/mn au centre du disque
    - 200 tours/mn au bord du disque
- Pour les CD-ROM, on travaille à des vitesses multiples de la vitesse standard

CD-ROM (6)

- Les spécifications techniques du formatage des données informatiques sur la spirale du CD audio sont contenues dans le « Livre jaune »
  - Les octets sont encodés sous la forme de symboles de 14 bits permettant la correction d'erreur
  - Une trame de 588 bits est constituée de 42 symboles servant à encoder 24 octets avec correction d'erreur
  - Un secteur est constitué d'un groupe de 98 trames servant à encoder 2048 octets, avec un préambule de 16 octets de synchronisation et de numérotation du secteur, et d'une zone de contrôle de 288 octets

CD-ROM (7)

- Du fait de la très grande redondance, la charge utile d'un CD-ROM n'est que de 28 %
  - Un CD-ROM peut encoder 650 Mo de données
- Le débit reste faible par rapport à un disque magnétique
  - En vitesse normale (x1), un CD-ROM lit 75 secteurs par seconde, soit 150 ko/s
  - En vitesse x32, on n'atteint que 4,8 Mo/s
  - On ne peut augmenter la vitesse de rotation sans briser les disques, dont le plastique est peu solide

CD-ROM (8)

- Afin de rendre utilisable les CD-ROM sur le plus d'architectures possible, le format du système de fichiers a été normalisé
  - Norme ISO 9660
- Trois niveaux
  - Niveau 1 : Nommage « à la MS-DOS » : 8+3 caractères, majuscules uniquement, huit sous-catalogues au plus, fichiers contigus
  - Niveau 2 : Noms de fichiers sur 32 caractères
  - Niveau 3 : fichiers non contigus

CD-R (1)

- Les CD-R sont des CD initialement vierges sur lesquels on peut inscrire, une seule fois, des informations
  - Spécifications dans le « Livre orange »
- Ils contiennent un film réfléchissant sur lequel est plaquée une couche de matière colorée photosensible
  - Habituellement de la cyanine (bleue-verte) ou de la phtalocyanine (jaune orangée)

CD-R (2)

- L'écriture s'effectue avec un laser de forte puissance (8 à 16 mW) qui opacifie la couche photosensible par chauffage au point de contact avec la surface réfléchissante
- La lecture s'effectue de façon classique avec un laser de faible puissance (0,75 mW)

CD-RW

- Permettent la lecture et l'écriture
- La couche d'enregistrement est constituée d'un alliage métallique possédant un état cristallin et un état amorphe de réflectivités différentes
- Leur laser fonctionne avec trois puissances
  - Faible puissance : lecture
  - Moyenne puissance : fonte de l'alliage et refroidissement léger permettant le passage à l'état cristallin fortement réflechissant : réinitialisation
  - Haute puissance : fonte et passage à l'état amorphe

DVD

- Même principe que les CD-ROM, mais densification de l'information
  - Laser de longueur d'onde plus petite (0,65 microns contre 0,78 microns)
  - Microcuvettes plus petites (0,4 microns, contre 0,8 microns)
  - Spires plus serrées (0,74 microns contre 1,6 microns)
- La capacité passe à 4,7 Go