Parallélisme

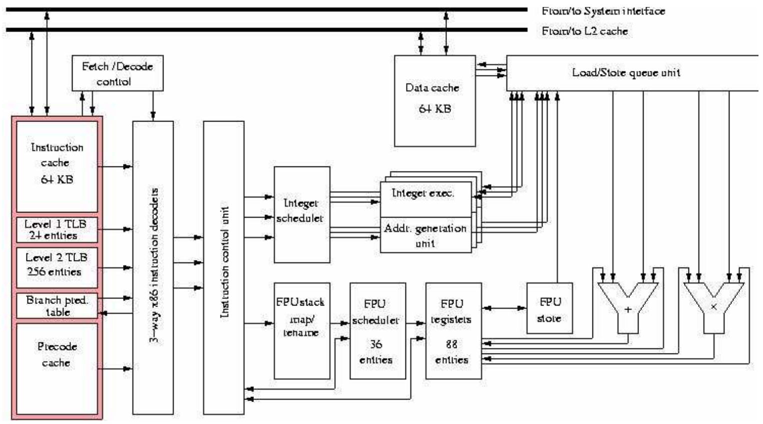
Eric Goubault
Commissariat à l'Energie Atomique
Saclay

Pourquoi le parallélisme?

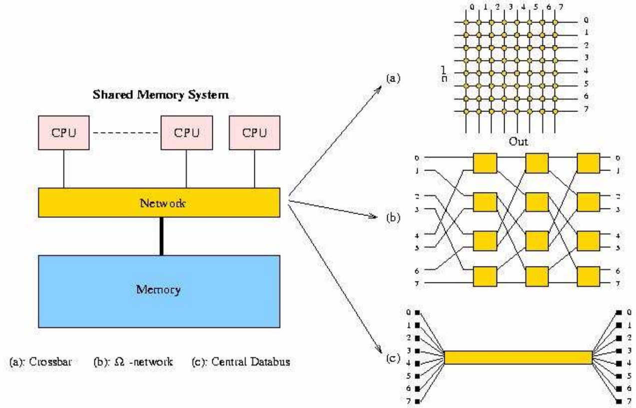
Le parallélisme, d'exotique il y a encore peu, est devenu indispensable:

- Les microprocesseurs, les machines ne sont presque plus "séquentielles"
- Les systèmes d'exploitation (UNIX...) font tourner en permanence des dizaines de tâches au moins
- Pour des raisons d'efficacité de calcul en temps et en mémoire, de plus en plus de programmes sont parallélisés (historiquement, chez les numériciens)
- Certains problèmes sont intrinsèquement parallèles ou distribués (grandes bases de données: transactions simultanées! etc.)

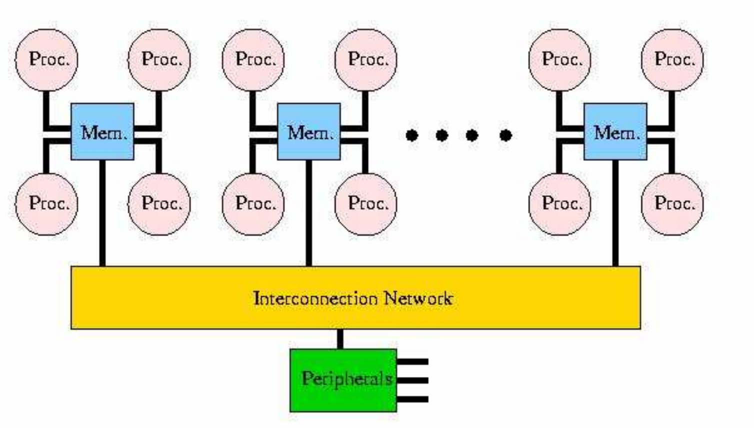
Au niveau d'un microprocesseur (Athlon)...



Au niveau d'une machine...



Au niveau d'un réseau de machines...

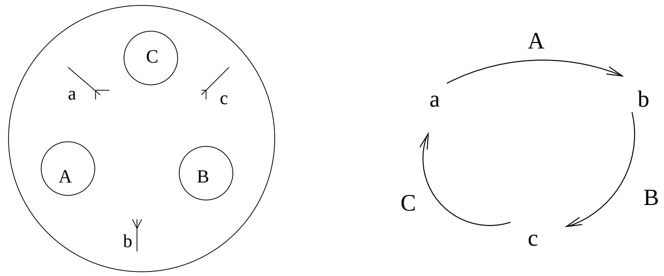


Une des machines les plus puissantes au monde

(IBM ASCI White, Lawrence Livermore National Laboratory, 2000, 8192 processeurs Power3 à 375Mhz: 12.3 teraflops! - simulation des armes thermonucléaires)

Mais subtil à programmer...

- Nouvelles primitives ($\rightarrow$ programmation)
- Nouveaux types de bugs, dans la coordination des tâches ($\rightarrow$ sémantique mathématique); exemple académique (trois philosophes qui dînent):



- Difficulté d'atteindre les performances crêtes ($\rightarrow$ algorithmique)

Programme

- Les "threads" en JAVA (rappel, et simulation modèles PRAM etc.)
- Les "nouveaux" problèmes liés au parallélisme (problème de coordination, exclusion mutuelle, points morts etc.)
- L'algorithmique parallèle de base (PRAM, complexité, réseaux de tri, algorithmes sur anneau etc.)
- L'ordonnancement de tâches
- Au delà du multitâche ("clusters" de stations, distribution, RMI, JavaParty etc.)

Organisation

- Complémentaire du cours système, faisant suite au cours d'informatique fondamentale (avec quelques rappels)
- Cours suivis de TPs et de TDs (utilisation des threads JAVA)
- Ecrit
- Voir par exemple le cours de l'année dernière: http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/ParaI.html et http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/pvm.html

Plan de ce cours en particulier

- Introduction
- Modèles du parallélisme, une première approche
- Threads JAVA (rappels)

Introduction

Machine **parallèle** = ensemble de **processeurs** qui **coopèrent** et **communiquent**

Historiquement, **réseaux** d'ordinateurs, machines **vectorielles** et faiblement parallèles (années 70 - IBM 360-90 vectoriel, IRIS 80 triprocesseurs, CRAY 1 vectoriel...)

Taxonomie de **Tanenbaum**:

Quatre types: **SISD**, **SIMD**, **MISD** et **MIMD**.

Basée sur les notions de flot de **contrôle** et flot de **données**.

Taxonomie de **Tanenbaum** (1):

$$\text{Machine } \textbf{SISD} = \textbf{S}\text{ingle } \textbf{I}\text{nstruction } \textbf{S}\text{ingle } \textbf{D}\text{ata} = \text{Machine Von Neuman}$$

Exemple

Le code suivant,

```
int A[100];
...
for (i=1;100>i;i++)
   A[i]=A[i]+A[i+1];
```

s'exécute sur une machine séquentielle en faisant les additions `A[1]+A[2]`, `A[2]+A[3]`, `etc.`, `A[99]+A[100]` à la suite les unes des autres.

Taxonomie de **Tanenbaum** (2):

Machine **SIMD** = **S**ingle **I**nstruction **M**ultiple **D**ata

(1) Parallèle (Connection Machine)

(2) Systolique

En général exécution **synchrone**

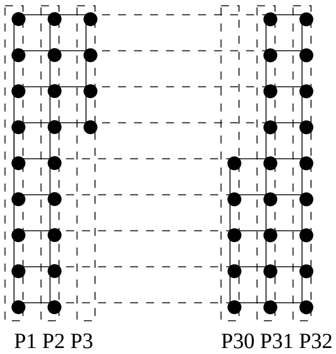
Exemple

En CM-Fortran sur la Connection Machine-5 avec 32 processeurs,

```
        INTEGER I,A(32,1000)
CMF$    LAYOUT A(:NEWS,:SERIAL)
        ...
        FORALL (I=1:32,J=1:1000)
     $     A(I:I,J:J)=A(I:I,J:J)+A(I:I,(J+1):(J+1))
```

Chaque processeur i, $1 \leq i \leq 32$ a en sa mémoire locale une tranche du tableau `A`: `A(i,1), A(i,2), ..., A(i,1000)`. Il n'y a pas d'interférence dans le calcul de la boucle entre les différentes tranches: tous les processeurs exécutent la même boucle sur sa propre tranche en même temps.

Exemple



Taxonomie de **Tanenbaum** (3):

Machine **MISD** = **M**ultiple **I**nstruction **S**ingle **D**ata

Processeurs vectoriels, architectures pipelines

Exemple

Pipelinage d'une addition vectorielle,

```
FOR  i:=1 to n DO
   R(a+b*i):=A(a'+b'*i)+B(a''+b''*i);
```

`A`, `B` et `R` sont placés dans des registres vectoriels qui se remplissent au fur et à mesure du calcul,

Exemple

Temps	$A\ (\ i\ )$	$B\ (\ i\ )$	$R\ (\ i\ )$
1	1 . . .	1 . . .	. . . .
2	2 1 . .	2 1 . .	. . . .
3	3 2 1 .	3 2 1 .	. . . .
4	4 3 2 1	4 3 2 1	. . . .
5	5 4 3 2	5 4 3 2	1 . . .
6	6 5 4 3	6 5 4 3	2 1 . .
etc.			

Taxonomie de **Tanenbaum** (4):

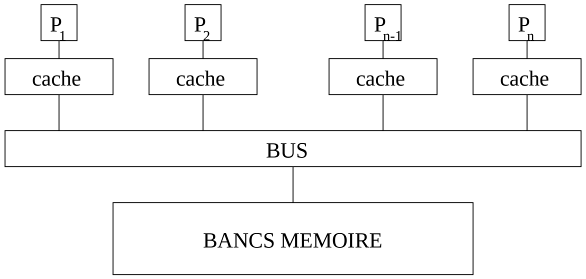
Machine **MIMD** = **M**ultiple **I**nstruction **M**ultiple **D**ata

(1) Mémoire partagée (Sequent)

(2) Mémoire locale + réseau de communication (Transputer, Connection Machine, local, par réseau d'interconnexion) - Système réparti

C'est le cas (2) que l'on va voir plus particulièrement avec RMI. On pourra également simuler le cas (1) (que l'on verra plus avec les threads JAVA).

Mémoire Partagée

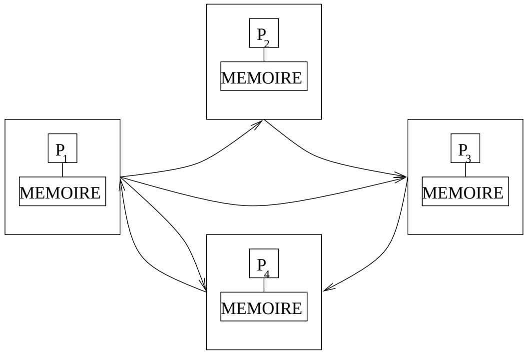


Mémoire Partagée

Synchronisation par,

- Barrières de synchronisation,
- Sémaphores : deux opérations P et V.
- Verrou (mutex lock) : sémaphore binaire qui sert à protéger une section critique.
- Moniteurs : construction de haut niveau, verrou implicite.

Machine distribuée



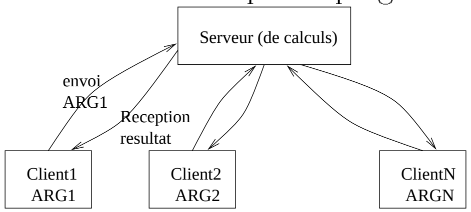
Machine distribuée

Synchronisation et échange d'information par,

- Appel de procédure distribuée (RPC ou RMI en ce qui nous concernera) :
  - réponse synchrone
  - réponse asynchrone
- Envoi/Réception de message asynchrone (tampon de taille limitée ou non); active polling ou gestion à l'arrivée par une procédure `handler`.
- Envoi/Réception de message synchrone : rendez-vous.
- Mélange des deux derniers cas.

Exemple – Clients/Serveurs

Le protocole RPC ("Remote Procedure Call") entre machines UNIX avec réseau Ethernet est un exemple de programmation MIMD:



Remarques

Architectures plus ou moins adaptées à certains problèmes.

Gain de temps espéré: au plus N (nombre de processeurs).

En pratique, parallélisme difficile à contrôler

Programmation parallèle:

(1) Language séquentiel: le compilateur **parallélise** (Fortran...), voir fin du poly d'Y. Robert

(2) Constructions parallèles **explicites** (Parallel C, Occam...)

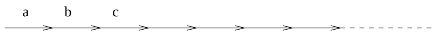
Constructions parallèles explicites

- Création de parallélisme,
  - Itération simultanée sur tous les processeurs (**FOR** parallèle de Fortran),
  - Définition d'un ensemble de **processus** (**COBEGIN**),
  - Création de **processus** (**FORK** de Unix)
- Contrôle du parallélisme,
  - Synchronisation (**Rendez-vous** d'Ada),
  - Passage de messages (synchrones/asynchrones, **broadcast**,...),
  - Section critiques (gestion de la mémoire partagée),
  - Stopper une exécution parallèle (**COEND**, **WAIT** d'Unix)

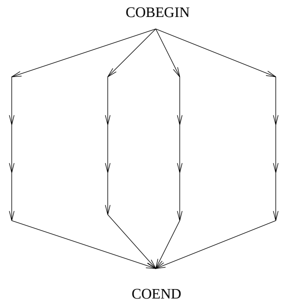
Processus (MIMD)

Un **Processus** est une unité de programme **séquentielle** (abstraction d'un processeur) avec,

- sa propre pile de données,
- son compteur ordinal,
- éventuellement sa mémoire locale



Constructions parallèles explicites (suite):



Constructions parallèles explicites (suite):

Synchronisation: but = assurer qu'à un moment donné tous les processus ont suffisament avancés leurs calculs.

Erreurs possibles: **Interblocage** (deadlock, livelock), **Famine**,... (cours 2 et 3)

Exemples:

- X dit à Y: "Donne moi ton nom et je te dirai le mien". Y dit la même chose à X. Ceci est une situation d'interblocage.
- X et Y veulent tous deux utiliser un objet. X est plus rapide qu'Y et obtient régulièrement l'utilisation de cet objet avant Y qui ne l'obtient jamais. On dit que Y est en situation de famine.

Constructions parallèles explicites (suite):

MIMD mémoire partagée,

Erreurs possibles: **incohérence** des données.

Partant de $x = 0$, on exécute $x := x + x$ en parallèle avec $x := 1$. Par exemple, on a ces trois exécutions possibles:

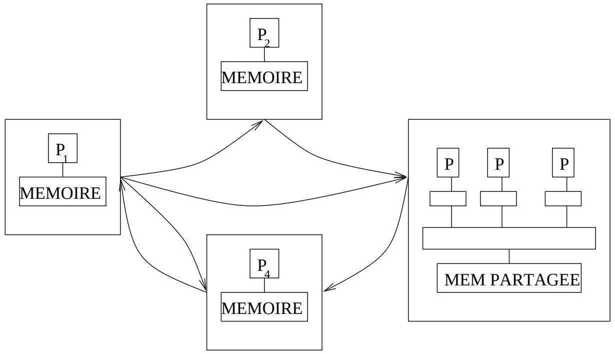
`LOAD x,R1`	`WRITE x,1`	`LOAD x,R1`
`LOAD x,R2`	`LOAD x,R1`	`WRITE x,1`
`WRITE x,1`	`LOAD x,R2`	`LOAD x,R2`
`WRITE x,R1+R2`	`WRITE x,R1+R2`	WRITE x,R1+R2
Résultat x=0	Résultat x=2	Résultat x=1

Pour y remédier, **sections critiques** et **exclusion mutuelle**.

Réseaux de stations

Pas d'horloge globale, mode MIMD, communication par passage de messages (typiquement gérés par PVM, MPI dans le monde numérique, voir,
- http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/
- http://www.csm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html
) sur un réseau local ou d'interconnexion.

Architectures hybrides



Combinaison sur un réseau local de stations et de machines multi-processeurs (elles-même gérant leur parallélisme interne par mémoire partagée ou par bus ou réseau). Par exemple threads JAVA+RMI.

Threads JAVA

- Concept répandu mais annexe dans d'autres langages de programmation (C ou C++ par exemple),
- Concept intégré dans JAVA (mais aussi ADA)
- Thread = "Thread of Control", processus léger etc.
- un Thread est un programme séquentiel, avec sa propre mémoire locale, s'exécutant en même temps, et sur la même machine virtuelle JAVA, que d'autres threads
- communication à travers une mémoire partagée (ainsi que des méthodes de synchronisations)

Utilité des threads

- Plus grande facilité d'écriture de certains programmes (extension de la notion de fonction)
- Systèmes d'exploitation
- Interfaces graphiques
- Ordinateurs multi-processeurs (bi-pentium etc.)

Création

Pour créer un thread, on crée une instance de la classe `Thread`,
`Thread Proc = new Thread();`

- on peut configurer `Proc`, par exemple lui associer une priorité,
- on peut l'exécuter en invoquant la méthode `start` du thread,

Exécution

- `start()` va à son tour invoquer la méthode `run` du thread (qui ne fait rien par défaut)
- C'est possible par exemple si on définit `Proc` comme une instance d'une sous-classe de `Thread`, dans laquelle on redéfinit la méthode `run`.
- Les variables locales sont des champs de cette sous-classe.

Exemple

```
class Compte extends Thread {
   int valeur;

   Compte(int val) {
      valeur = val;
   }

   public void run() {
      try {
```

```
        for (;;) {
           System.out.print(valeur + " ");
           sleep(100);
        }
     } catch (InterruptedException e) {
          return;
       }
   }

   public static void main(String[] args) {
      new Compte(1).start();
      new Compte(2000).start();
   }
}
```


Exécution

L'exécution du programme `main` donne quelque chose comme,

```
> java Compte
1 2000 2000 1 1 1 1
^C
>
```


Remarques

- Les entiers `valeur` sont distincts dans les deux threads qui s'exécutent. C'est une variable locale au thread.
- Si on avait déclaré `static int valeur`, cette variable aurait été partagée par ces deux threads (durée de vie=celle des threads).
- Si on avait déclaré `Integer valeur` ("classe enveloppante" de `int`), cette classe aurait été partagée par tous les threads et aurait une durée de vie éventuellement supérieure à celle des threads

Arrêt

- méthode `stop()` (dangereux et n'existe plus en JAVA 2),
- méthode `sleep(long)` (suspension du thread pendant un certain nombre de nanosecondes)

MAIS...

- Pas d'héritage multiple en JAVA, donc on ne peut pas hériter de `Thread` et d'une autre classe en même temps,
- Il est alors préférable d'utiliser l'interface `Runnable`.

L'INTERFACE Runnable

- L'interface `Runnable` représente du code exécutable,
- Elle ne possède qu'une méthode, `public void run();`
- Par exemple la classe `Thread` implémente l'interface `Runnable`.
- Mieux encore, on peut construire une instance de `Thread` à partir d'un objet qui implémente l'interface `Runnable` par le constructeur: `public Thread(Runnable target);`

EXEMPLE

```
class Compte implements Runnable {
   int valeur;

   Compte(int val) {
      valeur = val;
   }

   public void run() {
      try {
         for (;;) {
            System.out.print(valeur + " ");
            sleep(100);
         }
```


EXEMPLE

```
      } catch (InterruptedException e) {
            return;
         }
   }

   public static void main(String[] args) {
      Runnable compte1 = new Compte(1);
      Runnable compte2 = new Compte(2000);
      new Thread(compte1).start();
      new Thread(compte2).start();
   }
}
```

Déterminer la terminaison d'un thread

- `isAlive()` renvoie un booléen indiquant si un thread est encore vivant (après que start() se soit exécuté, et avant la fin normale ou imposée par stop()),

Déterminer la terminaison d'un thread

- `void join()` (comme sous Unix) attend la terminaison d'un thread.
- Egalement: `void join(long timeout)` attend au maximum `timeout` millisecondes.
- Par exemple:

```
public class ... extends Thread {
   ...
   public void stop() {
      t.shouldRun=false;
      try {
         t.join();
      } catch (InterruptedException e) {}   } }
```


Nommer les threads

- `void setName(String name)` nomme un thread: utile essentiellement pour le debugging (`toString()` renvoie ce nom)
- `String getName()` renvoie le nom du thread.

Informations sur les threads

- `static Thread currentThread()` renvoie la référence au Thread courant c'est-à-dire celui qui exécute `currentThread()`,
- `static int enumerate(Thread[] threadArray)` place tous les threads existant (y compris le `main()` mais pas le thread ramasse-miettes) dans le tableau `threadArray` et renvoie leur nombre.
- `static int activeCount()` renvoie le nombre de threads.

EXEMPLE

```
class Compte3 extends Thread {
   int valeur;

   Compte3(int val) {
      valeur = val;
   }

   public void run() {
      try {
         for (;;) {
            System.out.print(valeur + " ");
            sleep(100);
         }
```



```
      } catch (InterruptedException e) {
           return; } }

   public static void printThreads() {
      Thread[] ta = new Thread[Thread.activeCount()];
      int n = Thread.enumerate(ta);
      for (int i=0; i<n; i++) {
         System.out.println("Le thread "+ i + " est
                             " + ta[i].getName());
      } }

   public static void main(String[] args) {
      new Compte3(1).start();
      new Compte3(2000).start();
      printThreads(); } }
```


EXÉCUTION

```
% java Compte3
1 2000 Le thread 0 est main
Le thread 1 est Thread-2
Le thread 2 est Thread-3
1 2000 1 2000 1 2000 1 2000 2000
1 1 2000 2000 1 1 2000 2000 1 1
2000 2000 1 1 2000 2000 1 1 2000
2000 1 1 2000 2000 1 1 ^C
%
```