Parallélisme

Eric Goubault
Commissariat à l'Energie Atomique, Saclay & Chaire
Ecole Polytechnique/Thalès

Organisation

- Complémentaire du cours système, faisant suite au cours d'informatiq fondamentale (avec quelques rappels)
- Cours suivis de TPs et de TDs (utilisation des threads JAVA), évaluation sur miniprojet
- http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/ParaI10.html
- Pour d'autres cours (MPRI, PVM/MPI etc.): http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault

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.)
- La programmation massivement parallèle (CUDA sur cartes NVIDIA)
- L'ordonnancement de tâches
- Au delà du multitâche ("clusters" de stations, distribution, RMI)
- La tolérance aux pannes

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):

Machine **SISD** = **S**ingle **I**nstruction **S**ingle **D**ata
= 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**

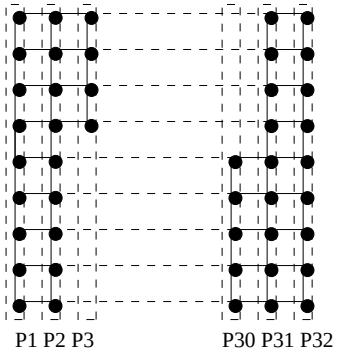
Exemple

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):

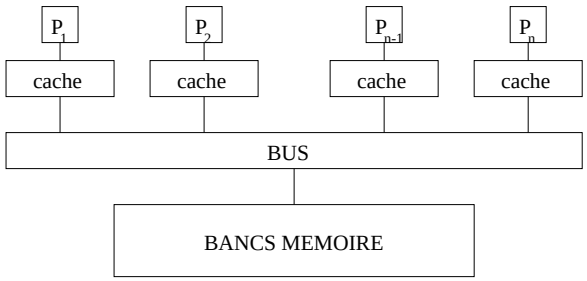
Machine **MIMD** = **M**ultiple **I**nstruction **M**ultiple **D**ata

(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

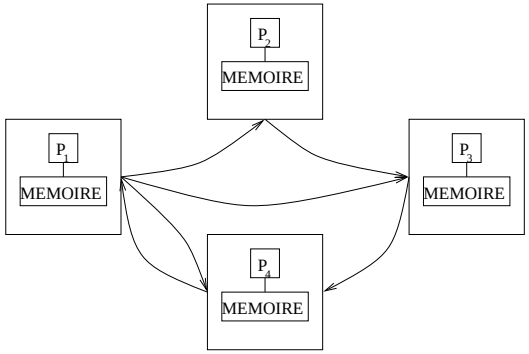


Mémoire Partagée

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



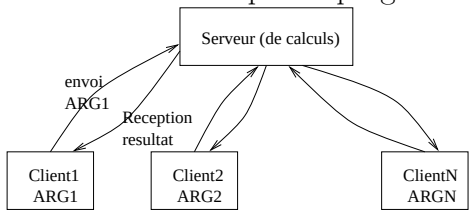
Machine distribuée

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 (TD6/CCS)
- 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...)

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

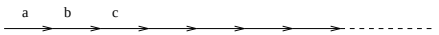
Constructions parallèles explicites

- 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)

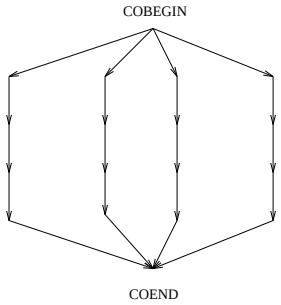
Un **Processus** est une unité de programme **séquentielle** (abstraction d'un processeur) avec,

- 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:

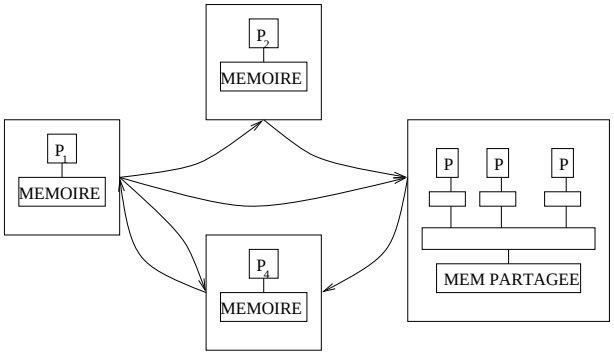
`LOAD x,R1`	`WRITE x,1`	`LOAD x,R1`	`LOAD x,R1`
`LOAD x,R2`	`LOAD x,R1`	`WRITE x,1`	`LOAD x,R2`
`WRITE x,1`	`LOAD x,R2`	`LOAD x,R2`	`WRITE x,R1+R2`
`WRITE x,R1+R2`	`WRITE x,R1+R2`	`WRITE x,R1+R2`	`WRITE x,1`
Résultat x=0	Résultat x=2	Résultat x=1	Résultat x=1

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

Réseaux de stations

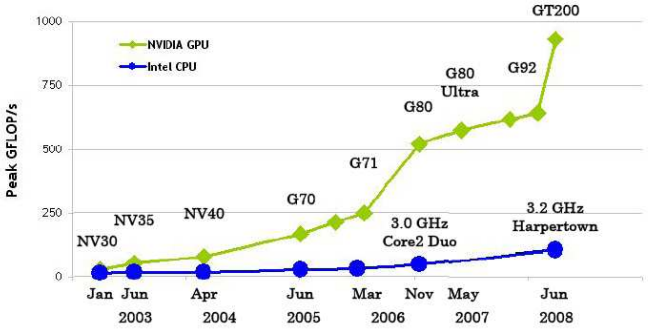
Pas d'horloge globale, mode MIMD, communication par passage de messages, typiquement gérés par PVM, MPI dans le monde numérique, voir,
- http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/
- http://www.csm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html
sur un réseau local ou d'interconnexion.

Architectures hybrides



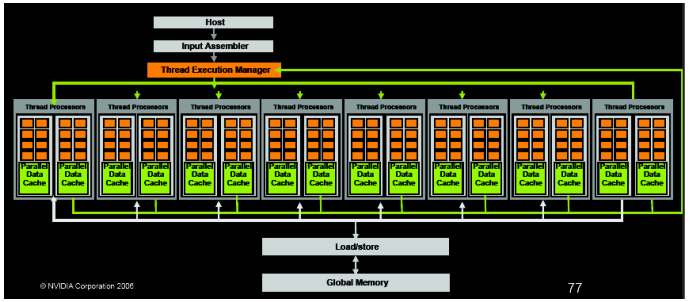
Combinaison sur un réseau local de stations et de machines multi-processeurs (elles-même gérant leur parallélisme interne par mémoire partagée ou par bus ou réseau). Par exemple threads JAVA+RMI.

Cartes NVIDIA



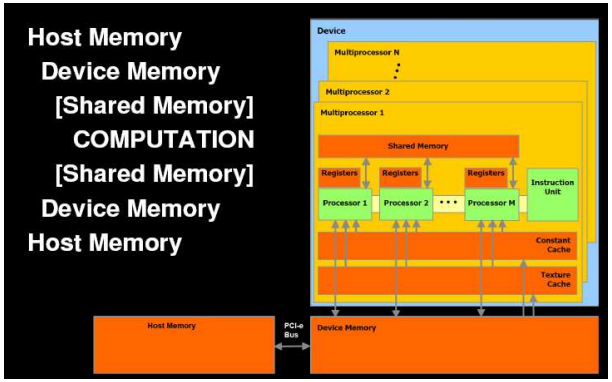
GT200 = GeForce GTX 280	G71 = GeForce 7900 GTX	NV35 = GeForce FX 5950 Ultra
G92 = GeForce 9800 GTX	G70 = GeForce 7800 GTX	NV30 = GeForce FX 5800
G80 = GeForce 8800 GTX	NV40 = GeForce 6800 Ultra	

Exemple: architecture G80



(ici 128 threads procs. pour 4 multi-procs de 32 coeurs) L'hôte peut charger des données sur le GPU, et calculer en parallèle avec le GPU

Architecture mémoire



Architecture

- Organisés en multiprocesseurs (ex. GeForce GTX 260: 6 multi-proc de 32 coeurs=192 coeurs, à 1.242GHz)
- registres 32 bits par multi-proc.
- mémoire partagées par multi-proc.
- un cache à lecture seule (ainsi qu'un cache de textures à lecture seule)

TDs CUDA

- On dispose de cartes GeForce GTX 260 avec 192 coeurs pour les TDs (salles 30 [pays], 35 [os], 36 [voitures])
  - on peut en théorie atteindre 600 GFlops crête!
  - 896 Mo de mémoire
- Ceux qui ont des machines pour jeux vidéos... par exemple GeForce série 8 peuvent télécharger CUDA:
  - http://www.nvidia.com/cuda accessible sous windows, vista, linux etc.
  - installer le driver CUDA, le compilateur nvcc et le sdk (avec de multiples exemples)
  - cf. par exemple mon portable avec GeForce 9400M (démo)

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 1 2000 1 1 2000 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 + " ");
            Thread.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();
      }
}
```


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
%
```

Complément: Priorités et Ordonnancement

- `void setPriority(int priority)` assigne une priorité au thread donné
- `int getPriority()` renvoie la priorité d'un thread donné
- `static void yield()`: le thread courant rend la main, ce qui permet à la machine virtuelle JAVA de rendre actif un autre thread de même priorité

Etats d'un thread

Un thread peut être dans l'un des 4 cas suivants:

- l'état initial, entre sa création et `start()`.
- l'état prêt, immédiatement après `start`.
- l'état bloqué: thread en attente, d'un verrou, d'un socket, quand il est suspendu (`sleep(long)`
- l'état terminaison, quand `run()` se termine ou quand on invoque `stop()` (à éviter si possible... n'existe plus en JAVA 2).

Etats d'un thread

- Détermination de l'état: `isAlive()`, qui renvoie un booléen indiquant si un thread est encore vivant, c'est à dire s'il est prêt ou bloqué
- On peut aussi interrompre l'exécution d'un thread qui est prêt (passant ainsi dans l'état bloqué). `void interrupt()` envoie une interruption au thread spécifié; si pendant `sleep`, `wait` ou `join`, lèvent une exception `InterruptedException`.

Etats d'un thread

- `void join()` attend terminaison d'un thread. Egalement: `void join(long timeout)` attend au maximum `timeout` millisecondes.

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

Priorités

- Priorité = nombre entier, qui plus il est grand, plus le processus est prioritaire.
- `void setPriority(int priority)` assigne une priorité et `int getPriority()` renvoie la priorité.
- La priorité peut être maximale: `Thread.MAX_PRIORITY`, normale (par défaut): `Thread.NORM_PRIORITY` (au minimum elle vaut 0).

Processus démons

On peut également déclarer un processus comme étant un démon ou pas:

```
setDaemon(Boolean on);
boolean isDaemon();
```

"support" aux autres (horloge, ramasse-miettes...). Il est détruit quand il n'y a plus aucun processus utilisateur (non-démon) restant

Ordonnancement tâches (cas 1 processeur)

- Le choix du thread JAVA à exécuter (partiellement): parmi les threads qui sont prêts.
- Ordonnanceur JAVA: ordonnanceur préemptif basé sur la priorité des processus.
- "Basé sur la priorité": essaie de rendre actif le(s) thread(s) prêt(s) de plus haute priorité.
- "Préemptif": interrompt le thread courant de priorité moindre, qui reste néanmoins prêt.

Ordonnancement de tâches

- Un thread actif qui devient bloqué, ou qui termine rend la main à un autre thread, actif, même s'il est de priorité moindre.
- La spécification de JAVA ne définit pas précisément la façon d'ordonnancer des threads de même priorité, par exemple:
  - "round-robin" (ou "tourniquet"): un compteur interne fait alterner l'un après l'autre (pendant des périodes de temps prédéfinies) les processus prêts de même priorité $\longrightarrow$ assure l'*équité*; aucune *famine* (plus tard...)
  - Ordonnancement plus classique (mais pas équitable) thread actif ne peut pas être préempté par un thread prêt de même priorité. Il faut que ce dernier passe en mode bloqué. (par `sleep()` ou plutôt `static void yield()`)

En fait...

L'ordonnancement dépend aussi bien de l'implémentation de la JVM que du système d'exploitation sous-jacent; 2 modèles principaux:

- "green thread", c'est la JVM qui implémente l'ordonnancement des threads qui lui sont associés (donc pas d'exploitation multi-processeur - souvent UNIX par défaut).
- "threads natifs", c'est le système d'exploitation hôte de la JVM qui effectue l'ordonnancement des threads JAVA (par défaut Windows).