# Info0802
## Programmation parallèle et multi-core

## Cours 6

# Architectures
# Algorithmique
# Programmation

Pierre Delisle
Université de Reims Champagne-Ardenne
Département de Mathématiques et Informatique
10 février 2009

# Pierre Delisle

- Maître de Conférences du département de Math-Info de l'URCA
- Mail
  - pierre.delisle@univ-reims.fr
- Site Web
  - http://cosy.univ-reims.fr/~pdelisle

# Introduction au parallélisme

Qu'est-ce que le parallélisme ?
À la recherche du parallélisme...
Architectures parallèles
Langages de programmation

# Exercice 1

Comptables.....

# Les limites du mono-processeur

- L'augmentation de la vitesse d'un processeur devient de plus en plus coûteuse et les gains sont de plus en plus limités
- Pourtant, les besoins ne diminuent pas !
- Une solution
  - dupliquer les unités de calcul
- Difficultés
  - Dégager la concurrence des codes d'application
  - Gérer les communications/accès mémoire

# Qu'est-ce que le parallélisme ?

- Exécution d’un algorithme en utilisant plusieurs processeurs plutôt qu’un seul
- Division d’un algorithme en tâches pouvant être exécutées en même temps sur des processeurs différents
- Le but : réduire le temps de résolution d’un problème un utilisant un ordinateur parallèle
- 3 niveaux d’abstraction
  - Architectures, Algorithmes, Programmation

# Architectures parallèles

- Ordinateur parallèle : ordinateur comportant plusieurs processeurs et supportant la programmation parallèle
- Plusieurs types d'architectures
  - Distribuées
  - Centralisées
- Modèles d'architecture : simplification du fonctionnement des ordinateurs parallèles
  - Taxonomie de Flynn

# Taxonomie de Flynn

- SISD : Single Instruction Single Data
  - Ordinateurs séquentiels
- SIMD : Single Instruction Multiple Data
  - Tableaux de processeurs (arrays)
  - Ordinateurs vectoriels en pipelilne
- MISD : Multiple Instruction Single Data
  - Tableaux systoliques (systolic array)
- MIMD : Multiple Instruction Multiple Data
  - Multiprocesseurs et Multi-Ordinateurs

# Algorithmique parallèle

- Approches de résolution de problèmes dans un contexte d'exécution parallèle
- Modèles algorithmiques : contextes d'exécution parallèle simplifiés pour faciliter la conception
  - PRAM
- Analyse théorique de la performance

# Programmation parallèle

- Programmation dans un langage permettant d'exprimer le parallélisme dans une application réelle
- Différents niveaux d'abstraction possibles
- La parallélisation automatique serait la solution idéale, mais c'est très difficile
- La façon de programmer n'est pas indépendante de la machine utilisée

# Bref historique du parallélisme

- …-1970 : Accessible presque uniquement aux gouvernements (défense), très coûteux
- 1970 – 1980 : Grosses entreprises (pétrole, automobile)
- 1980 – 1990 : premières machines parallèles « abordables » (microprocesseurs, VLSI)
  - Ordinateurs parallèles très performants, mais très peu flexibles
  - PROBLÈMES : programmation, portabilité

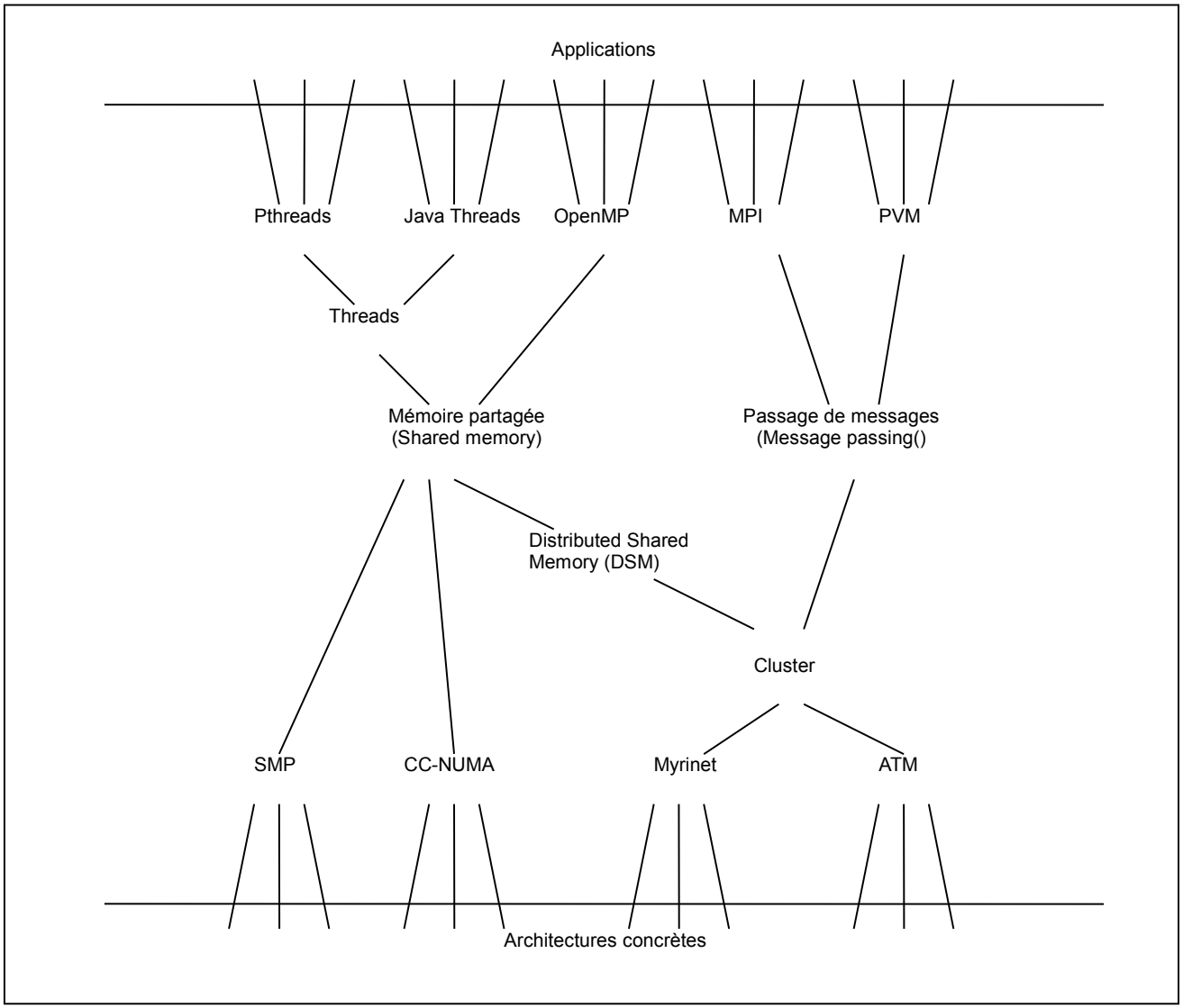
# Bref historique du parallélisme (suite)

- 1990 - 2000 : Machines basées sur le regroupement de PC répandus commercialement (Beowulf)
- 2000 - … : SMP, clusters, CC-NUMA, Grilles de calcul
- Depuis quelques années : processeurs multi-core

# Le parallélisme aujourd'hui

- Constats
  - Le parallélisme devient de plus en plus accessible
  - Les environnements de développement deviennent de plus en plus conviviaux
- Cependant...
  - Il reste du travail à faire
    - Besoin d'intelligence !
    - Besoin de solutions logicielles performantes et portables

# Vue d'ensemble du calcul parallèle du début des années 2000



# Enjeux importants du parallélisme

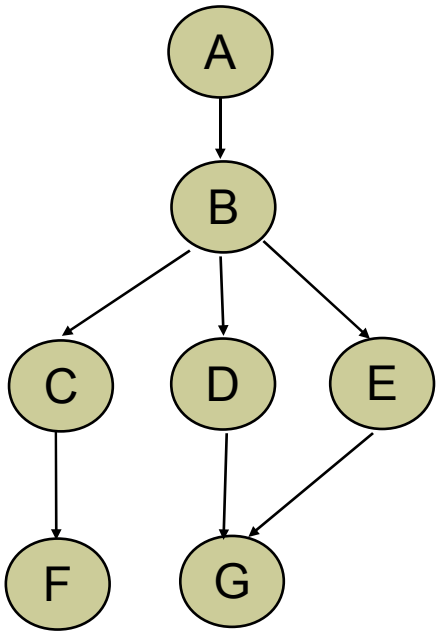
- Situation idéale : transparence
  - Le système dégage le parallélisme à partir d'un programme séquentiel
  - Idéal, mais très difficile
- Situation à éviter : multiplicité inutile
  - Coûts de conception/développement importants
- Compromis nécessaire entre la facilité de conception/développement et la performance
- Favoriser la portabilité des applications

# À la recherche du parallélisme...

Graphe de dépendance
Parallélisme de données
Parallélisme de tâches
Parallélisme en pipeline

# Graphe de dépendance

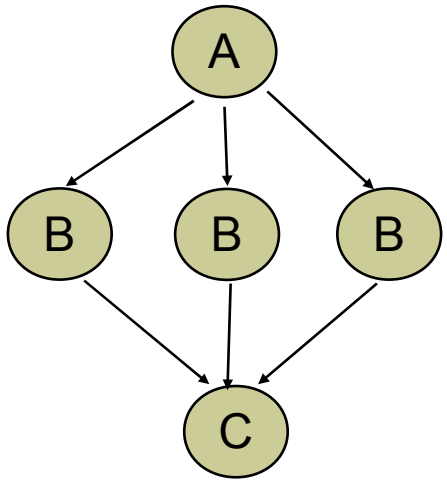
- Permet de représenter visuellement le parallélisme d'un algorithme (exemple)
- Sommet = tâche
- Arc = Relation de dépendance



# Parallélisme de données

- Présent lorsque des tâches indépendantes appliquent la même opération sur différents éléments d'un ensemble de données

```
Pour i = 1 à 100                    } A
    Lire (b[i], c[i])               }
Pour i = 1 à 100                    } B
    a[i] = b[i] + c[i]              }
Pour i = 1 à 100                    } C
    Écrire (b[i], c[i])             }
```



# Parallélisme de tâches

- Présent lorsque des tâches indépendantes appliquent des opérations différentes sur des données (différentes ou non)

$a = 2$

$b = 3$

$c = 3$

$m = (a + c) / 2$

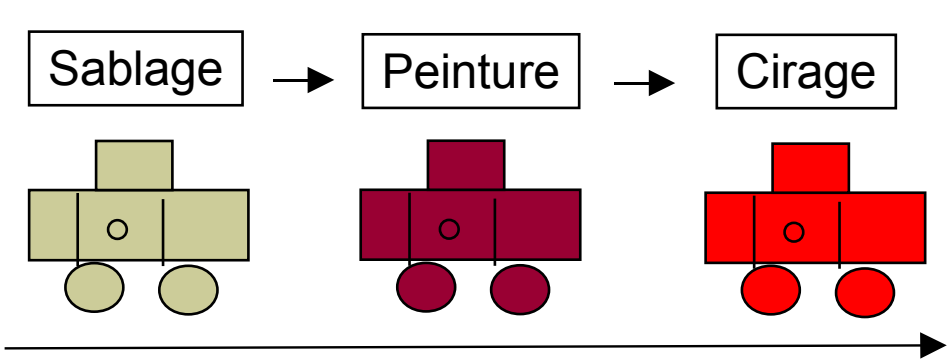
$s = (a^2 + b^2) / 2$

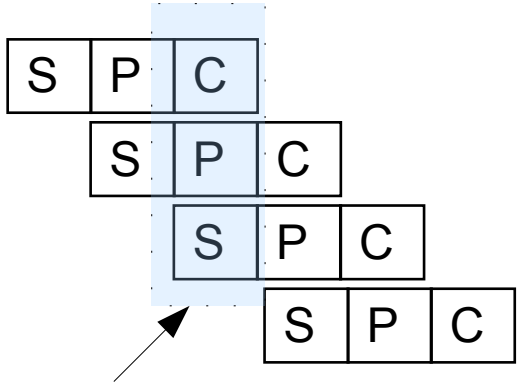
$v = s – m^2$

Graphe de dépendance ?

# Parallélisme en pipeline

- Diviser un algorithme strictement séquentiel en phases
- Résoudre plusieurs instances de problèmes à la chaîne
- La sortie (output) d'une phase représente l'entrée (input) de la phase suivante




Parallélisme

# Exemple 1

- Entreprise d'entretien ménager...

# Architectures parallèles

Multi-ordinateurs
Multiprocesseurs

# Introduction

- 1960-1990 : beaucoup de développement dans les architectures, mais trop de variété
  - Processeurs : fabrication propriétaire vs. Générique
  - Petit nombre de processeurs super-puissants vs. grand nombre de processeurs « ordinaires »

# Introduction

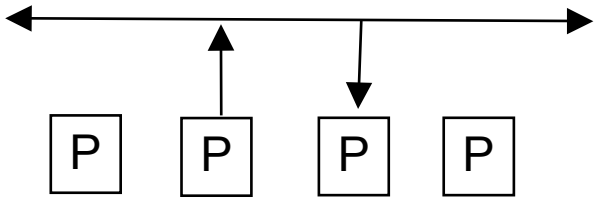
- Aujourd'hui :
  - Utilisation de CPU génériques, croissance plus rapide que les technologies propriétaires
- Questions
  - Comment relier ces processeurs les uns aux autres?
  - Comment relier ces processeurs à la mémoire ?

# Réseau d’interconnexion

- Sert à :
  - Relier les processeurs à une mémoire partagée
  - Relier les processeurs les uns aux autres
- Le médium du réseau peut être :
  - Partagé
  - Commuté
- Problématiques :
  - Vitesse de communication vs. vitesse des processeurs

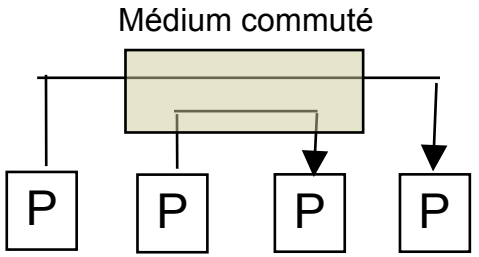
# Médium partagé

- Les messages sont envoyés à tous, un à la fois
- Tous les processeurs reçoivent le message mais seuls ceux identifiés comme destinataires le conservent
- Exemple : Ethernet
- Beaucoup de communications = collisions



# Médium commuté

- Permet des communications point-à-point entre paires de processeurs
- Chaque processeur a un lien avec le médium
- Principaux avantages sur le médium partagé
  - Permet des communications simultanées
  - Plus extensible à de grand nombre de processeurs
- Principaux inconvénients :
  - Complexité
  - Coût



# Topologie du réseau d'interconnexion

- Directe : 1 processeur = 1 commutateur
- Indirecte : Nb. procs < Nb. Commutateurs
- Critères de performance du réseau :
  - Diamètre : Distance maximum entre 2 nœuds
  - Largeur bissectionnelle : Nombre min. de liens devant être enlevés pour sectionner le réseau en deux moitiés
  - Degré : Nb liens directs d'un nœud vers d'autres nœuds
  - Longueur des liens entre les noeuds

# Topologie du réseau d'interconnexion

- Plusieurs types de topologies
  - Grille
  - Arbre binaire
  - Arbre hyperbolique
  - Papillon
  - Hypercube
  - Multi-étage
- Aucune topologie n'est supérieure sur tous les critères

# Tableaux de processeurs (Arrays)

- Ordinateur vectoriel : ordinateur contenant des instructions sur des vecteurs (tableaux de val.)
- Tableau (réseau) de processeurs : ordinateur vectoriel comprenant un ensemble d'éléments de calcul identiques et synchrones
- Les éléments de calcul sont des processeurs primitifs contrôlés par un processeur standard

# Tableaux de processeurs (Arrays)

- Les processeurs effectuent simultanément la même opération sur des données différentes
- Parallélisme de données
  - Vecteur < Tableau = Perte de performance
  - Vecteur > Tableau = Mapping (manuel ou système)

# Le besoin d’architectures flexibles

- Problèmes associés aux ordinateurs vectoriels
  - Peu flexibles (limité principalement au parallélisme de données)
  - Difficiles à programmer
  - Technologie progressant trop lentement par rapport aux processeurs génériques
  - Etc…

# Le besoin d’architectures flexibles

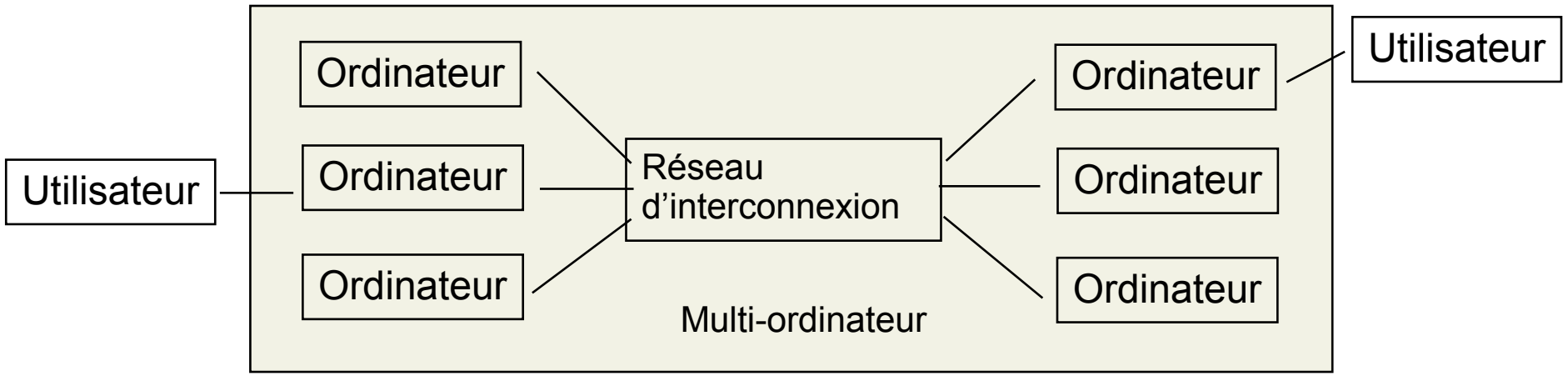
- 2 types d’ordinateurs mieux adaptés aux besoins  actuels se sont développés depuis les années 90
  - Multiprocesseurs
  - Multi-ordinateurs

# Multi-ordinateur

- La mémoire est physiquement distribuée entre les processeurs
- Logiquement, espaces d'adressage disjoints
- Chaque processeur n'a accès qu'à sa mémoire locale
- Interactions entre processeurs effectuées par passage de messages
- Clusters, réseaux de stations, ...

# Multi-ordinateur

- La machine parallèle est composée de plusieurs ordinateurs possédant
  - Un système d'exploitation
  - Des programmes
  - Un point d'entrée



# Clusters vs. Réseaux de stations

- Réseau de stations (NOW) :
  - Ensemble hétérogène d'ordinateurs
  - Souvent réparti géographiquement
  - Les nœuds sont souvent déjà utilisés localement
  - Calcul parallèle = Utilisation secondaire
  - Connectés par un réseau générique (Ethernet)
- Cluster
  - Ensemble homogène d'ordinateurs
  - Réunis géographiquement
  - Nœuds dédiés au calcul parallèle
  - Ressource unifiée de calcul parallèle
  - Réseau haut débit (Fast/Gigabit Ethernet, Myrinet)

# Clusters vs. Réseaux de stations

- Comparaison des réseaux

| | Latence (micro-sec) | Largeur de bande | Coût par nœud ($) |
|---|---|---|---|
| Ethernet | 150? | 10 | ? |
| Fast Ethernet | 100 | 100 | 100 |
| Gigabit Ethernet | 100 | 1000 | 1000 |
| Myrinet | 7 | 1920 | 2000 |

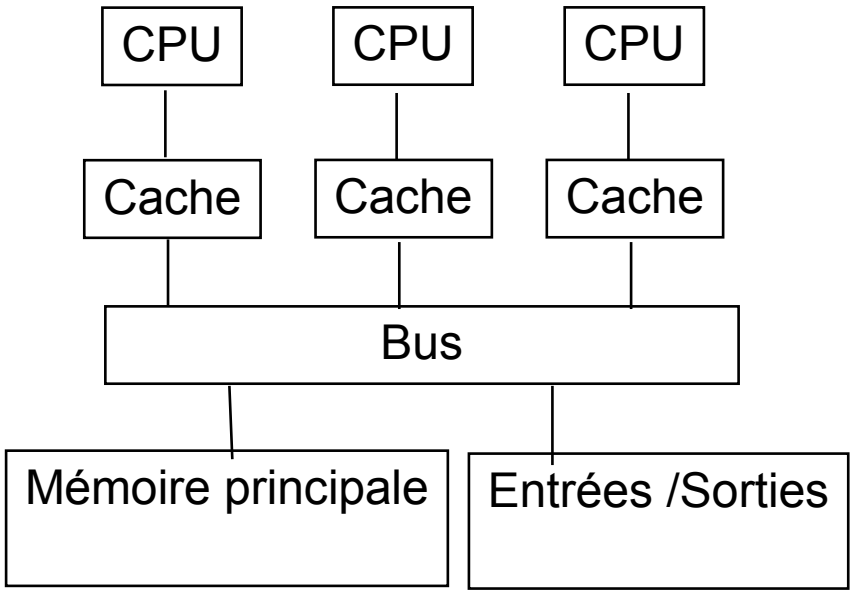
- Avantage des NOW : Peu coûteux et facile à construire avec des composantes génériques

# Multiprocesseur

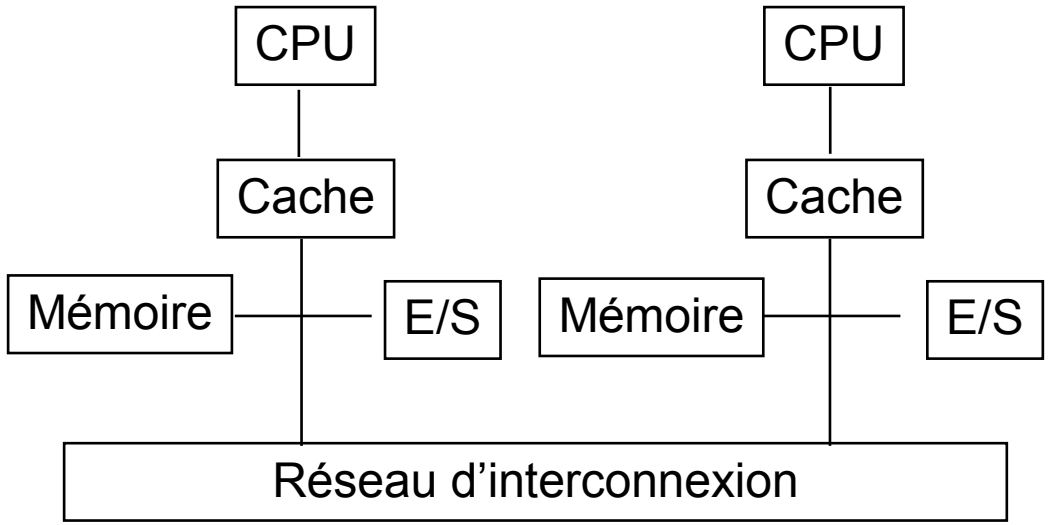
- Ordinateur comprenant plusieurs processeurs
- Mémoire partagée
- Les caches réduisent la charge sur le bus et/ou la mémoire
- Les processeurs communiquent par des lectures/écritures sur des variables en mémoire partagée (physiquement ou virtuellement)
- SMP, Multi-core, ...

# 2 types de multiprocesseur

## Centralisé




## Distribué




## Partage physique

## Partage Virtuel

- 2 problèmes
  - Cohérence de cache, synchronisation

# Cohérence de cache

- La duplication de certaines données dans les caches permet de minimiser les accès mémoire
- Que fait-on lorsqu'une écriture est effectuée?
- Protocole de cohérence de cache : ensemble de règles assurant que les processeurs possèdent la même valeur d'un emplacement mémoire
- Espionnage (Snooping) / write invalidate

# Synchronisation

- Dans certains cas d'exécution parallèle, des règles de précédence doivent être respectées
- Dans un contexte de mémoire partagée, des mécanismes permettent d'assurer un certain ordre dans les opérations
  - Exclusion mutuelle : seulement un processeur doit effectuer une partie de programme
  - Section critique : partie de programme ne pouvant être effectuée que par un processeur à la fois
  - Barrière de synchronisation : les processeurs sont tous arrêtés à un certain point du programme

# Taille des ordinateurs parallèles

- « Petits » ordinateurs parallèles
  - 2 < Nombre de processeurs < 64
  - Typiquement de type Multiprocesseurs (SMP et multi-core)
  - Vue globale de la mémoire, cohérence de cache
- « Grands ordinateurs parallèles »
  - 64 < Nombre de processeurs < plusieurs centaines
  - Typiquement de type Multi-ordinateur
  - Souvent des clusters de SMP

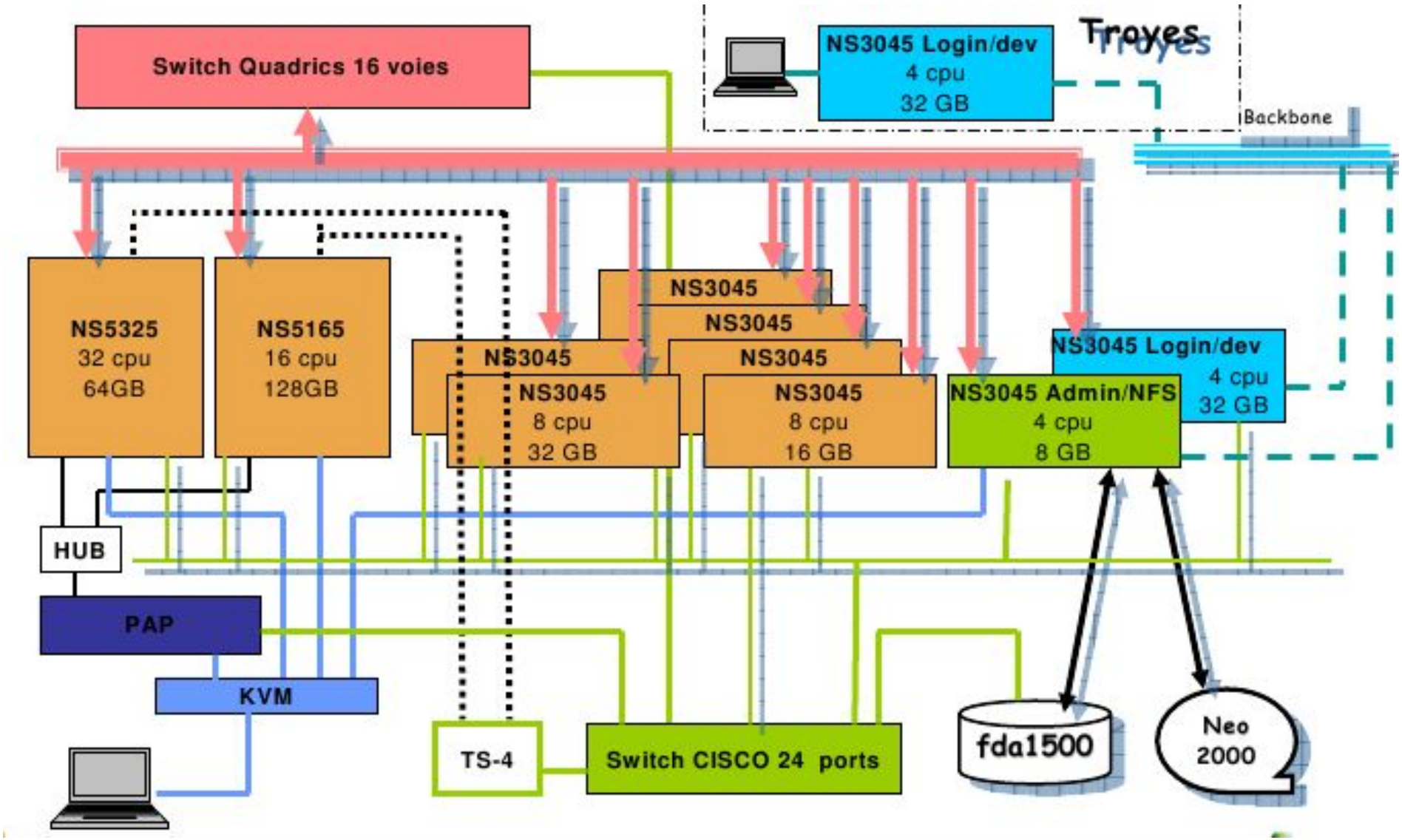
# Romeo I

- SMP 24 X UltraSparc III 900 Mhz
- 24 Go RAM
- 210 Go d'espace disque

# Romeo II

- Centre de calcul régional Champagne-Ardenne
- 8 noeuds de calcul
- Noeuds SMP de 4 à 16 processeurs
  - Procs 1.6 Ghz Dual-core (8 à 32 coeurs par noeud)
- Entre 16 Go et 128 Go RAM par noeud
- 20 disques de 146 Go chacun (2.9 To)
- Coût ?
  - Matériel, locaux, climatisation, support, ..., ..., ...

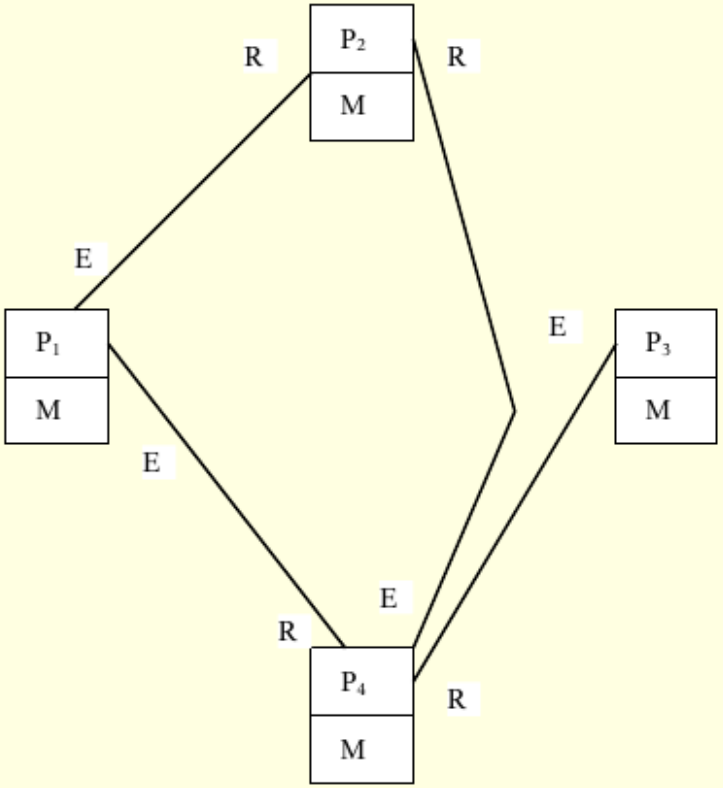
# Architecture Romeo II



Mémoire distribuée
Mémoire partagée

# Programmation mémoire distribuée

- Modèle à passage de messages
  - Processeurs attribués à des processus distincts
  - Chaque processeur possède sa propre mémoire
  - Communications par envois et réception de messages
- Languages
  - PVM, MPI



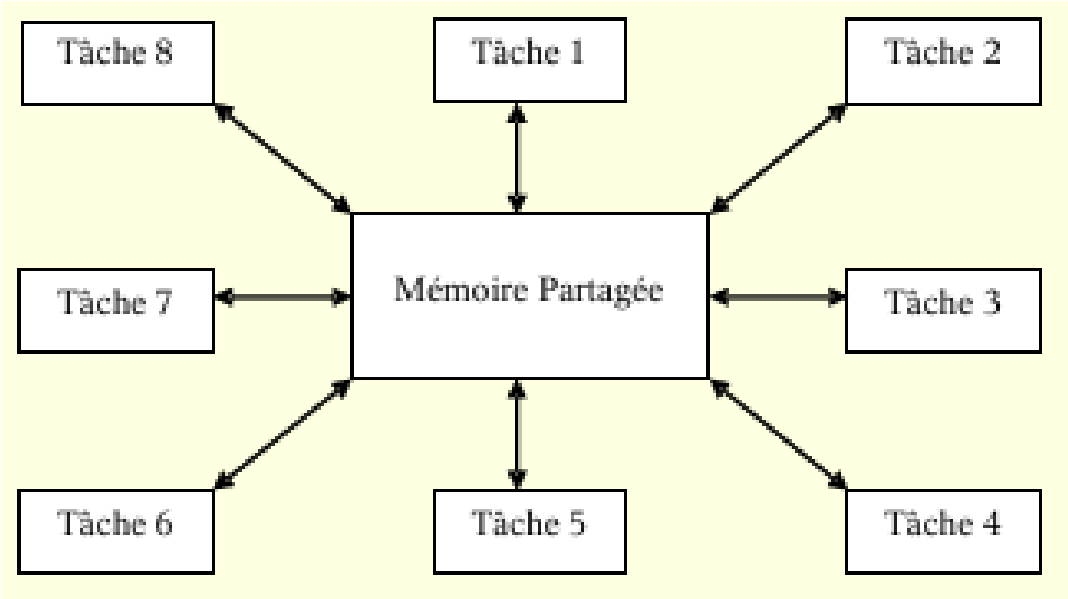
# Exemple de programme C/MPI

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>  /*bibliotheque MPI*/
int main(int argc, char *argv[]) {
    int i;
    int id;
    int val;
    int somme;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &id);
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &p);
    val = id + 1;
    MPI_Reduce(&val, &somme, 1, MPI_INT, MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD);
    if (id == 0) {
        printf("La reduction des valeurs donne %d\n", somme);
    }
    MPI_Finalize();
    return 0;
}
```

# Programmation mémoire partagée

- Modèle à mémoire partagée
  - Processus attribués à des processeurs distincs
  - Mémoire partagée (physiquement ou virtuellement)
  - Communications par lectures/écritures dans la mémoire partagée
- Langages
  - pthreads, OpenMP



# Hello World ! En C/OpenMP

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>

int main(int argc, char *argv[]) {
    int id;

    omp_set_num_threads(atoi(argv[1]));
    #pragma omp parallel private (id)
    {
        id = omp_get_thread_num();
        printf("Hello, world, du processus %d !\n", id);
    }
    return 0;
}
```

# Conclusion

- Les différents types d'ordinateurs ne se programment pas tous de la même façon
- Prochain cours : Conception d'algorithmes en général
- Cours suivants : Algorithmique et programmation sur Multiprocesseurs/Multi-ordinateurs