

# Programmation Parallèle M1 : Intro

Nombre de participants : 29

## Programmation Parallèle

Le calcul haute performance  
Architectures mémoire distribuée/mémoire partagée

Sophie Robert

UFR ST Département info

## Le déroulement du module

### Le contenu

- 15h CM Intro, Mémoire distribuée (MPI), Mémoire partagée (OpenMP), Vectorisation (intervenant Allan Blanchard)
- 14h de TP (ce n'est pas assez, il faut du travail personnel)
- 6h de TD (algorithmique)

### La modalité d'évaluation : en contrôle continu

- 3 projets + des évaluations surveillées, individuelles type questionnaires sur Celene

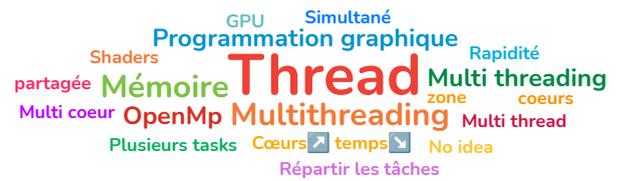
1





1. Quel mot associez vous à "parallélisme/ Programmation parallèle" ?

28 répondants



## Usage de l'IA

### Pour votre apprentissage

- Aucun code généré par l'IA ne sera accepté
- Aide à la compréhension et aide à la recherche d'erreurs dans un code
- Définition de votre prompt pour de l'aide

<https://celene.univ-orleans.fr/course/view.php?id=13845>

2

13 of 58

02/09/2025 14:10

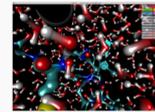
## HPC - Calcul Haute Performance

### Les caractéristiques

- Premier objectif la performance
- Problèmes visés les problèmes *compute-bound*
  - Les simulations numériques



1



3

<sup>1</sup> eaufrance.fr

Woolap

https://app.woolap.com/events/UEUBHN/results

Woolap

https://app.woolap.com/events/UEUBHN/results

## Les moyens de calculs

### Les plateformes

- Les machines parallèles (à partir des années 1960)
- Les grappes de calculs (début 2000)
  - Démocratisation du calcul parallèle
- Aujourd'hui accès "facile" à des machines très hétérogènes

4

15 of 58

02/09/2025 14:10

## Paradigme Séparation Données - Calculs

### Compute-bound

- Un système de fichiers parallèles POSIX (Lustre, IBM Spectrum Scale/GPFS)
- Un système d'archivage
- Un réseau d'interconnexion efficace inter processus (InfiniBand)

### Forte évolution : Architectures hybrides

- Mémoire partagée/Mémoire distribuée
- Accélération avec le calcul sur GPU
- Voir calcul spécialisé sur FPGA
- Nouvelles technologies pour réduire le coût des flux de données mémoire, CPU, GPU (NVlink, DirectStorage).

5

15 of 58

02/09/2025 14:10

02/09/2025 14:10

## Les moyens de calculs : Le top 500 <sup>2</sup>

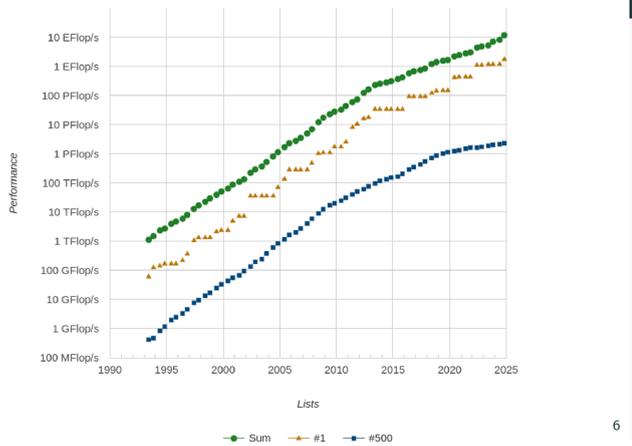
Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	DOE/NNSA/LNL United States	El Capitan - HPE Cray EX235a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.80Hz, AMD Instinct M300A, Slingshot-11, TOS S HPE	11,039,616	1,742.00	2,746.38	29,581
2	DOE/SC/Dak Ridge National Laboratory United States	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 44C 2.0Hz, AMD Instinct M250X, Slingshot-11, HPE Cray OS HPE	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607
3	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Computer Blade, Xeon CPU Max 9470 S2C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11 Intel	9,244,128	1,012.00	1,980.01	38,698
4	Microsoft Azure United States	Eagle - Microsoft NDV5, Xeon Platinum 8480C 48C 2.0Hz, NVIDIA H100, NVIDIA InfiniBand NDR Microsoft Azure	2,073,600	561.20	846.84	
5	Eni S.p.A. Italy	HPC6 - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 44C 2.0Hz, AMD Instinct M250X, Slingshot-11, RHEL 8.9	3,143,320	477.90	606.97	8,461

## Les moyens de calculs : Le top 500 <sup>2</sup>

- CEA/Recherche 22ième (17ième)
- Jean Zay/Recherche 27ième (premier classement)
- CINES/Académique 30ième (20ième)
- CEA/Recherche 55ième (36ième)
- IBM Industry 60ième
- CEA (encore) 82ième
- ROMEO/Académique 122ième
- Météo France 115ième

<sup>2</sup>https://www.top500.org/

## Performance Development



## Les moyens de calculs : En France

### GENCI : Grand Equipement National de Calcul Intensif

#### IDRIS: National computing center of the CNRS

### Les moyens de calculs : En France

#### GENCI : Grand Equipement National de Calcul Intensif

- CINES 30ième
- TGCC(CEA) 132ième
- Jean Zay 27ième mais pour du calcul GPU

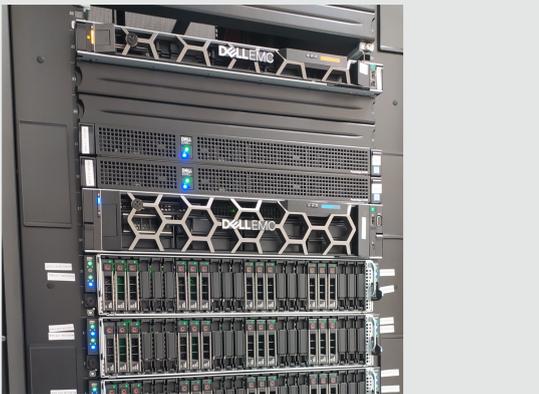
### Les moyens de calculs : En France

#### Les méso centres

Les partenaires

### Les moyens de calculs : En France

#### En Région Centre Val de Loire



### Les moyens de calculs : En France

#### En Région Centre Val de Loire



#### LETO : Démarrage rapide

##### Caractéristiques techniques

	Nœud de calcul	Nœud gpu intel	Nœud gpu amd
Nom	node01 à node16	gpu01 et gpu02	gpu03
Nombre de nœuds	16	2	1
Nombre de cœurs par nœud	128	40	32
Type de processeur	AMD Epyc 7702 à 2GHz	Intel Xeon Gold 6248 2.5GHz	AMD Epyc 7302 3GHz
Carte Graphique	-	4 cartes NVidia Tesla V100 en Nvlink	3 cartes NVidia Tesla V100 en PCIe
Mémoire disponible par nœud (GB)	512	192	256

## Programmation Parallèle ?

### Effectuer beaucoup de calculs en utilisant plusieurs cœurs ou processeurs

- Le principe du parallélisme est simple
  - \* Exécuter en même temps des instructions indépendantes
- La mise en œuvre nécessite de connaître
  - \* Les architectures des machines parallèles
  - \* Les techniques de parallélisation
  - \* Les techniques de programmation

### Introduction à l'algorithmique et la programmation parallèles

- Savoir **paralléliser** un problème en fonction de la cible
- Savoir **mettre en œuvre** en fonction du paradigme de parallélisation

9

25 of 58

02/09/2025 14:10

## Applications d'aide à la décision

### Data-mining

- Gestion d'énormes bases de données
  - Exploration efficace de gros volumes de données Exemples : marketing, bio-informatique ...
- ⇒ **nécessitent de répartir les données**

### Simulations

- phénomènes physiques
  - phénomènes biochimiques  
Exemple : dynamique moléculaire pour la conception de molécules d'intérêt thérapeutique
  - phénomènes environnementaux  
Exemples : météo, inondations, diffusion des pesticides
- ⇒ **nécessitent une grande puissance de calcul**

10

25 of 58

02/09/2025 14:10

02/09/2025 14:10

## Introduction intuitive du parallélisme

### Corrections de copies

- des copies : **les données**
- des exercices constitués de x questions à corriger : **les tâches**
- des enseignants capables tous de corriger **1 question par minute**

11

27 of 58

02/09/2025 14:10

Version séquentielle avec un seul enseignant : quel est le temps total pour corriger 120 copies avec un unique exercice de 5 questions ?

4 bonnes réponses sur 22 répondants

36 000 secondes  
600 min  
600 min  
20h  
600min  
10 heures  
600 unités de temps

voir plus

bonne réponse

600min

27 of 58

02/09/2025 14:10

02/09/2025 14:10

4. Version avec 2 enseignants : Au bout de combien de temps 120 copies avec 1 exercice de 5 questions seront corrigées ?

8 bonnes réponses sur 23 répondants

- 300
- 18 000 secondes
- 300
- 300
- 300min
- 300min et le temps de synchronisation

voir plus  
bonne réponse  
300min

### Introduction intuitive du parallélisme

#### Les principes associés

- le processus
- l'équilibrage de charge, l'accélération et l'efficacité
- le parallélisme de tâches ou de données ?
- la mémoire et les coûts d'accès
- la mémoire partagée ou distribuée

12

5. Attention sur les 120 copies pour 60% (72 copies) 3 questions ont été traitées et pour le reste (40% soit 48 copies) toutes les questions ont été traitées. On a toujours 2 enseignants. Quel est le temps total pour que toutes les copies soient corrigées ?

26 répondants

toujours 300min (5h)	4%	1 vote
$36 \times 3 + 24 \times 5 = 228 \text{ min } (-3h50)$	54%	14 votes
$\max(60 \times 3, 12 \times 3 + 48 \times 5) = 12 \times 3 + 48 \times 5 = 276 \text{ min } (-4h30)$	23%	6 votes
On ne sait pas	0%	0 votes
Ca dépend	19%	5 votes

7. Comment répartir les copies pour s'approcher du meilleur temps ?

10 répondants

Pile commune  
Hash ring Répartir de façon égale dépile  
fait termine 2 Pile Ceux d'une mesure  
fur heure Sharding moins devises  
grosse Donner les tâches 1par1  
Au fur et à mesure

### Les modèles du parallélisme

#### Qu'est ce qui est indépendant ?

- Le parallélisme de contrôle
  - \* Faire plusieurs choses en même temps
- Le parallélisme de données
  - \* Répéter une action sur des données similaires
- Le parallélisme de flux
  - \* Travailler à la chaîne

13

9. Parallélisme de données : Pour 4 enseignants avec les 120 copies contenant 2 exercices respectivement de 5 et 3 questions quel est le temps total pour que toutes les copies soient entièrement corrigées ?

0 bonne réponse sur 1 répondant

320m  
bonne réponse  
240

8. Parallélisme de contrôle : Pour 4 enseignants avec les 120 copies contenant 2 exercices respectivement de 5 et 3 questions quel est le temps total pour que toutes les copies soient entièrement corrigées ?

0 bonne réponse sur 2 répondants

5h  
300min  
bonne réponse  
240

## Introduction intuitive du parallélisme

### Corrections de copies

- des copies : [les données](#)
- des exercices constitués de x questions à corriger : [les tâches](#)
- des enseignants capables tous de corriger **1 question par minute**

### Le stockage des copies

- Initialement les copies sont dans l'amphi et [le transfert](#) coûte 30 min.
- **x** copies peuvent être stockées simultanément dans **un bureau**.
- Les enseignants **partagent ou pas** un même bureau.

14

**12. On peut stocker autant de copies qu'on veut dans un bureau et les enseignants partagent tous le même bureau. Quel est le temps total pour que les 120 copies soient corrigées avec toujours 1 exercice de 5 questions 100% répondues ?** 15 bonnes réponses sur 19 répondants

✘ Pour 2 enseignants 300 min et pour 4 enseignants 150 min.	21%	4 votes
✓ Pour 2 enseignants 330 min et pour 4 enseignants 180 min	79%	15 votes

**13. Un bureau a une capacité de stockage de 10 copies et tous les enseignants partagent le même bureau. Quel est le temps total pour que les 120 copies soient corrigées avec toujours 1 exercice de 5 questions 100% répondues ?** 14 bonnes réponses sur 15 répondants

✘ Pour 2 enseignants 330 min et pour 4 enseignants 210 min.	7%	1 vote
✓ Pour 2 enseignants 660 min et pour 4 enseignants 540 min	93%	14 votes

**14. Un bureau a une capacité de stockage illimitée et tous les enseignants sont dans des bureaux différents. Quel est le temps total pour que les 120 copies soient corrigées avec toujours 1 exercice de 5 questions 100% répondues ?** 11 bonnes réponses sur 11 répondants

✓ Pour 2 enseignants 330 min et pour 4 enseignants 180 min.	55%	6 votes
✓ On obtient le même temps que s'ils étaient dans le même bureau	55%	6 votes

**15. Chaque bureau a une capacité de stockage de 10 copies et tous les enseignants sont dans des bureaux différents. Quel est le temps total pour que les 120 copies soient corrigées avec toujours 1 exercice de 5 questions 100% répondues ?** 5 bonnes réponses sur 5 répondants

✓ Pour 2 enseignants 480 min et pour 4 enseignants 240 min.	100%	5 votes
✘ Pour 2 enseignants 660 min et pour 4 enseignants 510 min	0%	0 votes
✘ Pour 2 enseignants 660 min et pour 4 enseignants 240 min	0%	0 votes

**16. Chaque bureau a une capacité de stockage de 10 copies et tous les enseignants sont dans des bureaux différents. Quel est le temps total pour que les 120 copies soient corrigées avec toujours 1 exercice de 5 questions 100% répondues ?** 0 bonne réponse sur 0 répondant

✘ Pour 8 enseignants 100 min	0%	0 votes
✓ Pour 8 enseignants 135 min	0%	0 votes
✘ Pour 8 enseignants 160 min	0%	0 votes

**17. Si on fait le lien avec l'informatique ?** 22 répondants

- |                       |                             |          |                        |
|-----------------------|-----------------------------|----------|------------------------|
| les données           | <b>1</b> 21 bonnes réponses | <b>C</b> | les copies             |
| les tâches            | <b>2</b> 20 bonnes réponses | <b>D</b> | les exercices          |
| les CPU               | <b>3</b> 20 bonnes réponses | <b>E</b> | les enseignants        |
| la capacité mémoire   | <b>4</b> 18 bonnes réponses | <b>F</b> | les 10 copies          |
| la mémoire partagée   | <b>5</b> 16 bonnes réponses | <b>A</b> | le même bureau         |
| la mémoire distribuée | <b>6</b> 16 bonnes réponses | <b>B</b> | les bureaux différents |

**18. Comment évaluer la performance ?** 0 bonne réponse sur 11 répondants

- Temps
- Optimisation
- Vitesse d'exécution
- Partage
- Lourd
- Rapidité d'exécution
- temps/nombre d'enseignants

voir plus

bonne réponse

Calcul de l'accélération entre le temps avec un enseignant et plusieurs enseignants.

### La performance ?

#### Accélération et efficacité

Les 2 valeurs sont importantes et elles vont permettre de juger de la qualité et de la scalabilité de la parallélisation

⇒ Faire des courbes de performance (benchmarks) en faisant varier

- soit les ressources ( $p$  le nombre d'enseignants).
- soit la taille du problème (le nombre de copies)

$$A = \frac{T_{seq}}{T_{//}} \quad E = \frac{T_{seq}}{p \times T_{//}}$$

21. Quelle est la valeur d'une bonne efficacité ?

0 bonne réponse sur 0 répondant

pas de réponse à cette question

bonne réponse

1

### La classification de Flynn

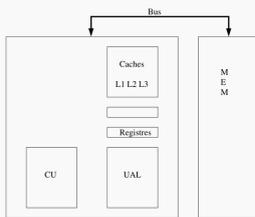
#### En fonction du flot d'instructions et de données

- Single Instruction Single Data (SISD)
- Single Instruction Multiple Data (SIMD)
- Multiple Instruction Multiple Data (MIMD)

### La classification de Flynn

#### En fonction du flot d'instructions et de données

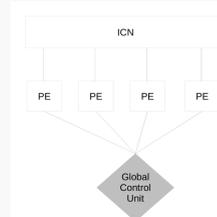
- Single Instruction Single Data (SISD)
- Single Instruction Multiple Data (SIMD)
- Multiple Instruction Multiple Data (MIMD)



### La classification de Flynn

#### En fonction du flot d'instructions et de données

- Single Instruction Single Data (SISD)
- Single Instruction Multiple Data (SIMD)
- Multiple Instruction Multiple Data (MIMD)



### La classification de Flynn

#### En fonction du flot d'instructions et de données

- Single Instruction Single Data (SISD)
- Single Instruction Multiple Data (SIMD)
- **Multiple Instruction Multiple Data (MIMD)**



### L'Inter Connection Network

#### Accès à la mémoire

L'ensemble des mécanismes pour le transfert de données entre processeurs ou entre les processeurs et les modules de mémoire.

#### Espace d'adressage partagé

- Uniform Memory Access (UMA)
- Non Uniform Memory Access (NUMA)
  - \* Cache Coherent NUMA (ccNUMA)
  - \* noCache Coherent (ncNUMA)

#### Espace d'adressage distribué (Message Passing Platform)

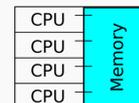
- Chaque processeur a son propre espace d'adressage
- Les échanges sont explicites par envoi/réception.

### Classification simplifiée

- Architecture à mémoire partagée
- Architecture à mémoire distribuée
- Architecture hybride

### Classification simplifiée

- **Architecture à mémoire partagée**
  - \* Tous les processus partagent le même espace mémoire
  - \* Cela semble facile à programmer car on n'a pas à se soucier de ce que chaque processus peut voir
  - \* Cependant il faut gérer dans le code les accès concurrents en mémoire ce qui est complexe (synchronisations)
  - \* En pratique on a de grandes pertes de performances si les données ne sont pas bien gérées, c'est en fait très compliqué
- Architecture à mémoire distribuée
- Architecture hybride



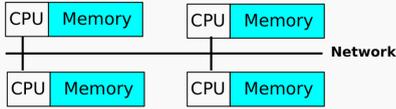
**23. En mémoire partagée une variable V a pour valeur 10. Deux processus exécutent respectivement V=15 et V=3. Quelle est la valeur de V à la fin du programme ?**

19 bonnes réponses sur 20 répondants

10	0%	0 votes
15	0%	0 votes
3	5%	1 vote
✓ On ne peut pas savoir.	95%	19 votes

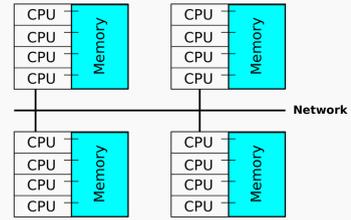
### Classification simplifiée

- Architecture à mémoire partagée
- Architecture à mémoire distribuée
  - \* Chaque processus est indépendant en mémoire
  - \* Il faut gérer la distribution des données aux différents processus
  - \* Il faut éventuellement introduire des communications pour échanger des informations utiles entre processus
  - \* Le travail semble plus important, mais il est en réalité moins complexe dans des programmes de taille importante
- Architecture hybride



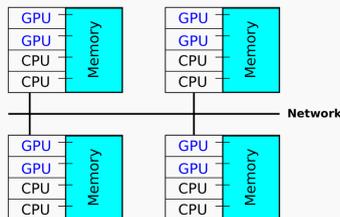
### Classification simplifiée

- Architecture à mémoire partagée
- Architecture à mémoire distribuée
- Architecture hybride
  - \* C'est encore plus compliqué !



### Classification simplifiée

- Architecture à mémoire partagée
- Architecture à mémoire distribuée
- Architecture hybride
  - \* On mélange la programmation sur architecture à mémoire partagée et distribuée !



### Le présent et l'avenir c'est le parallélisme !

#### Comment obtenir plus de puissance ?

- **Machines personnelles** avec plus de processeurs et de cœurs
- **Cluster** : ensemble de machines homogènes et localisées
- **Massively Parallel Processing (MPP)** : Machine spécialisée à mémoire distribuée
- **Grid** : ensemble de ressources hétérogènes et dé-localisées (peut contenir des clusters)
- **Cloud** : un parc de machines, d'équipements de réseau et de logiciels maintenu par un fournisseur, que les consommateurs peuvent utiliser en libre service via un réseau informatique
- ...

## L'algorithme des $k$ -moyennes

### Les entrées

- le nombre de classes  $k$
- un ensemble de  $n$  objets

### Les sorties

- Un ensemble de  $k$  classes d'objets qui minimise le critère des moindres carrés

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} d(p, m_i)^2$$

où  $d(p, m_i)$  est la distance entre les points  $p$  et  $m_i$  le centre de la classe  $C_i$ .

21

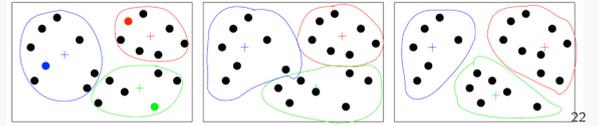
49 of 58

02/09/2025 14:10

## Une application marketing

### Algorithme des $k$ -moyennes

- choisir arbitrairement  $k$  objets comme centres des classes
  - répéter
    - \* affecter chaque objet à la classe dont il est le plus similaire au sens de la distance choisie.
    - \* calculer la valeur moyenne des objets pour chaque classe qui devient le nouveau centre
- jusqu'à convergence



22

49 of 58

02/09/2025 14:10

02/09/2025 14:10

## Données numériques

### Suppositions sur les données

- 6 millions de clients dans la base de données
- un client caractérisé par un tableau de 500 nombres flottants

### Objectif

Partitionner la base de données en 60 classes distinctes à partir desquelles les profils types seront construits.

### Suppositions sur l'algorithme des $k$ -moyennes

- le temps de calcul de la distance entre un profil type et un client nécessite 1000 opérations flottantes
- l'algorithme converge en 200 étapes.

23

51 of 58

02/09/2025 14:10

## Suppositions sur la machine "séquentielle"

### Caractéristiques

- un processeur 1 cœur
  - \* 1 milliard d'opérations sur des nombres flottants par seconde (1 GFlop/s)
- un disque dur
  - \* 3,33 millions de nombres flottants par seconde entre la mémoire vive et le disque dur en lecture et écriture
- la mémoire vive
  - \* 1 milliard de nombres flottants (64bits) en plus du système d'exploitation et de l'application (environ 8 Go)

24

51 of 58

02/09/2025 14:10

02/09/2025 14:10

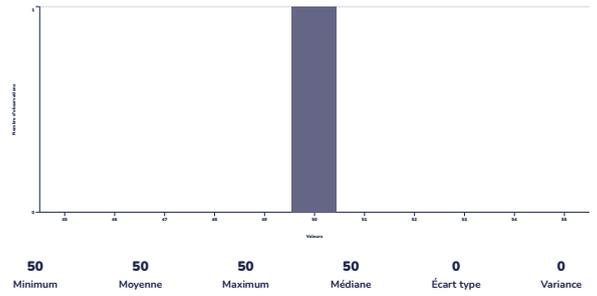
## Suppositions sur la machine "séquentielle"

### Caractéristiques

- FLOPS (Flop/s) : Nombre d'opérations à virgule flottante par seconde
  - FPU Floating-Point Unit
  - LINPACK comme référence
  - nombre de cœurs × fréquence × nombre de cycles pour une opération flottante

24

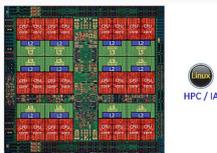
24. Pour charger un tiers de la base de données de clients il faut 300s, quel est le temps additionnel aux 20 heures de calculs pour gérer la mémoire limitée ? 0 bonne réponse sur 1 répondant



## Processeurs multi-cœurs

### Architecture à mémoire partagée

- Les processeurs actuels ont de 2 à 4 cœurs avec la possibilité d'avoir deux processeurs sur la même carte mère
- Ils partagent la mémoire vive
- Un programme classique (en Java, C, ADA, Ocaml) utilise un seul cœur, il faut une programmation spécifique pour qu'un programme utilise plusieurs cœurs



25

25. Pour une architecture à mémoire partagée avec 8 cœurs (les caractéristiques sont celles de la machine séquentielle en terme de mémoire) quel sera le temps complet pour l'algorithme des k-moyennes appliqué à notre exemple marketing ? 14 bonnes réponses sur 18 répondants

- Environ le temps séquentiel (53h) divisé par 8. 11% 2 votes
- Seule la partie calculs est accélérée et donc 33h+20h/8 78% 14 votes
- Seule la partie mémoire est améliorée et donc 20h + 33h/8 11% 2 votes

## Grappe de calculs

### Machine à mémoire distribuée

- Plutôt que d'avoir une machine avec plusieurs cœurs, on considère maintenant plusieurs machines connectées par un réseau
- Chaque processeur a sa propre mémoire qui ne peut être accédée directement par un autre processeur : on parle de machine à mémoire distribuée
- Un exemple : les grappes de PCs

26

## Grappe : Configuration

### Hypothèses

- La grappe est constituée de 8 machines séquentielles (mêmes caractéristiques)
- Le réseau est de type Gigabit Ethernet avec
  - \* une latence pour l'établissement d'une communication de  $4 \times 10^{-5}s$
  - \* un débit pour une communication point-à-point de  $10^7$  float/s.
- Les données initiales se trouvent sur un seul disque.

27

## Parallélisation

### Questions à se poser

- Machine à mémoire partagée :
  - \* comment répartir les calculs ?
  - \* comment limiter ou gérer les accès concurrents aux données
- Machine à mémoire répartie :
  - \* comment répartir les données ?
  - \* comment répartir les calculs ?

28

26. **Pour une architecture à mémoire distribuée avec 8 processeurs, où chaque processeur a les caractéristiques de la machine séquentielle en terme de mémoire que deviennent les 33h de chargement des données ?** 13 bonnes réponses sur 17 répondants

✓ On passe de 33h à 15 min et on a également du temps additionnel dû aux communications	76%	13 votes
On divise les 33h par 8	24%	4 votes
On passe de 33h à 15 min	0%	0 votes