

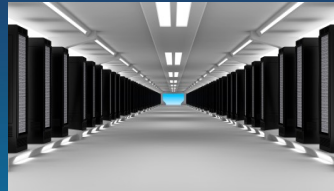
UE Parallélisme / Mif22

Introduction / Applications

Laurent Lefevre
Simon Delamare

(Frédéric Desprez)

INRIA
LIP ENS Lyon
Equipe Avalon



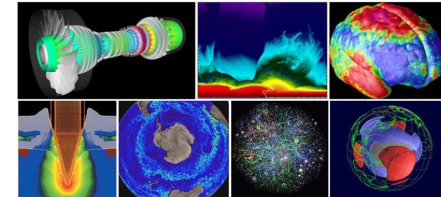
Parallélisme - 2025

- 1

1

Mes coordonnées

Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme (LIP)
Ecole normale supérieure de Lyon



- **Email**

laurent.lefevre@ens-lyon.fr

- **Page Web**

<http://perso.ens-lyon.fr/laurent.lefevre/>

- **Page web du cours:**

http://perso.ens-lyon.fr/laurent.lefevre/M1_parallelisme



Parallélisme - 2025

- 2

2

Format

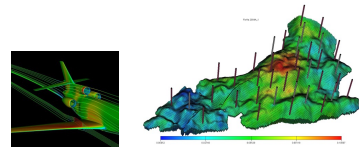
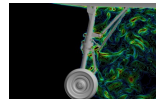
Format de l'UE

- 30 heures en tout
- 9h de CM
- 6h de TD
- 15h de TP

Contrôle continu (2 notes)

- 1 TP rendu
- 1 Projet
-
- Un examen à la fin

- Le programme et calendrier 2025



Parallélisme - 2025

- 3

3

Format

13/2 : CM
20/2 : CM
13/3 : TD
20/3 : TP MPI
10/4 : TP OpenMP
17/4 : TP CUDA
15/5 : CM
5/6 : TD/TP Hybride
12/6 : TP noté

Projet donné le 17/4



Parallélisme - 2025

- 4

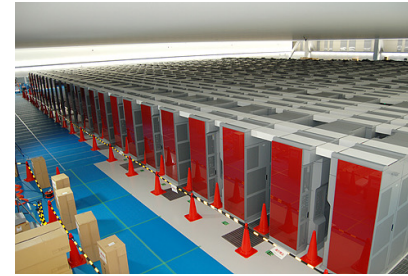
4

INTRODUCTION

6

Pourquoi un cours sur le parallélisme ?

Parce qu'il est partout ! C'est la base du Cloud !



Riken AICS



iPad 2

7

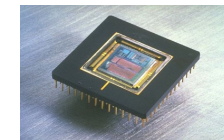
Parce qu'on en a besoin !

- **Résoudre des problèmes plus rapidement**
 - Traiter plus de requêtes à la seconde (exemple Google)
 - Améliorer les temps de réponse des applications interactives
 - IA !
- **Obtenir des meilleurs résultats dans le même temps**
 - Rafiner les modèles (exemple Météo France)
 - Compliquer les modèles (multi-physiques)
- **Traiter des problèmes de plus grande taille**
 - Maillages plus important
 - Données des réseaux de capteurs, des réseaux sociaux, ...
 - Recherche dans les pages web (Google)
 - LHC (CERN) / SKA

8

Pourquoi ne pas accélérer les processeurs séquentiels ?

- **Soit une machine séquentielle à 1 Tflop**
 - Les données doivent aller de la mémoire au CPU (distance r)
 - Pour récupérer une donnée par cycle (10^{12} fois par seconde) à la vitesse de la lumière ($c = 299\,792\,458$ m/s $\approx 3e8$ m/s)
 - Donc $r < c/10^{12} = .3\text{mm}$
- **Il faut mettre 1 Tera-octet de données dans 0.3 mm^2**
 - Chaque mot occupe ≈ 3 Angstroms², soit la taille d'un petit atome
- Impossible à réaliser avec la technologie actuelle
- Attention aussi à la chaleur dégagée par un tel processeur !

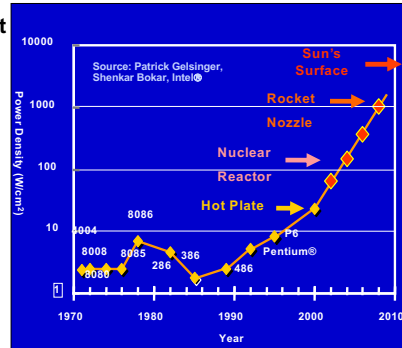


9

Problème de la densité et de la puissance

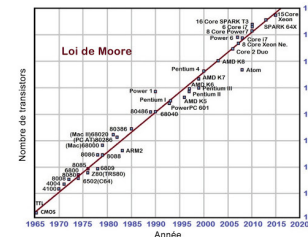
• Les systèmes concurrents sont plus efficaces d'un point de vue énergétique

- La puissance dynamique est proportionnelle à V^2fC
- L'augmentation de la fréquence (f) augmente le voltage (V)
- L'augmentation du nombre de cores augmente la capacité (C) mais linéairement
- Economiser de la puissance en baissant la fréquence
- Les processeurs séquentiels puissants gachent de la puissance électrique
 - Spéculation, vérification de dépendances dynamique
 - Découverte de parallélisme



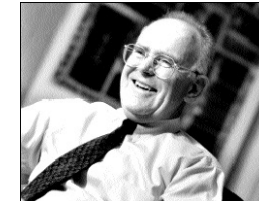
10

Loi de Moore



2X transistors/puce tous les 18 mois
(60% par an d'augmentation)

Les microprocesseurs sont devenus plus denses, plus petits et surtout plus puissants.

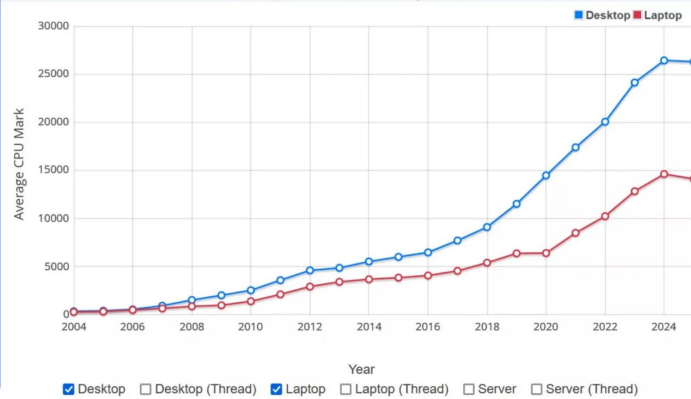


Gordon Moore (co-fondateur d'Intel) a prédit en 1965 que la densité des processeurs doublerait environ tous les 18 mois.

11

Year on Year Performance

Updated 10th of February 2025

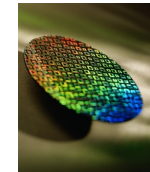


12

Loi de Moore, suite

- En 1965, raisonnement empirique basé sur une relation entre la complexité des circuits et le temps

- Loi qui a perduré à travers les années



• Croissance due à plusieurs facteurs

- Augmentation de la complexité des processeurs (densité en transistors, augmentation de la taille)
- Ajout de fonctionnalités (caches internes, buffers d'instructions plus grands, lancement de plusieurs instructions par cycles, multithreading, profondeur des pipelines, ré-arrangement des instructions)
- Finesse de gravure Gravure des wafers : 10nm, 7nm, 5nm (Taille du virus VIH: 90 nm)... 3nmusine TSMC en 2022



13

Conséquence

- Le seul moyen d'augmenter les performances est l'augmentation du nombre d'unité de traitement travaillant en parallèle
- L'argument du coût des transferts des données tient toujours !
 - Il faut se débrouiller avec le rapport entre le grain de calcul et le grain de communication
 - Faire en sorte que le volume total des calculs dépasse de loin le volume des communications

16

Ecart Processeur-DRAM (latence)

But: trouver des algorithmes qui minimisent les transferts de données, pas forcément les calculs

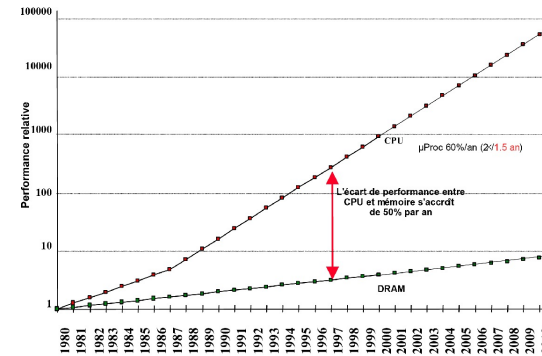


Figure C. Chavet

17

Problème de chargement des données

- La vitesse d'exécution des calculs ne dépend pas uniquement de la vitesse du processeur
- Il faut prendre en compte la vitesse de chargement des données de la mémoire vers le processeur
- La vitesse d'accès mémoire n'a augmenté que de 10% par an
 - Goulot d'étranglement important qui tend à augmenter

Performances du système de mémoire dépendent de la fraction de la mémoire totale qui peut être stockée dans le cache

Meilleures performances pour les unités parallèles car

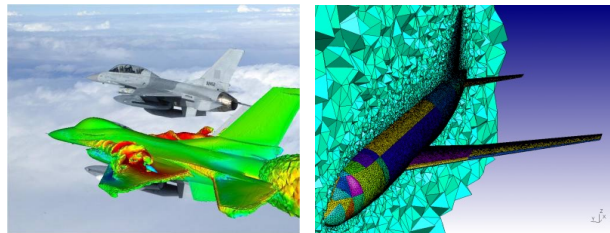
- Caches agrégés plus grands
- Bande-passante agrégée plus importante
- Attention à la localité des données

18

Problème de chargement des données, suite

- Le problème se retrouve sur les grandes architectures distribuées (grilles de calculs, clouds)
- Echelle différente mais problème similaire
- Moyen de communication Internet
 - Exemples:
 - les pages web chargées chez Google pour les recherches
 - Bases de données génomiques pour la bioinformatique

19



APPLICATIONS PARALLÈLES

20

Quelques exemples d'applications parallèles

- **Sans ordinateurs, soit**
 - on étudie les phénomènes sur papier (théorie),
 - on construit un instrument et on effectue des expérimentations.
- **Limitations de cette approche**
 - Trop compliqué
 - Ex: modéliser un Tsunami
 - Trop cher:
 - Ex: test de crash d'avion
 - Trop lent
 - Ex: évolution climatique, évolution des planètes
 - Trop dangereux:
 - Ex: nucléaire, médicaments
- **Utiliser l'informatique pour simuler un phénomène**
 - Se baser sur les lois de la physique et l'utilisation de méthodes numériques

21

Des besoins grandissants

Croissance exponentielle de la puissance de calcul demandée (et acquise)

- La simulation devient le troisième pilier de la science (à côté de la théorie et de l'expérimentation)

Croissance exponentielle des données expérimentales

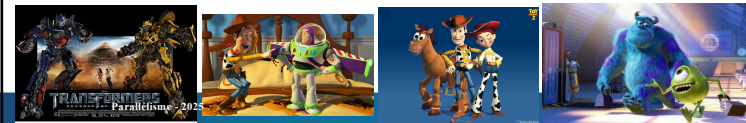
- Amélioration des techniques et technologies en acquisition, analyse, visualisation de données,
- Aspects transports et stockage
- Outils collaboratifs
- Big data
- Capteurs / IoT



22

Exemple : Animation

- Le rendu utilisé pour appliquer des lumières, des textures et des ombres sur des modèles 3D afin de générer des images 2D pour un film
- Utilisation massive du calcul parallèle pour générer le bon nombre d'images pour un film complet (24 images/seconde)
- **Quelques exemples**
 - Pixar, 1995, Toy Story: premier film entièrement généré par ordinateur ("renderfarm" constituée de 100 machines dualprocs) – 1 image nécessite de 45 min à 24h – 300 Mo
 - Pixar, 1999, Toy Story 2: utilisation d'un système à 1400 processeurs pour une meilleure qualité d'image
 - 2001, Monstres et compagnie: 250 serveurs à 14 procs pour un total de 3500 processeurs
 - Transformers 2, Industrial Light and Magic: render farm avec 5700 cores
 - Renderfarm dans le cloud (vSwarm) – ala Boinc
 - 2020 : Changer le visage de Sonic juste avant la diffusion du film en salles



23

Exemple : Animation

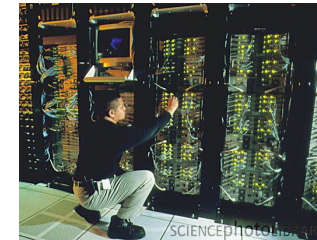
- 2020 : Changer le visage de Sonic après la fin du tournage avant la diffusion du film en salles



24

Bioinformatique

- Augmentation importante des calculs avec l'arrivée massive de séquences d'ADN pour un grand nombre d'organismes, y compris des humains
- Celera corp. : *whole genome shotgun algorithm*
 - Division du génome en petits segments, trouver les séquences ADN des segments expérimentalement, utiliser un ordinateur pour construire la séquence complète en trouvant les zones de recouvrements
 - Nombres de comparaisons énorme
 - Ex Wu Feng video Virginia Tech

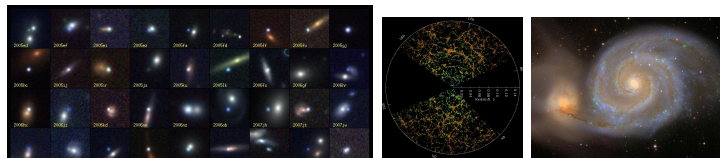


25

Astrophysique

Explorer l'évolution des galaxies, processus thermonucléaires, traiter les données issues des télescopes

- Analyse d'ensembles de données très larges
 - Ensemble de données "Sky surveys"
 - Sloan Digital Sky Surveys, <http://www.sdss.org/>
 - Analyse de ces ensembles de données pour trouver des nouvelles planètes, comprendre l'évolution des galaxies



Credit: The Sloan Digital Sky Survey.

26

Simulation de tremblements de terre

Southern California Earthquake Center ShakeOut Simulation workgroup.
Simulation by Rob Graves, URS/SCEC.



27

Simulation des courants océaniques

Ocean Global Circulation Model for the Earth Simulator
Seasonal Variation of Ocean Temperature

<http://www.vets.ucar.edu/vg/POP/index.shtml>



28

Simulation des courants océaniques, suite

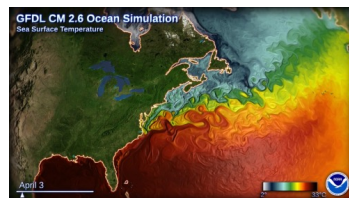
Développement d'un modèle de calcul du flux pour les océans du sud vers le pôle sud

- Océan divisé en 4096 régions Est-Ouest, 1024 régions Nord-Sud, 12 couches en hauteur (50 10^6 cellules 3D)
- Une itération du modèle simule la circulation de l'océan pour 10 minutes: 30 10^9 opérations flottantes
- Pour un an de simulation: 52560 itérations
- Six ans de simulation donne 10^{16} opérations

29

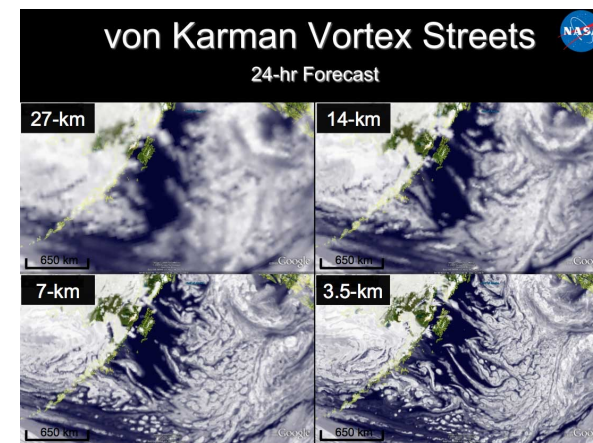
Modéliser le climat

- Calculer
(temperature, pression, humidité, vitesse du vent) = $f(\text{latitude, longitude, hauteur, temps})$
- Approche
 - Discrétiser le domaine (un point de mesure tous les 10 kms)
 - Exécuter un algorithme qui prédit le temps à $t+1$ en fonction du temps à t
- Utilisation
 - La météo
 - Prédire les catastrophes naturelles
 - Evaluer les changements climatiques
 - Compétitions sportives



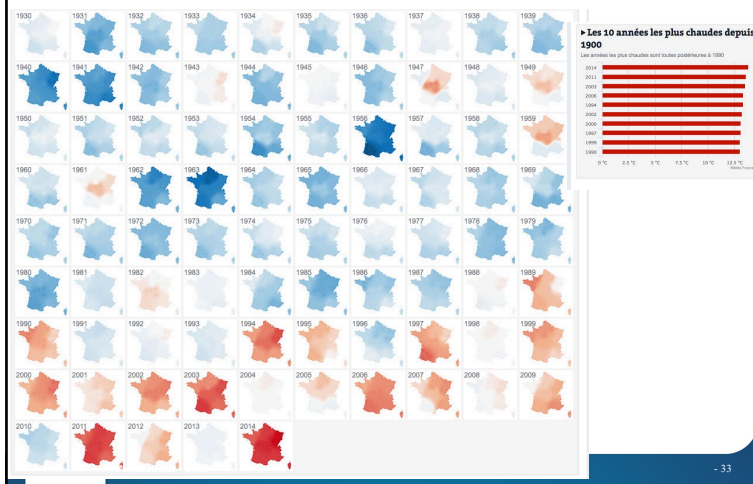
30

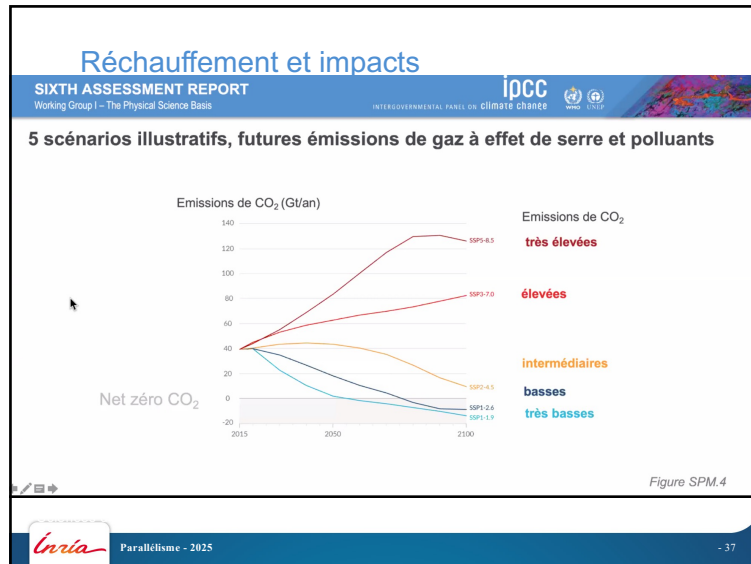
Modéliser le climat, suite



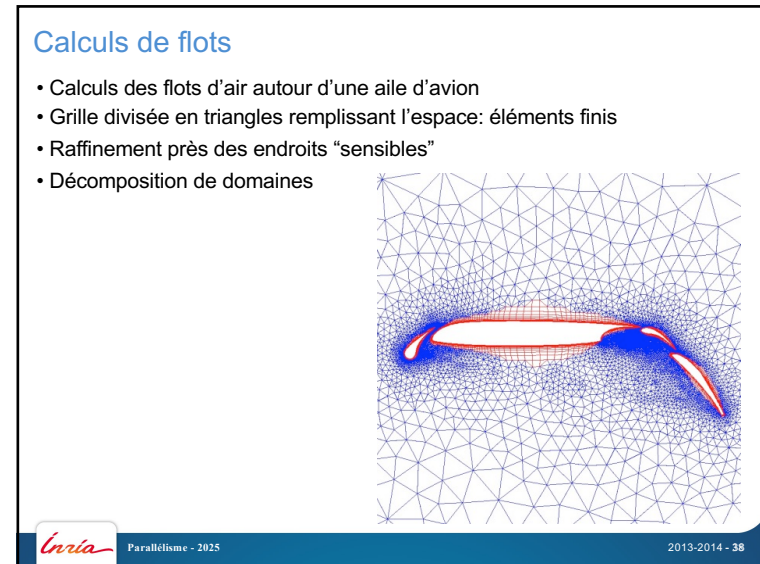
32

Modéliser le climat, France

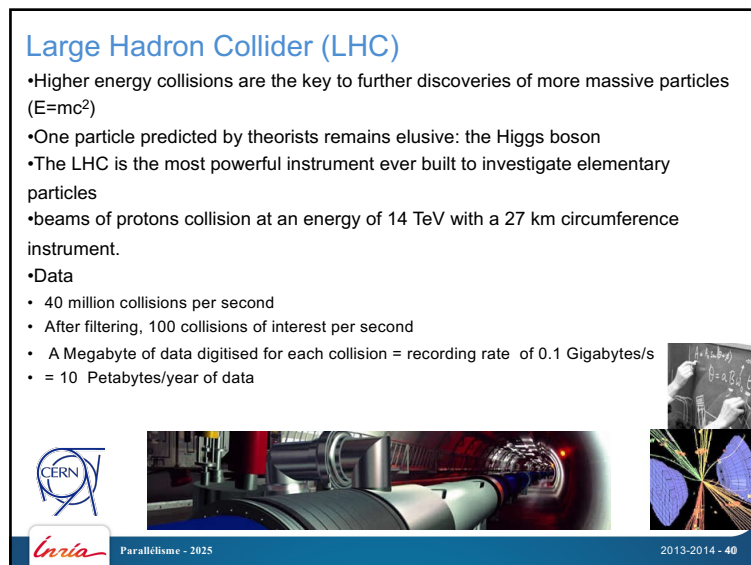




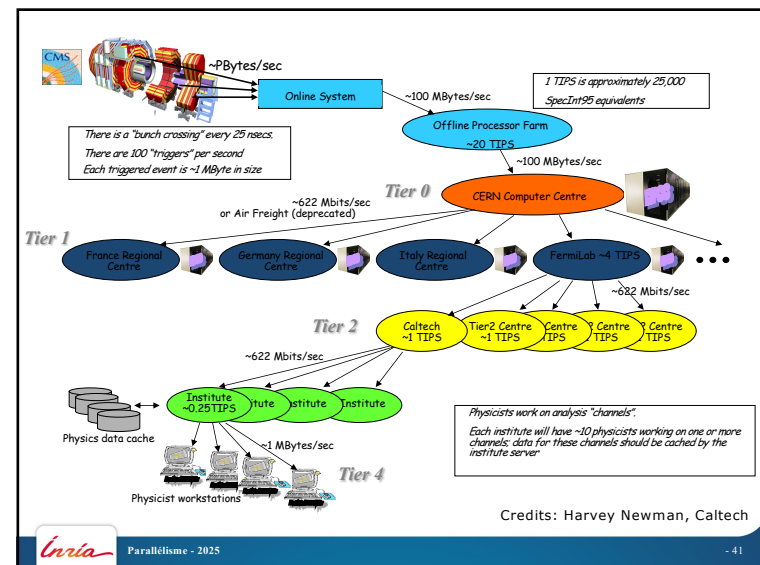
37



38



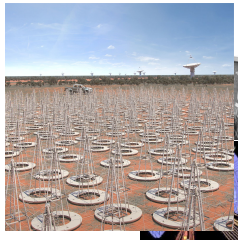
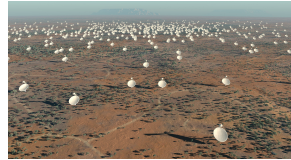
40



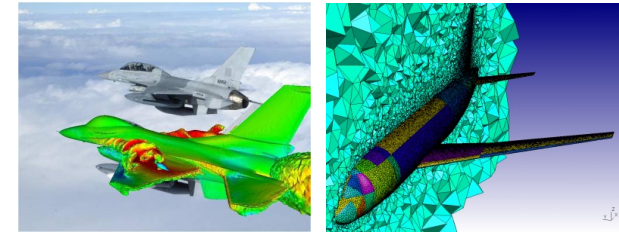
41

SKA : Square Kilometer Array

- Etudier l'espace profond
- Deux sites : Australie et Afrique du sud
- Centres de calcul parallèles associés



42

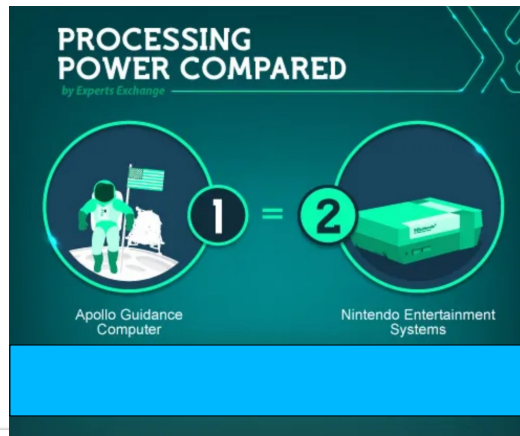


Des plateformes

44

Puissance de calcul/stockage ?

- Qui est le plus fort ? Quel facteur ?

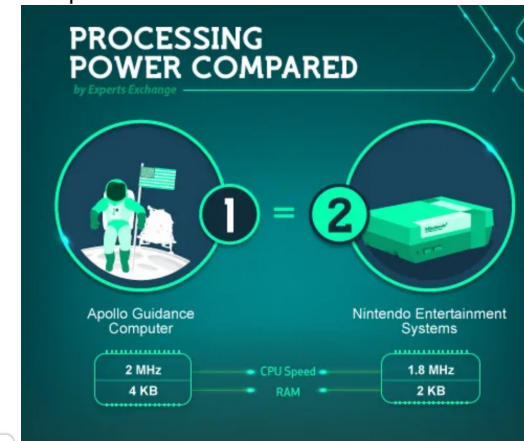


AGC: 1967
Nes : 1985

45

Puissance de calcul/stockage ?

- Qui est le plus fort ?

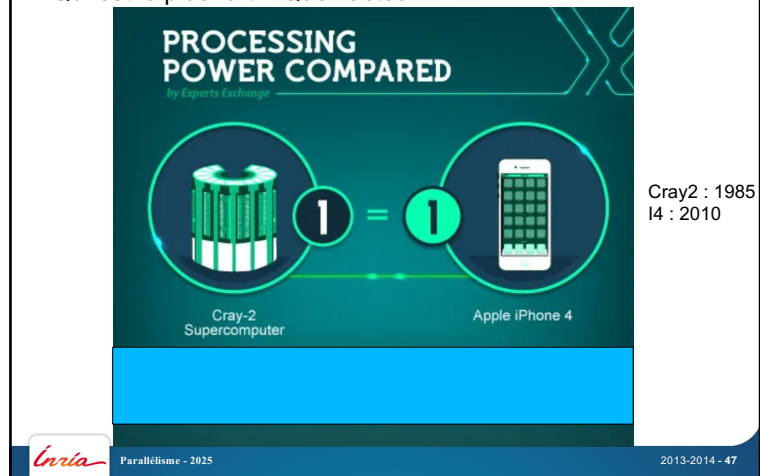


NES : +32K RAM

46

Puissance de calcul/stockage ?

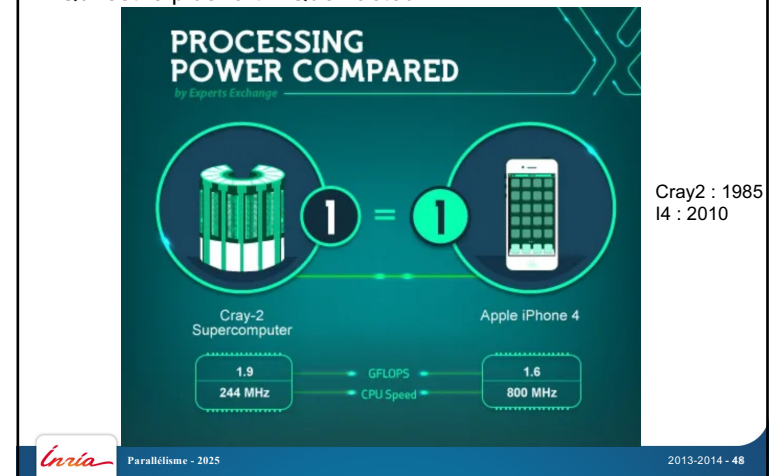
- Qui est le plus fort ? Quel facteur ?



47

Puissance de calcul/stockage ?

- Qui est le plus fort ? Quel facteur ?



48

Unités de mesure des performances : flops ?

• Les unités en HPC

- Flop: floating point operation, généralement double précision
- Flop/s: opérations flottantes par seconde
- Octets: taille des données (8 pour un nombre en double précision)

Comment calcule t'on les flops ?

49

Unités de mesure des performances : flops ?

• Les unités en HPC

- Flop: floating point operation, généralement double précision
- Flop/s: opérations flottantes par seconde
- Octets: taille des données (8 pour un nombre en double précision)

Comment calcule t'on les flops ?

Nombre de coeurs x Fréquence Moyenne x Nombre d'opérations par cycle.

50

Unités de mesure des performances

• Les unités en HPC

- Flop: floating point operation, généralement double précision
- Flop/s: opérations flottantes par seconde
- Octets: taille des données (8 pour un nombre en double précision)

• Des tailles typiques millions, milliards, trillions...

Mega Mflop/s = 10^6 flop/sec Moctet = 2^{20} = 1048576 ~ 10^6 octets

Giga Gflop/s = 10^9 flop/sec Goctet = 2^{30} ~ 10^9 octets

Tera Tflop/s = 10^{12} flop/sec Toctet = 2^{40} ~ 10^{12} octets

Peta Pflop/s = 10^{15} flop/sec Poctet = 2^{50} ~ 10^{15} octets

Exa Eflop/s = 10^{18} flop/sec Eoctet = 2^{60} ~ 10^{18} octets

Zetta Zflop/s = 10^{21} flop/sec Zoctet = 2^{70} ~ 10^{21} octets

Yotta Yflop/s = 10^{24} flop/sec Yoctet = 2^{80} ~ 10^{24} octets

• La machine la plus puissante au monde actuellement ~ 1000 Pflop/s (34 en 2015, 17 en 2013 et 8.7 en 2012)

- Liste mise-à-jour deux fois par an: top500.org



Parallélisme - 2025

2013-2014 - 51

51

From Darpa 2008 to Frontier 2023

Darpa 2008 : 20 MW for an exaflop

Frontier 2023 : 22.7 MW for exaflop



Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703

Top500.org



Parallélisme - 2025

- 52

52

From Darpa 2008 to Frontier 2023

Top500.org

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.40Hz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	4,742,808	585.34	1,059.33	24,687
3	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Microsoft Azure United States	1,123,200	561.20	846.84	
4	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
5	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,752,704	379.70	531.51	7,107
6	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, EVIDEN EuroHPC/CINECA Italy	1,824,768	238.70	304.47	7,404



Parall

- 55

55

From Darpa 2008 to Frontier 2023

Darpa 2008 : 20 MW for an exaflop

Frontier 2022 : 52 Gflops per watt ! (Frontier TDS 62 Gflops/watt)

Green500



8	1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	22,703	52.592
---	---	---	-----------	----------	--------	--------



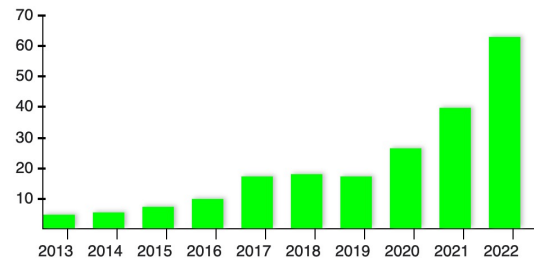
Parallélisme - 2025

- 57

57

From Darpa 2008 to Frontier 2022

Energy efficiency of best of green500



58

From Darpa 2008 to Frontier 2023

	Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Power (kW)	Energy Efficiency (GFlops/watts)
green500	1	293	Henri - ThinkSystem SR670 V2, Intel Xeon Platinum 8362 32C 2.80GHz, NVIDIA H100 80GB PCIe, Infiniband HDR, Lenovo Flatiron Institute United States	8,288	2.88	44	65.396
	2	44	Frontier TDS - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 28Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	120,832	19.20	309	62.684
	3	17	Adastra - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 28Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE Grand Equipement National de Calcul Intensif - Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (GENCI-CINES) France	319,072	46.10	921	58.021
	4	25	Setonix - GPU - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 28Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE Pawsey Supercomputing Centre, Kensington, Western Australia Australia	181,248	27.16	477	56.983

59

From Darpa 2008 to Frontier 2023

Darpa 2008 : 20 MW for an exaflop

Frontier 2022 : 52 Gflops per watt ! (Frontier TDS 62 Gflops per watt)



Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 28Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703

What about Frontier2, Frontier3, ...?

Could we/you reduce energy consumption ?

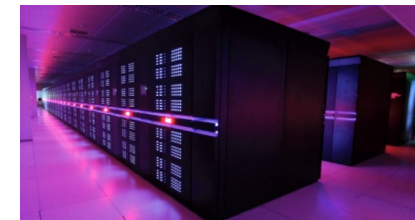
- by a factor of 10 ?
- By a factor of 100 ?
- By a factor of 1000 ?

What about the other impacts ?

63

Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P

- 3,120,000 cores
- 54,902.4 TFlop/s crête
- 33,862.7 TFlop/s obtenus
- 1,024,000 GB de mémoire
- 17,808.00 kW de conso électrique
- Linux comme OS



64

Titan - Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x

- 560640 cores
- Theoretical Peak (Rpeak): 27112.5 TFlop/s
- Linpack Performance (Rmax): 17590.0 TFlop/s
- <http://www.olcf.ornl.gov/titan/>



Parallélisme - 2025

2013-2014 - 65

65

Top500 Novembre 2021

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,440.0	125,712.0	7,438
4	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	Perlmutter - HPE Cray EX235n, AMD EPYC 7763 64C 2.45GHz, NVIDIA A100 SXM4 40 GB, Slingshot-10, HPE DOE/SC/LBNL/NERSC United States	761,856	70,870.0	93,750.0	2,589

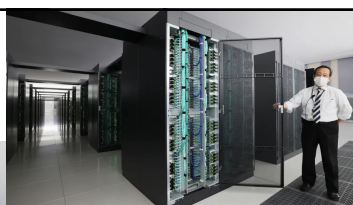
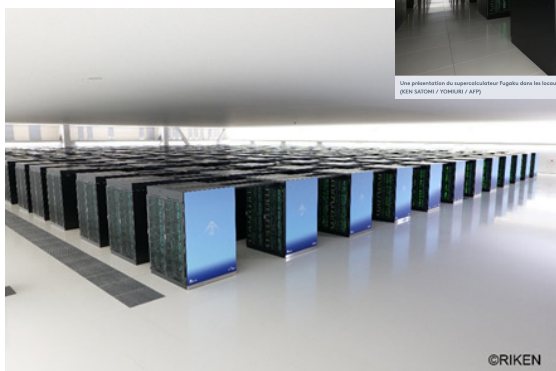
top500.org



- 66

66

Best top500



Une présentation du supercalculateur Fugaku dans les locaux de l'Institut public de recherche Elites, le 16 juin 2020 à Fuku (Japon).
©RIKEN / TOHOKU / AFP

©RIKEN

Fugaku #1 Top500 : 7Mcoeurs – 440 Pflops – 30 MW



Parallélisme - 2025

- 67

67

Green500 Novembre 2021

Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	301	MN-3 - MN-Core Server, Xeon Platinum 8240M 24C 2.4GHz, Preferred Networks MN-Core, MN-Core DirectConnect, Preferred Networks Preferred Networks Japan	1,644	2,181.2	55	39.379
2	291	SSC-21 Scalable Module - Apollo 6500 Gen10 plus, AMD EPYC 7543 32C 2.8GHz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200, HPE Samsung Electronics South Korea	16,704	2,274.1	103	33.983
3	295	Tethys - NVIDIA DGX A100 Liquid Cooled Prototype, AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR, Nvidia NVIDIA Corporation United States	19,840	2,255.0	72	31.538
4	280	Wilkes-3 - PowerEdge XE8545, AMD EPYC 7743 64C 2.45GHz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200 dual rail, DELL EMC University of Cambridge United Kingdom	26,880	2,287.0	74	30.797
5	30	HiPerGator AI - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, Infiniband HDR, Nvidia University of Florida	138,880	17,200.0	583	29.521



Parallélisme - 2025

- 68

68

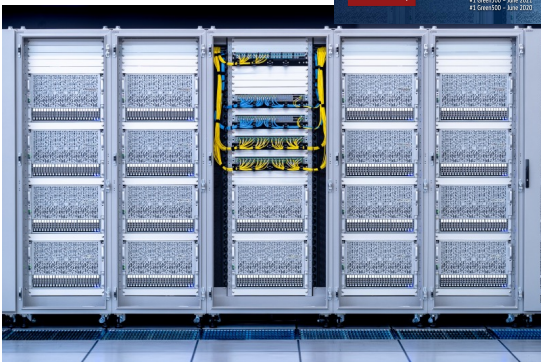
Best green500

#1 on the Green500

Supermicro and Preferred Networks (PN) Collaborate to Develop the World's Most Efficient Supercomputer

Read the Success Story

#1 Green500 - November 2021
#1 Green500 - June 2021
#1 Green500 - June 2020



NM3 #1 Green500 : 1600cœurs – 2 Pflops – 55KW – 39 Gflops/watt



Parallélisme - 2025

- 69

69

Best green500



NM3 #1 Green500 : 1600cœurs – 2 Pflops – 55KW – 39 Gflops/watt

serveur GPU de Supermicro, qui utilise des processeurs Intel® Xeon®, ainsi que des panneaux MN-Core élaborés par Preferred Networks.



Parallélisme - 2025

- 70

70

Une métrique de performance et d'efficacité énergétique: le cas des centres de calcul

Top500 face au Green 500 (Novembre 2021)

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)	Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlop/s/Watt)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 46C 2.20Hz, 160 Interconnect 0.1 Petaflop/Node Center for Computational Science, Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899	1	MN-3 - MN-Core Server, Xeon Platinum 8380M 24C 2.45Hz, Preferred Networks MN-Core, MN-Core DirectConnect, Preferred Networks Preferred Networks Japan	1,644	2,181.2	55	39,379	
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.075Hz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	2,614,892	148,600.0	200,794.9	10,094	2	S50-21 Scalable Module - Apollo 6500 Gen 10 Plus, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200, HPE Samsung Electronics South Korea	14,704	2,274.1	103	33,963	
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.075Hz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438	3	Tethys - NVIDIA DGX A100 Liquid Cooled Prototype, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200, NVIDIA Corporation United States	19,840	2,255.0	72	31,538	
4	Summit Tethys - Summit HPE, Summit SW28010 240C 1.45Hz, Summit, NRCPC National Supercomputing Center in Wuai China	10,649,400	93,014.6	125,435.9	15,371	4	Willow-3 - PowerEdge XE8645, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200 dual rail, DELL EMC University of Cambridge United Kingdom	26,880	2,287.0	74	30,797	
5	Perlmutter - HPE Cray EX225A, AMD EPYC 7742 32C 2.45Hz, NVIDIA A100 SXM4 40 GB, Singport-10, HPE ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	761,856	70,870.0	93,700.0	2,589	5	HiPerSuter AI - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100, Infiniband HDR200, Nvidia University of Florida	138,880	17,200.0	583	29,521	



Parallélisme - 2025

- 71

71

Une métrique de performance et d'efficacité énergétique: le cas des centres de calcul

Top500 face au Green 500 (Novembre 2021)

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)	Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlop/s/Watt)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 46C 2.20Hz, 160 Interconnect 0.1 Petaflop/Node Center for Computational Science, Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899	1	MN-3 - MN-Core Server, Xeon Platinum 8380M 24C 2.45Hz, Preferred Networks MN-Core, MN-Core DirectConnect, Preferred Networks Preferred Networks Japan	1,644	2,181.2	55	39,379	
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.075Hz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	2,614,892	148,600.0	200,794.9	10,094	2	S50-21 Scalable Module - Apollo 6500 Gen 10 Plus, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200, HPE Samsung Electronics South Korea	14,704	2,274.1	103	33,963	
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.075Hz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438	3	Tethys - NVIDIA DGX A100 Liquid Cooled Prototype, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200 dual rail, DELL EMC University of Cambridge United Kingdom	19,840	2,255.0	72	31,538	
4	Summit Tethys - Summit HPE, Summit SW28010 240C 1.45Hz, Summit, NRCPC National Supercomputing Center in Wuai China	10,649,400	93,014.6	125,435.9	15,371	4	Willow-3 - PowerEdge XE8645, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100 80GB, Infiniband HDR200 dual rail, DELL EMC University of Cambridge United Kingdom	26,880	2,287.0	74	30,797	
5	Perlmutter - HPE Cray EX225A, AMD EPYC 7742 32C 2.45Hz, NVIDIA A100 SXM4 40 GB, Singport-10, HPE ORNL/DOE Center for Computational Science, United States	761,856	70,870.0	93,700.0	2,589	5	HiPerSuter AI - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 32C 2.80Hz, NVIDIA A100, Infiniband HDR200, Nvidia University of Florida	138,880	17,200.0	583	29,521	

« Soutenable » : 20 MW pour une machine exascale – Quelle efficacité doit on obtenir ?



Parallélisme - 2025

- 72

72

TOP 500 Novembre 2020

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.20Hz, Tofu interconnect 0, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.67GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	96,640.0	125,712.0	7,438
4	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	Selene - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 44C 2.25GHz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia NVIDIA Corporation United States	555,520	63,440.0	79,215.0	2,646
6	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon ES-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
7	JUWELS Booster Module - Bull Sequana XH2000, AMD EPYC 7002 24C 2.8GHz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband/ParTec ParaStation ClusterSuite, Alos Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	449,280	46,120.0	70,980.0	1,764
8	HPCs - PowerEdge C4140, Xeon Gold 6252 24C 2.1GHz, NVIDIA Tesla V100, Mellanox HDR Infiniband, Dell EMC Ex S.p.A. Italy	669,760	35,450.0	51,720.8	2,252

73

TOP 500 Novembre 2019

Rank	Site	System	Cores	TFlop/s	(TFlop/s)	(kW)
1	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
2	DOE/NNSA/LLNL United States	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM / NVIDIA / Mellanox	1,572,480	96,640.0	125,712.0	7,438
3	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon ES-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 NUOT	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	Frontiera - Dell C6420, Xeon Platinum 8280 28C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand HDR Dell EMC	448,448	23,514.6	38,745.9	
6	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon ES-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100 Cray/HPE	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
7	DOE/NNSA/LLNL/SL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon ES-2698v3 14C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7208 48C 1.4GHz, Aries interconnect Cray/HPE	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
8	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR Fujitsu	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649
9	Leibniz Rechenzentrum Germany	SuperMUC-NG - ThinkSystem SD450, Xeon Platinum 8174 24C 2.1GHz, Intel Omni-Path	305,856	19,476.6	26,873.9	

74

TOP 500 Novembre 2018

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,397,824	143,500.0	200,794.9	9,783
2	Sierra - IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	96,640.0	125,712.0	7,438
3	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon ES-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Piz Daint - Cray XC50, Xeon ES-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100, Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
6	Trinity - Cray XC40, Xeon ES-2698v3 14C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 48C 1.4GHz, Aries interconnect, Cray Inc. DOE/NNSA/LLNL/SL United States	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
7	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR, Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649
8	SuperMUC-NG - ThinkSystem SD530, Xeon Platinum 8174 24C 3.1GHz, Intel Omni-Path, Lenovo Leibniz Rechenzentrum Germany	305,856	19,476.6	26,873.9	

75

TOP 500 Novembre 2017

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
2	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon ES-2692 12C 2.2GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 3151P NUOT	3,120,000	33,962.7	54,902.4	17,808
3	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon ES-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100 Cray Inc.	361,760	19,590.0	25,326.3	2,272
4	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan	Oyukou - ZettaScaler-2.2 HPC system, Xeon D-1571 16C 1.3GHz, Infiniband EDR, PEZZ-SC2 700MHz ExaScaler	19,860,000	19,135.8	28,192.0	1,350
5	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.2GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K80s Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
6	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power 7C 16C 1.48 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
7	DOE/NNSA/LLNL/SL United States	Trinity - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 48C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	979,768	14,137.3	43,902.6	3,864
8	DOE/SC/LLNL/NERSC United States	Cori - Cray XC40, Intel Xeon Phi 622C 36C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939
9	Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	Oakforest-PACS - PRIMERGY CX140 M1, Intel Xeon Phi 7250 48C 1.4GHz, Intel Omni-Path Fujitsu	556,104	13,554.6	24,913.5	2,719

76

TOP 500 Novembre 2016

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.450Hz, Sunway NRPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
2	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2 (MikyoWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 3151P	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
3	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x, Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
4	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
5	DOE/SC/BNL/NERSC United States	Carl - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.40Hz, Aries interconnect, Cray Inc.	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939
6	Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	Oakforest-PACS - PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.40Hz, Intel Geni-Path	556,104	13,554.6	24,913.5	2,719
7	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 Villix 2.00Hz, Tofu interconnect, Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,640
8	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.60Hz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100, Cray Inc.	204,720	9,779.0	15,980.0	1,312
9	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
10	DOE/NNSA/LANL/SNL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2690v3 16C 2.30Hz, Aries interconnect, Cray Inc.	301,056	8,100.9	11,078.9	4,233

77

TOP 500 Novembre 2015

RANK	SITE	SYSTEM	CORES	RMAX (TFLOP/S)	RPEAK (TFLOP/S)	POWER (KW)
1	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2 (MikyoWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 3151P, NUOT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
2	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x, Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
3	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
4	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 Villix 2.00Hz, Tofu interconnect, Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,640
5	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
6	DOE/NNSA/LANL/SNL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2690v3 16C 2.30Hz, Aries interconnect, Cray Inc.	301,056	8,100.9	11,078.9	
7	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz, Aries interconnect, NVIDIA K20x, Cray Inc.	115,984	6,271.0	7,788.9	2,325
8	HLRS - Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart Germany	Hazel Hen - Cray XC40, Xeon E5-2680v3 12C 2.50Hz, Aries interconnect, Cray Inc.	185,088	5,640.2	7,403.5	
9	King Abdullah University of Science and Technology Saudi Arabia	Shahreen II - Cray XC40, Xeon E5-2690v3 16C 2.30Hz, Aries interconnect, Cray Inc.	196,608	5,537.0	7,235.2	2,834
10	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	Stampede - PowerEdge C820, Xeon E5-2680 8C 2.700GHz, Infiniband FDR, Intel Xeon Phi SE10P, Dell	442,442	5,168.1	6,520.1	4,510

78

Green 500.org Novembre 2020

Challenge
Exascale
soutenable

Rank	Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	170	NVIDIA DGX SuperPOD - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 64C 2.250Hz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia Corporation United States	19,840	2,354.0	90	26.195
2	330	HN-3 - MN-Core Server, Xeon Platinum 8260M 24C 2.40Hz, Preferred Networks MN-Core, MN-Core DirectConnect, Preferred Networks Japan	1,664	1,652.9	45	26.039
3	7	JUWELS Booster Module - Bull Sequana XH2000, AMD EPYC 7402 24C 2.80Hz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband/PortX ParsiStation Cluster/Suite, Alos Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	449,280	44,120.0	1,764	25.008
4	146	Spartan2 - Bull Sequana XH2000, AMD EPYC 7402 24C 2.80Hz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Alos France	23,040	2,566.0	106	24.262
5	5	Selene - NVIDIA DGX A100, AMD EPYC 7742 64C 2.250Hz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia Corporation United States	555,320	63,440.0	2,444	23.983
6	239	A64FX prototype - Fujitsu A64FX, Fujitsu A64FX 48C 20Hz, Tofu interconnect D, Fujitsu Fujitsu Numazu Plant Japan	36,864	1,999.5	118	16.876
7	29	AIMOS - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.10Hz, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Tesla V100, IBM Barcelona Supercomputing Center Spain	130,000	8,339.0	512	16.285

79

Green 500.org Novembre 2019

Rank	Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	159	A64FX prototype - Fujitsu A64FX, Fujitsu A64FX 48C 20Hz, Tofu interconnect D, Fujitsu Fujitsu Numazu Plant Japan	36,864	1,999.5	118	16.876
2	420	NA-1 - ZettaScaler-2.2, Xeon D-1571 16C 1.30Hz, Infiniband EDR, PEZY-SC2 700Mhz, PEZY Computing / Exascale Inc. PEZY Computing K.K. Japan	1,271,040	1,303.2	80	16.256
3	24	AIMOS - IBM Power System AC922, IBM POWER9 20C 3.450Hz, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Volta GV100, IBM Rensselaer Polytechnic Institute Center for Computational Innovations (CCI) United States	130,000	8,045.0	510	15.771
4	373	Satori - IBM Power System AC922, IBM POWER9 20C 2.40Hz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla V100 SXM2, IBM MIT/MGH-IPCC Holyoke, MA United States	23,040	1,464.0	94	15.574
5	1	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.070Hz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	10,096	14.719
6	8	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.40Hz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR, Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	1,649	14.423
7	494	MareNostrum P9 CTE - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.10Hz, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Tesla V100, IBM Barcelona Supercomputing Center Spain	18,360	1,145.0	81	14.131

80

Green 500.org Novembre 2018

Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	375	Shoubu system B - ZettaScaler-2.2, Xeon D-1571 16C 1.30Hz, Infiniband EDR, PEZY-SC2, PEZY Computing / Exascaler Inc. Advanced Center for Computing and Communication, RIKEN Japan	953,280	1,063.3	60	17.604
2	374	DBX SaturnV Volta - NVIDIA DGX-1 Volta36, Xeon E5-2698v4 20C 2.2GHz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla V100, Nvidia NVIDIA Corporation United States	22,440	1,070.0	97	15.113
3	1	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,397,924	143,500.0	9,783	14.668
4	7	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR, Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	1,647	14.423
5	22	TSUBAME3.0 - SGI ICE XA, IP139-SXM2, Xeon E5-2680v4 14C 2.4GHz, Intel Omni-Path, NVIDIA Tesla P100 SXM2, HPE GSIC Center, Tokyo Institute of Technology Japan	135,828	8,125.0	792	13.704
6	2	Sierra - IBM Power System 5922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LNL United States	1,572,480	94,640.0	7,438	12.723
7	446	AIST AI Cloud - NEC 4U-80PU Server, Xeon E5-2630Lv4 10C 1.80Hz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla P100 SXM2, NEC National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Japan	23,400	961.0	76	12.681

81

Green500.org – Novembre 2017

Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	259	Shoubu system B - ZettaScaler-2.2, Xeon D-1571 16C 1.30Hz, Infiniband EDR, PEZY-SC2, PEZY Computing / Exascaler Inc. Advanced Center for Computing and Communication, RIKEN Japan	794,400	842.0	50	17.009
2	307	Suizen2 - ZettaScaler-2.2, Xeon D-1571 16C 1.30Hz, Infiniband EDR, PEZY-SC2, PEZY Computing / Exascaler Inc. High Energy Accelerator Research Organization KEK Japan	762,624	788.2	47	16.759
3	276	Sakura - ZettaScaler-2.2, Xeon E5-2618Lv3 8C 2.3GHz, Infiniband EDR, PEZY-SC2, PEZY Computing / Exascaler Inc. PEZY Computing K.K. Japan	794,400	824.7	50	16.657
4	149	DBX SaturnV Volta - NVIDIA DGX-1 Volta36, Xeon E5-2698v4 20C 2.2GHz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla V100, Nvidia NVIDIA Corporation United States	22,440	1,070.0	97	15.113
5	4	Gyrfax - ZettaScaler-2.2 HPC system, Xeon D-1571 16C 1.30Hz, Infiniband EDR, PEZY-SC2 700Mhz, ExaScaler Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan	19,860,000	19,135.8	1,350	14.173
6	13	TSUBAME3.0 - SGI ICE XA, IP139-SXM2, Xeon E5-2680v4 14C 2.4GHz, Intel Omni-Path, NVIDIA Tesla P100 SXM2, HPE GSIC Center, Tokyo Institute of Technology Japan	135,828	8,125.0	792	13.704
7	195	AIST AI Cloud - NEC 4U-80PU Server, Xeon E5-2630Lv4 10C 1.80Hz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla P100 SXM2, NEC National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Japan	23,400	961.0	76	12.681
8	419	RAIDEN GPU subsystem - NVIDIA DGX-1, Xeon 11,712 635.1 60 10.603	11,712	635.1	60	10.603

82

Green500.org – Novembre 2016

Green500 Rank	MFLOPS/W	Site	System	Total Power (kW)
1	9462.1	NVIDIA Corporation	NVIDIA DGX-1, Xeon E5-2698v4 20C 2.2GHz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla P100	349.5
2	7453.5	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS)	Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.40GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100	1312
3	6673.8	Advanced Center for Computing and Communication, RIKEN	ZettaScaler-1.6, Xeon E5-2618Lv3 8C 2.3GHz, Infiniband FDR, PEZY-SCnp	150.0
4	6051.3	National Supercomputing Center in Wuxi	Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.450GHz, Sunway	15371
5	5806.3	Fujitsu Technology Solutions GmbH	PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7210 64C 1.3GHz, Intel Omni-Path	77
6	4985.7	Joint Center for Advanced High Performance Computing	PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Intel Omni-Path	2718.7
7	4688.0	DOE/SC/Argonne National Laboratory	Cray XC40, Intel Xeon Phi 7230 64C 1.30GHz, Aries interconnect	1087
8	4112.1	Stanford Research Computing Center	Cray CS-Storm, Intel Xeon E5-2680v2 10C 2.8GHz, Infiniband FDR, Nvidia K80	190
9	4086.8	Academic Center for Computing and Media Studies (ACCMS), Kyoto University	Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.40Hz, Aries interconnect	748.1
10	3836.6	Thomas Jefferson National Accelerator Facility	KOI Cluster, Intel Xeon Phi 7230 64C 1.30GHz, Intel Omni-Path	111

83

Green500.org – Novembre 2015

Green500 Rank	MFLOPS/W	Site*	Computer*	Total Power (kW)
1	7,031.58	Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)	Shoubu - ExaScaler-1.4 80Brick, Xeon E5-2618Lv3 8C 2.3GHz, Infiniband FDR, PEZY-SC	50.32
2	5,331.79	GSIC Center, Tokyo Institute of Technology	TSUBAME-KFC/DL - LX 1U-4GPU/104Re-1G Cluster, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.1GHz, Infiniband FDR, NVIDIA Tesla K80	51.13
3	5,271.81	GSI Helmholtz Center	ASUS ESC4000 FDR/G2S, Intel Xeon E5-2690v2 10C 3GHz, Infiniband FDR, AMD FirePro S9150	57.15
4	4,778.46	Institute of Modern Physics (IMP), Chinese Academy of Sciences	Sugon Cluster W780L, Xeon E5-2640v3 8C 2.8GHz, Infiniband QDR, NVIDIA Tesla K80	65.00
5	4,112.11	Stanford Research Computing Center	XStream - Cray CS-Storm, Intel Xeon E5-2680v2 10C 2.8GHz, Infiniband FDR, Nvidia K80	190.00
6	3,856.90	IT Company	Inspur TS10000 HPC Server, Xeon E5-2620v3 6C 2.4GHz, 10G Ethernet, NVIDIA Tesla K40	58.00
7	3,775.45	Internet Service	Inspur TS10000 HPC Server, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.1GHz, 10G Ethernet, NVIDIA Tesla K40	110.00
8	3,775.45	Internet Service	Inspur TS10000 HPC Server, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.1GHz, 10G Ethernet, NVIDIA Tesla K40	110.00
9	3,775.45	Internet Service	Inspur TS10000 HPC Server, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.1GHz, 10G Ethernet, NVIDIA Tesla K40	110.00
10	3,775.45	Internet Service	Inspur TS10000 HPC Server, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.1GHz, 10G Ethernet, NVIDIA Tesla K40	110.00

84

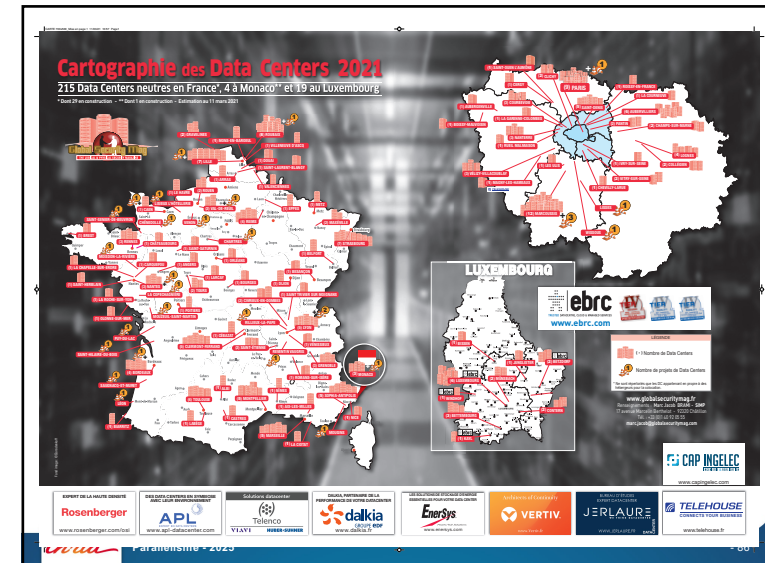
Les datacentres

Currently there are **3880** colocation data centers from **117** countries in the index.
Please navigate through the data center index by choosing a country.

Algeria (1)	Guernsey (3)	Pakistan (15)
Angola (2)	Hong Kong (47)	Palestine (1)
Argentina (12)	Hungary (8)	Panama (5)
Australia (98)	Iceland (5)	Paraguay (1)
Austria (19)	India (106)	Peru (1)
Azerbaijan (1)	Indonesia (38)	Philippines (2)
Bahrain (2)	Iran (17)	Poland (33)
Bangladesh (2)	Ireland (19)	Portugal (26)
Belarus (2)	Isle Of Man (3)	Puerto Rico (1)
Belgium (30)	Israel (6)	Qatar (3)
Bermuda (1)	Italy (51)	Romania (42)
Bolivia (2)	Japan (40)	Russia (46)
Brazil (34)	Jersey (5)	Saudi Arabia (17)
Bulgaria (21)	Jordan (5)	Serbia (3)
Cambodia (3)	Kazakhstan (1)	Singapore (23)
Canada (148)	Kenya (3)	Slovakia (14)
Cayman Islands (2)	Kuwait (2)	Slovenia (7)
Chile (9)	Latvia (17)	South Africa (19)
China (74)	Lebanon (1)	South Korea (12)
Colombia (6)	Libya (1)	Spain (56)
Costa Rica (7)	Liechtenstein (2)	Suriname (2)
Croatia (4)	Lithuania (8)	Sweden (47)
Cyprus (12)	Luxembourg (14)	Switzerland (69)
Czech Republic (24)	Macao (1)	Taiwan (5)
Denmark (29)	Macedonia (3)	Tanzania (1)
Dr Congo (1)	Malaysia (28)	Thailand (14)
Ecuador (1)	Malta (8)	The Bahamas (2)
Egypt (12)	Mauritius (7)	The Netherlands (87)
Estonia (7)	Mexico (11)	Trinidad And Tobago (1)
Finland (16)	Moldova (1)	Tunisia (1)
France (139)	Montenegro (2)	Turkey (40)
French Polynesia (1)	Morocco (5)	Ukraine (30)
Germany (175)	Nepal (5)	United Arab Emirates (8)
Ghana (1)	Netherlands Antilles (1)	United Kingdom (232)
Gibraltar (4)	New Caledonia (1)	Uruguay (7)
Greece (13)	New Zealand (25)	Us Virgin Islands (1)
Greenland (1)	Nicaragua (1)	USA (1545)
Guatemala (1)	Nigeria (5)	Venezuela (2)
Guernsey (3)	Norway (27)	Vietnam (6)

Parallélisme - 2025

- 85



Plus gros datacentre

[China Telecom- Inner Mongolia Information Park](#)

1.2 millions de serveurs
3 Milliards \$
150 MW

Parallélisme - 2025

- 87

Datacentres : Google exemple de rêve

Google :

1M servers ?

15 datacentres ?

PUE (Power Usage Effectiveness): 1.06 ?

Mais 95% des datacentres ont moins de 200 serveurs

Parallélisme - 2025

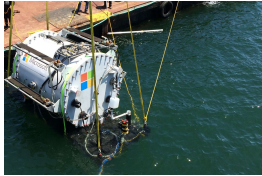
- 88



Double vague dans les datacentres

On regroupe / on distribue !



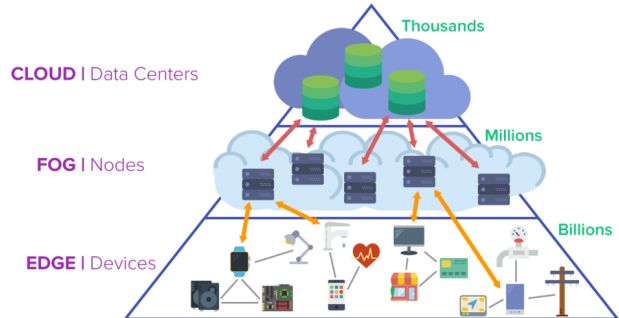


Nouveauté : Edge et Fog !

Inria Parallélisme - 2025 - 89

89

Transition numérique -> empilement numérique



CLOUD | Data Centers (Thousands)

FOG | Nodes (Millions)

EDGE | Devices (Billions)

Inria Parallélisme - 2025 - 90

90



QU'EST-CE QUE LE PARALLÉLISME ?

Inria Parallélisme - 2025 - 91

91

Qu'est-ce que le calcul parallèle ?

Pouvoir accélérer une application en

1. Divisant cette applications en sous-tâches
2. Exécuter ces sous-tâches en parallèles sur des unités différentes

Pour réussir, il faut être capable de

1. Trouver le parallélisme dans l'application
2. Trouver le bon grain de calcul/échange de données
3. Avoir des connaissances pour concevoir une solution efficace sur la machine cible

Inria Parallélisme - 2025 - 92

92

Clarifications

- **Le parallélisme est utilisé partout**

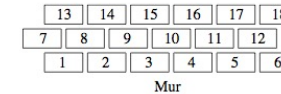
- Recouvrement d'E/S sur un processeur
- Chargement et préparation d'instructions suivantes avec l'exécution d'instructions courantes dans un processeur
- Utilisation d'unités différentes (unités arithmétiques entière et flottante, unités flottantes multiples, unités pour le traitement graphiques, ...)
- Multitasking, recouvrement de chargement de pages mémoire et calcul

- Dans ce cours, on va regarder le parallélisme en général (modèles, architecture, algorithmique) avec un focus plus important sur l'utilisation d'unités différentes (processeurs, core) pour le calcul

93

Un aperçu du parallélisme

- Travail d'un maçon montant un mur de briques

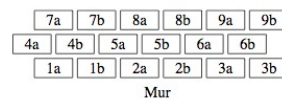


- Seul il procède par rangées
 - Lent ! → séquentiel

94

Un aperçu du parallélisme

- Travail de deux maçons (a et b) montant un mur de briques

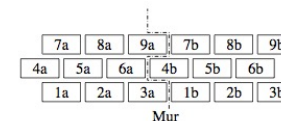


- Une brique après l'autre
 - Ils se gênent pour prendre les briques et pour les mettre en place

95

Un aperçu du parallélisme

- Travail de deux maçons (a et b) montant un mur de briques



- Chacun s'attribue une portion de mur pour travailler
- Plus efficace mais
 - b a plus de chemin à faire pour récupérer les briques
 - Ils se gênent pour prendre les briques
- Variantes
 - a travaille de droite à gauche, b commence plus vite mais pbs de synchronisation
 - a lance les briques à b quand il en prend une pour lui

96

Un aperçu du parallélisme, suite

• Quelques réflexions sur l'exemple

- Plus efficace que le travail d'un seul maçon mais
- Plus de travail en général car organisation entre les maçons

• En général

- Pour avoir une application parallèle, il faut que l'application soit décomposable en sous-problèmes suffisamment indépendants
- Il faut pouvoir organiser le travail à répartir.
- Surcoût dû à la répartition du travail (transmission des briques)
- Trouver le meilleur algorithme parallèle ...
- Pas forcément celui qui est le plus efficace en séquentiel !

97

Qu'espère-t-on ?

Avoir un bon **speed-up** ! Facteur d'accélération

- Idéalement, on espère avoir une accélération de p sur p processeurs !

Malheureusement, c'est rarement le cas (gain inférieur à p)

- Parties séquentielles d'un algorithme
- Problèmes de surcoût (*overhead*) dus à des calculs redonnants, les coûts de transfert de données (mémoire, disque, réseau)

Parfois le gain est supérieur à p

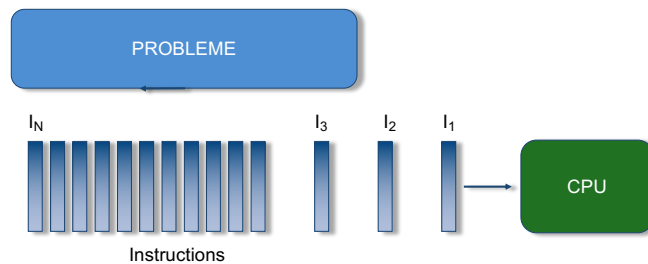
- Appelé speed-up superlinéaire
- Grâce à des différences de vitesse mémoire (mémoire vive vs caches), moins de calcul grâce au parallélisme (recherche dans des arbres)
- Applications pour lesquelles l'exécution sur un processeur est impossible (durée infinie d'exécution)

98

Retour aux ordinateurs

• Les programmes sont généralement conçus pour s'exécuter sur des processeurs séquentiels

- Unité centrale (CPU) unique
- Application découpée en suite d'instructions exécutées l'une après l'autre
- Une seule instruction s'exécute à un instant donné

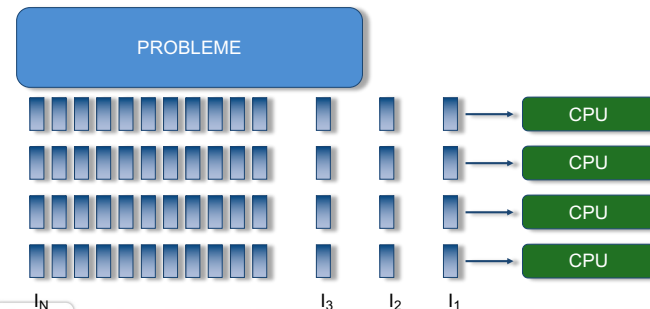


99

Parallélisme

Sous la forme la plus simple, on utilise plusieurs ressources pour résoudre un problème

- Problème divisé en sous-parties indépendantes (si possible)
- Utilisant plusieurs CPU
- Si pas de communications entre les CPUs : "embarrassingly parallel" !



100

Qu'est-ce qu'une machine parallèle ?

• Une collection d'éléments de calcul capables de communiquer et de coopérer dans le but de résoudre rapidement des problèmes de grande taille

• Une collection d'éléments de calcul

- Combien ?
- De quelle puissance ?
- Que sont-ils capables de réaliser ?
- Quelle est la taille de leur mémoire associée ?
- Qu'elle en est l'organisation ?
- Comment les entrées/sorties sont-elles réalisées ?

• ... capables de communiquer ...

- Comment sont-ils reliés entre eux ?
- Que sont-ils capables d'échanger ?
- Quel est leur protocole d'échange d'information ?

101

Qu'est-ce qu'une machine parallèle ?, suite

• ... et de coopérer ...

- Comment les éléments de calculs synchronisent ils leurs efforts ?
- Quel est leur degré d'autonomie ?
- Comment sont-ils pris en compte par le système d'exploitation ?

• ... dans le but de résoudre des problèmes de grande taille.

- Quels sont les problèmes à fort potentiel de parallélisme ?
- Quel est le modèle de calcul utilisé ?
- Quel est le degré de spécialisation des machines à un problème donné ?
- Comment choisir les algorithmes ?
- Quelle efficacité peut-on espérer ?
- Comment ces machines se programment elles ?
- Quels langages faut-il ?
- Comment faut-il exprimer le parallélisme ?
- Le parallélisme est il implicite ou explicite ?
- L'extraction du parallélisme est-elle automatique ou manuelle ?

102

Avant le parallélisme, optimiser les codes !

• Quelques optimisations classiques

- Préfetching d'instructions
- Ré-ordonnancement d'instructions
- Unités fonctionnelles pipelinées
- Prédiction de branches
- Allocation d'unités fonctionnelles
- Hyperthreading

• Par contre, cela nécessite une complexification du matériel (unités fonctionnelles parallèles) et du logiciel (compilateurs, système d'exploitation) pour les supporter

103

TROUVER LE PARALLÉLISME

104

Comment trouver le parallélisme ?

• Partir d'un langage séquentiel ?

- L'application a un parallélisme intrinsèque
- Le langage de programmation choisi ne possède pas d'extension "parallèle"

➔ Le compilateur, le système d'exploitation et/ou le matériel doivent se débrouiller pour trouver le parallélisme caché!

- Fonctionnement correct pour quelques applications trivialement parallèles (parallélisation de boucles imbriquées simples par exemple)
- Mais en général, résultats décevants et pbs liés à la dynamique (pointeurs en C par exemple)

105

Parallélisme "automatique" dans les processeurs actuels

• Parallélisme au niveau du bit (BLP, *Bit Level Parallelism*)

- Dans les opérations flottantes

• Parallélisme d'instructions (ILP, *Instruction Level Parallelism*)

- Exécuter plusieurs instructions par cycle d'horloge
- ThLP (Thread level parallelism: multithreading)

• Parallélisme des gestionnaires de mémoire

- Recouvrir les accès mémoire avec le calcul (prefetch)
- Opérations vectorielles en parallèle ($A[*] \leftarrow 3 \times A[*]$)

• Parallélisme au niveau du système

- Exécuter des tâches différentes sur des processeurs (ou des cores) différents
- `fork` [`func1()`, `func2()`], `join` [*]
- Threads, `join`

• Limites à ce parallélisme "implicite"

- Niveau d'intelligence des processeurs et des compilateurs
- Complexité des applications
- Nombre d'éléments en parallèle

106

Autre approche: la coopération

Le programmeur et le compilateur travaillent ensemble

- L'application a un parallélisme intrinsèque
- Le langage possède des extensions permettant d'exprimer le parallélisme
- Le compilateur va traduire le programme pour des unités multiples
- Le programmeur donne des conseils au compilateur sur les zones qu'il faut optimiser, quelles sont les boucles parallèles, ...
- Le compilateur, en partant des informations qu'il possède sur le matériel (taille des caches, nombre d'unités parallèles, informations sur les performances), va pouvoir générer un code performant.

107

Pipelines

Exemple de Dave Patterson : 4 personnes qui lavent leur linge

lavage (30 min) + séchage (40 min) + pliage (20 min) = 90 min

1 seule machine à laver, 1 sècheur, 1 machine à plier

Temps Séquentiel ?

Temps Parallèle ?

108

Pipelines

Exemple de Dave Patterson : 4 personnes qui lavent leur linge

lavage (30 min) + séchage (40 min) + pliage (20 min) = 90 min

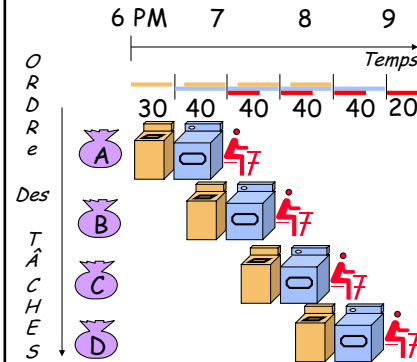
- Dans cet exemple:
 - L'exécution séquentielle prend $4 * 90 \text{ min} = 6 \text{ h}$

109

Pipelines

Exemple de Dave Patterson : 4 personnes qui lavent leur linge

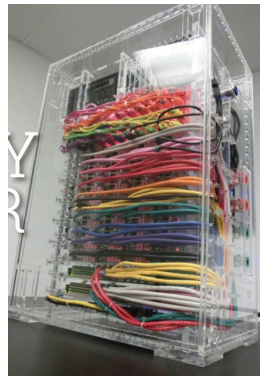
lavage (30 min) + séchage (40 min) + pliage (20 min) = 90 min



- Dans cet exemple:
 - L'exécution séquentielle prend $4 * 90 \text{ min} = 6 \text{ h}$
 - L'exécution "pipelinée" prend $30 + 4 * 40 + 20 = 3.5 \text{ h}$
- Le pipeline améliore la **bande-passante** mais pas la **latence** (90 min)
- La bande-passante est limitée par l'étape le **plus lent**
- Accélération potentielle = **nombre d'étages du pipeline**

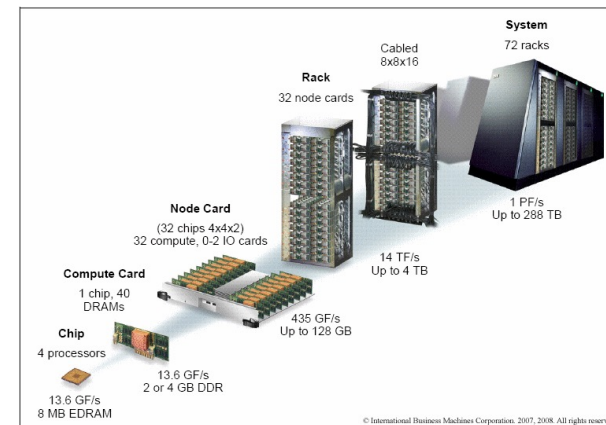
110

CONCLUSIONS



159

Les machines parallèles d'aujourd'hui



© International Business Machines Corporation. 2007, 2008. All rights reserved.

<https://computing.llnl.gov/tutorials/bgp/images/bgpScalingArch.gif>

160

Obtenir des performances sur ces machines

- Généralement on ne parle que de puissance de calcul
- Mais il faut prendre en compte aussi la bande-passante mémoire et la latence
 - Il faut être capable de remplir la vitesse du (des) processeur(s)
 - Mémoire hiérarchique et caches
- La bande-passante en E/S vers les disques croît linéairement avec le nombre de processeurs

161

Améliorer les performances réelles

Les performances de crête augmentent exponentiellement

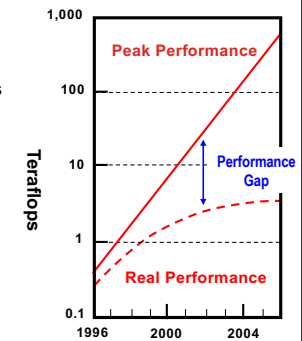
- En 1990's, les performances de crête ont augmenté 100x; dans les années 2000, elles ont augmenté 1000x

Mais l'efficacité (les performances par rapport aux performances en crête) ont plutôt déclinées

- 40-50% sur les supercalculateurs vectoriels des années 1990
- Maintenant proches de 10-30% ? sur les supercalculateurs d'aujourd'hui

Réduire l'écart ...

- Algorithmes qui obtiennent des performances sur un seul processeur et sont extensibles sur plusieurs milliers
- Modèles de programmation plus efficaces et des outils pour les machines massivement parallèles

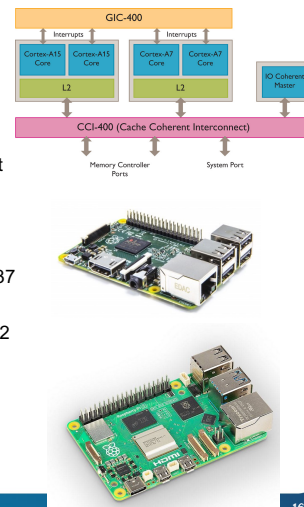


162

Parallélisme en 2025...

- Tous les vendeurs de processeurs produisent des processeurs multicore
 - (Presque) Toutes les machines sont parallèles – ex big.LITTLE processeur
 - Pour continuer à doubler la puissance il faut doubler le parallélisme
- Même Raspberry Pi 2 (Fév. 2015 - ARM v7 900 Mhz 4 cœurs 1GB) et Pi3 (Fév. 2016 - Quad Core Broadcom 2837 ARMv8 64bit) et Pi4 (Juin 2019 - ARM v8, Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 64bit) et Pi5 (Quad-core Cortex-A76 (ARM v8 - 64 bits) de 2,4 GHz et GPU VideoCore VI

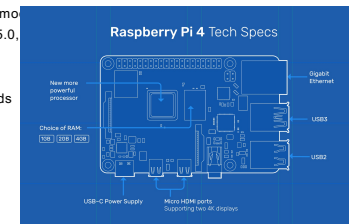
Smartphone : BigLittle



163

Raspberry PI4

Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
 1GB, 2GB or 4GB LPDDR4-3200 SDRAM (depending on model)
 2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet
 2 USB 3.0 ports; 2 USB 2.0 ports.
 Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header (fully backwards compatible with previous boards)
 2 x micro-HDMI ports (up to 4kp60 supported)
 2-lane MIPI DSI display port
 2-lane MIPI CSI camera port
 4-pole stereo audio and composite video port
 H.265 (4kp60 decode), H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode)
 OpenGL ES 3.0 graphics
 Micro-SD card slot for loading operating system and data storage
 5V DC via USB-C connector (minimum 3A*)
 5V DC via GPIO header (minimum 3A*)
 Power over Ethernet (PoE) enabled (requires separate PoE HAT)
 Operating temperature: 0 – 50 degrees C ambient

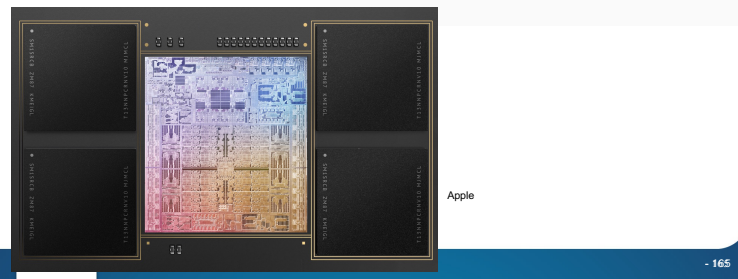
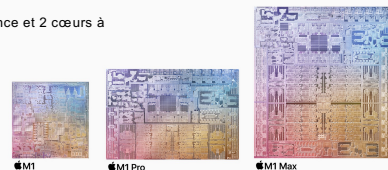


<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>

164

Apple M1 / M1Pro / M1Max

Sur ARM 16 Milliards transistors (5nm)
Big.LITTLE core
CPU jusqu'à 10 cœurs avec 8 cœurs de performance et 2 cœurs à haute efficacité énergétique
GPU jusqu'à 16 cœurs
Neural Engine 16 cœurs
200 Go/s de bande passante mémoire



- 165

165

Parallélisme en 2025...

- Quelles applications vont (bien) tirer partie du parallélisme ?
 - Est-ce qu'il faudra les redévelopper *from scratch* ?
- Est-ce que tous les programmeurs devront être des programmeurs de machines parallèles ?
 - Il faut des nouveaux modèles logiciels
 - Essayer de cacher le parallélisme au maximum
 - Le comprendre est une nécessité !
- L'industrie parie sur ces changements mais encore beaucoup de travail à effectuer



Parallélisme - 2025

- 166

166

Challenges à relever

- Les applications parallèles sont souvent très sophistiquées
 - Algorithmes adaptatifs qui nécessitent un équilibrage dynamique – Comment prouver un programme parallèle ? Comment le prouver formellement (avec une machine) ?
- Le parallélisme multi-niveaux est difficile à gérer
- La taille des nouvelles machines donnent des problèmes d'efficacité
 - Problèmes d'extensibilité - déséquilibre de charge
 - Goulots d'étranglement et en communication et/ou en entrées/sorties
 - Parallélisation insuffisante ou inefficace
 - Fautes et/ou pannes
 - Gestion de l'énergie
- Difficulté d'obtenir les meilleures performances sur les nœuds eux-mêmes
 - Contention pour la mémoire partagée
 - Utilisation de la hiérarchie mémoire sur les processeurs multi-cores
 - Influence du système d'exploitation



Parallélisme - 2025

- 167

167

Conclusions

- **L'ensemble des machines parallèles est constitué d'un ensemble (très) large d'éléments**
 - depuis des unités parallèles dans les processeurs
 - des desktop Grids (a la boinc)
 - Des edge/fog ... IoT
 - Jusqu'à des datacenters connectés à travers le monde - c'est la base du cloud (ex : Netflix utilise 300 000 processeurs pour réencoder ses films)
- **Champ d'étude du parallélisme**
 - Architectures
 - Algorithmes
 - Logiciels, compilateurs,
 - Bibliothèques
 - Environnements
- **Changements historiques importants**
 - Jusque dans les années 90, réservées à des gros calculs de simulation
 - Aujourd'hui, parallélisme dans tous les processeurs (des téléphones aux supercalculateurs), parallélisme dans la vie courante (iPad, smartphones)



Parallélisme - 2025

- 168

168



Inria
INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE

Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme
Ecole normale supérieure de Lyon

http://perso.ens-lyon.fr/laurent.lefevre/M1_parallelisme