

# Modèles et techniques en programmation parallèle hybride et multi-cœurs

Quelques notions d'optimisation séquentielle

Marc Tajchman

CEA - DEN/DM2S/STMF/LMES

10/08/2020

Deux “règles d’or” :

- ▶ Avant/après optimisation, avant/après parallélisation, il faut s’assurer que le code sur lequel on travaille, donne des résultats corrects.
- ▶ Avant de paralléliser un code et/ou avant d’optimiser le parallélisme, il faut optimiser la partie séquentielle d’un code.

## On parle en général de version Debug et Release d'un code :

- ▶ version Debug : avec les options de compilation (-g -O0 par exemple avec gcc/g++) qui désactivent les optimisations faites par le compilateur, qui ajoutent dans le code des points de repère pour exécuter un code instruction par instruction, testent la validité des indices de vecteurs, affichent la valeur de variables en cours d'exécution, etc.
  - ▶ version Release : avec les options de compilation (-O2 ou -O3 par exemple avec gcc/g++) qui permettent au compilateur d'optimiser lui-même le code, et en enlevant tous les contrôles.
  - ▶ En général, la version Release sera (beaucoup) plus rapide que la version Debug.
- 
- Pendant l'écriture, les tests et la correction d'un code, on utilise en général une version Debug.
  - A la fin, on fournit aux utilisateurs une version Release.
  - Bien vérifier que la version Release donne les mêmes résultats que la version Debug (on a parfois des surprises).

Pour évaluer l'optimisation d'un code, on utilise des outils de mesure de performance. Il existe de nombreux moyens de mesurer le temps d'exécution de code ou de parties de code :

- ▶ **Commande unix `time`** : mesure globale (temps ressenti par l'utilisateur)
- ▶ **Fonctions définies par le langage de programmation** et utilisables depuis l'intérieur du code :
  - ▶ `second(...)` (fortran),
  - ▶ `gettimeofday(...)` (C/C++),
  - ▶ `std::clock()` (C++),
  - ▶ `time.time()` (python)
  - ▶ `tic/toc` (matlab),
  - ▶ ...

Permet de mesurer le temps d'exécution d'un groupe d'instructions.

Penser à vérifier dans la documentation quelle est la précision des mesures.

- **Librairies**, par exemple MPI, OpenMP, PAPI

On ajoute dans le code des appels à des fonctions de la librairie.

- MPI et OpenMP proposent des fonctions pour mesurer le temps de calcul : `MPI_Wtime()`, `omp_get_wtime()`.

- PAPI

([https://icl.cs.utk.edu/projects/papi/wiki/Main\\_Page](https://icl.cs.utk.edu/projects/papi/wiki/Main_Page))

est une librairie qui donne des informations très précises.

Permet de consulter des compteurs système très bas niveau (par exemple : nombre d'opérations, utilisation des caches, registres, etc.)

## ► Outils externes de “profilage”

Ajoutent automatiquement des points de mesure dans le code (gprof), s'interposent entre le code et le système pour récupérer des informations (valgrind, perf, vtune (intel), etc.)

Permet de connaître des informations intermédiaires : nombre d'appels et temps moyen d'exécution de fonctions par exemple (gprof, valgrind).

Certains sont plus précis et descendent au niveau de l'instruction (perf, vtune)

En général, il faut utiliser les outils de profilage avec une version “debug” (même s'ils peuvent fonctionner en version “release”, ils donneront alors beaucoup moins d'informations).

# Programmation séquentielle efficace

**Pour obtenir un code efficace (en temps d'exécution), il faut:**

- ▶ **utiliser les algorithmes les plus efficaces possible (pas couvert par ce cours)**
- ▶ **organiser le placement des données (améliorer la localité spatiale)**
- ▶ **organiser la séquence d'instructions (améliorer la localité temporelle)**
- ▶ **écrire les instructions pour qu'elles soient les plus rapides possibles (éviter de calculer plusieurs fois la même expression, éviter si possible les tests (instructions 'if'), "faciliter le travail du compilateur")**

Une bonne utilisation de la mémoire est très importante pour l'optimisation de code.

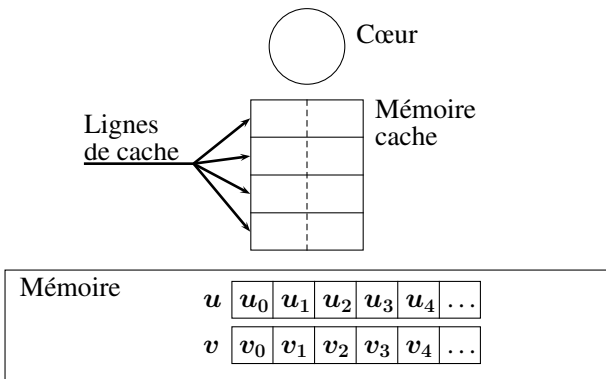
Exemple : si  $u$  et  $v$  sont des vecteurs de taille  $n > 4$ , on veut calculer la boucle :

$$\begin{aligned} & \text{for}(i = 1; i < n - 1; i++) \\ & \quad v_i = (u_{i-1} + 2 * u_i + u_{i+1})/4; \end{aligned} \tag{1}$$

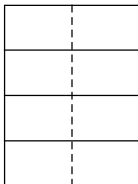


Supposons un système idéalisé par:

- ▶ un processeur (qui contient un seul cœur),
- ▶ une mémoire cache de taille 8 (4 lignes cache de taille 2),
- ▶ la mémoire centrale

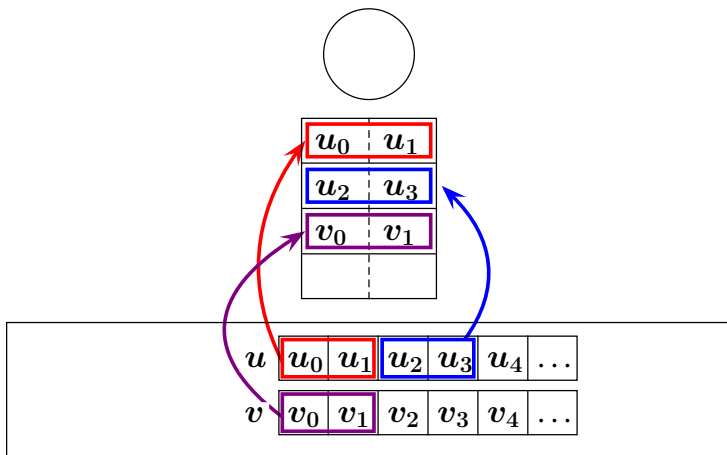


1. Avant d'exécuter  $v_1 = (u_0 + 2 * u_1 + u_2)/4$  :



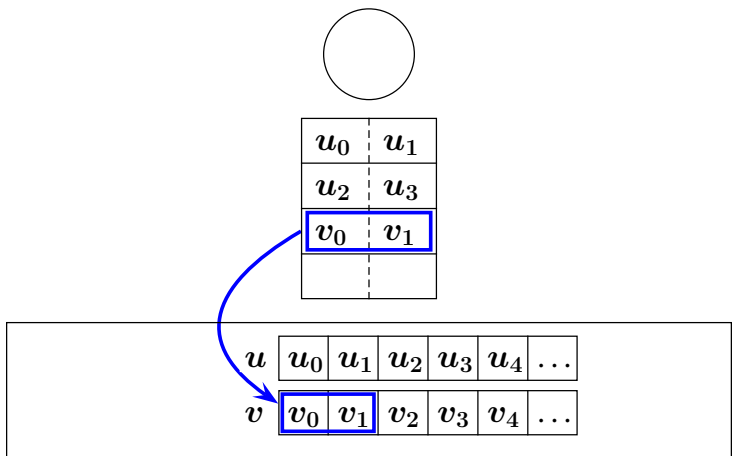
$u$	$u_0$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$\dots$
$v$	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$\dots$

2. Les blocs contenant  $u_0$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  et  $v_1$  (3 blocs) sont copiés dans la mémoire cache :





4. Le bloc contenant le résultat est recopié dans la mémoire centrale :



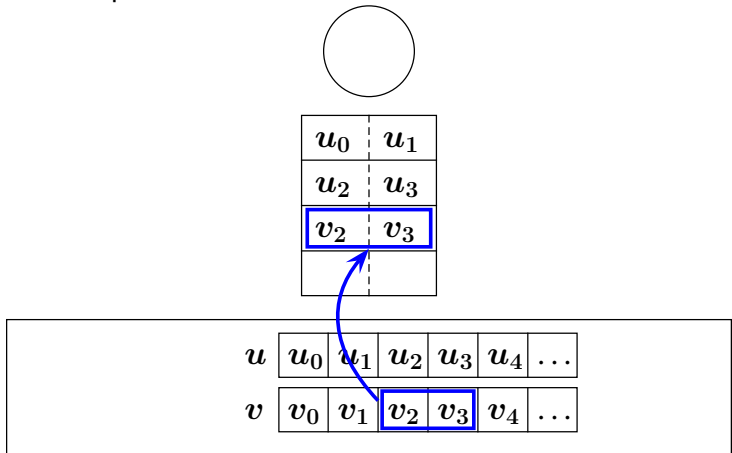
5. Le calcul de l'instruction suivante  $v_2 = (u_1 + 2 * u_2 + u_3) / 4$  peut commencer:



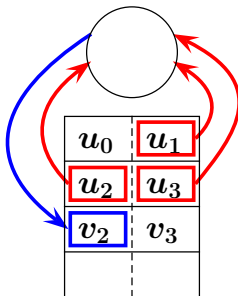
$u_0$	$u_1$
$u_2$	$u_3$
$v_0$	$v_1$

$u$	$u_0$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$\dots$
$v$	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$\dots$

6. Les composantes de  $u$  nécessaires sont déjà dans la mémoire cache, seul le bloc contenant la composante  $v_2$  doit être copié dans la mémoire cache :



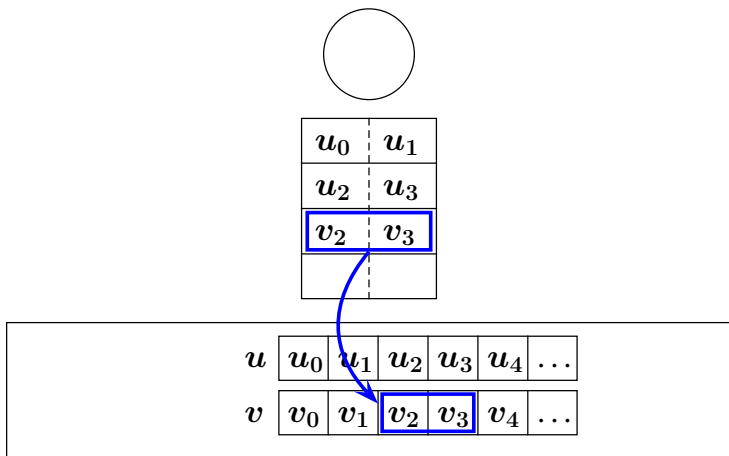
7. Le cœur utilise les copies de  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  de la mémoire cache, calcule l'expression et place le résultat dans la mémoire cache :



$u$	$u_0$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$\dots$
$v$	$v_0$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$\dots$



8. Le bloc contenant le résultat est recopié dans la mémoire centrale :



En résumé :

- ▶ La première instruction  $v_1 = (u_0 + 2 * u_1 + u_2)/4$  utilise
  - ▶ 4 transferts (lents) mémoire centrale - mémoire cache
  - ▶ 4 transferts (rapides) mémoire cache - cœur
- ▶ La deuxième instruction  $v_2 = (u_1 + 2 * u_2 + u_3)/4$  utilise
  - ▶ 2 transferts (lents) mémoire centrale - mémoire cache
  - ▶ 4 transferts (rapides) mémoire cache - cœur

Attention : cet exemple est (très) simplifié : en général la mémoire cache est de taille plus grande que dans l'exemple et, de plus, il y a plusieurs types de mémoire cache dans un ordinateur

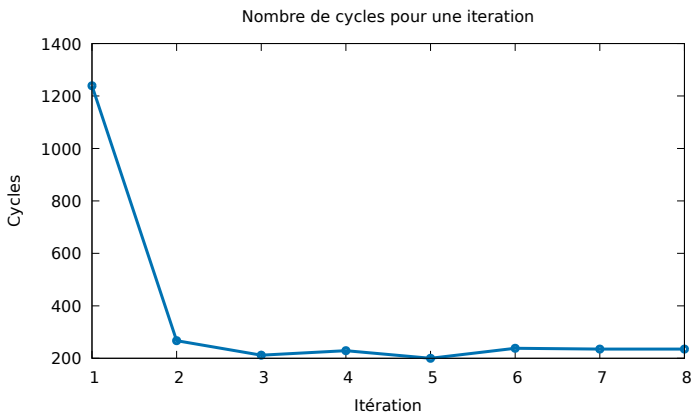
Examiner et tester l'exemple *Exemple1*

Attention: l'exemple ne fonctionnera que si PAPI est installé et configuré sur la machine

Lire le fichier Exemple1/README.txt pour des instructions de compilation et d'exécution.

- ▶ La première instruction prend plus de temps parce qu'elle remplit la mémoire cache.
- ▶ Sans mémoire cache, toutes les itérations prendraient (à peu près) le même temps que la première.
- ▶ Beaucoup d'instructions suivantes n'auront pas besoin de chercher toutes les valeurs dans la mémoire centrale.

La mémoire cache améliore beaucoup le temps de calcul de presque toutes les itérations.



Un cycle est l'unité de temps pour le processeur. Le processeur qui a été utilisé ici, a une fréquence de 3 GHz. Un cycle prend à peu près  $0.3 \cdot 10^{-9}$  secondes.

Un calcul de  $v_i$  prend  $\sim 0.6 \cdot 10^{-7}$  secondes (sauf  $v_0$  qui prend  $\sim 3.5 \cdot 10^{-7}$  secondes) dans le cas ci-dessus.

On voit donc qu'il est important de bien utiliser la mémoire cache.

Pour obtenir le maximum de performances, il faudrait programmer en connaissant exactement l'organisation des mémoires cache.

Un code qui utilise l'information sur la mémoire cache de façon portable (indépendante de la machine), est (très) compliqué à écrire.

C'est pourquoi, on essaie d'appliquer les règles suivantes : optimiser les localités spatiale et temporelle.

# Localité spatiale

Règle: **autant que possible, utiliser des zones mémoires proches les unes des autres dans une séquence d'instructions**

*Le transfert entre mémoire centrale et mémoire cache se fait par bloc de données.*

*Donc, si une donnée est à côté d'une donnée qui vient d'être utilisée (et donc transférée en mémoire cache), un nouveau transfert sera peut-être inutile.*

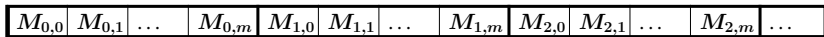
Voir l'[Exemple2](#) : addition de 2 matrices.

Lire le fichier Exemple2/README.txt pour des instructions de compilation et d'exécution.

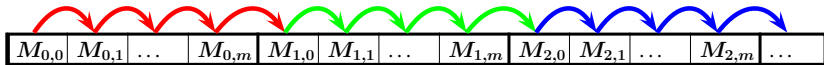
Le code compare 2 algorithmes de parcours des coefficients de matrice : lignes par lignes et colonnes par colonnes.

Dans cet exemple, une matrice  $M(m, n)$  est rangée dans la mémoire centrale ligne par ligne:

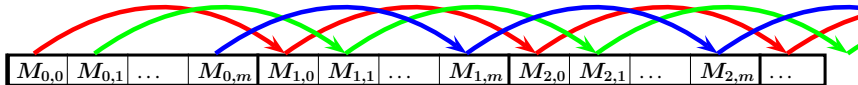
Mémoire centrale



Parcours ligne par ligne (flèches rouges, vertes puis bleues):



Parcours colonne par colonne (flèches rouges, vertes puis bleues):



Exécuter l'exemple 2 en tapant:

```
./ex_1_2.exe
```

qui additionne 2 matrices de taille  $1024 \times 1024$  et comparer les temps de calcul.

### Question.

*Ré-exécuter le code en ajoutant un paramètre entier :*

```
./ex2.exe n
```

*avec  $n = 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048$  qui additionne des matrices de taille  $n \times n$ .*

*Expliquer les résultats*



# Localité temporelle

Règle: **autant que possible, les instructions qui utilisent une même zone mémoire, doivent s'exécuter de façon rapprochée dans le temps**

*La mémoire cache étant de petite taille, le gestionnaire mémoire, s'il a besoin de place, effacera dans la mémoire cache les données les plus anciennes.*

*Si une donnée est utilisée par plusieurs instructions proches dans le temps, elle sera maintenue plus longtemps en mémoire cache (et donc nécessitera moins de transferts)*

Voir l'**Exemple3**

Lire le fichier Exemple3/README.txt pour des instructions de compilation et d'exécution.

# Utilisation du // interne au processeur

En général, on laisse le compilateur essayer d'optimiser le code pour ce type d'amélioration, mais on peut essayer d'appliquer les règles suivantes (il peut y en avoir d'autres) :

- ▶ dérouler les boucles (si les instructions à l'intérieur de la boucle contiennent des opérations arithmétiques)  
*utiliser au maximum la présence de plusieurs unités de calcul (additionneurs, multiplicateurs, etc) dans un cœur*
- ▶ essayer d'éviter les tests  
*simplifier le travail du processeur (enchaînement des instructions le plus déterministe possible).*

Voir [Exemple 4](#) : Déroulement de boucles (exemple inspiré de la librairie d'analyse numérique LAPACK)

Lire le fichier Exemple4/README.txt pour des instructions de compilation et d'exécution.

Dans calcul1, une itération de la boucle de longueur  $n$  contient 1 addition et 1 multiplication.

Dans calcul2, une itération de la boucle de longueur  $n/4$  contient 4 additions et 4 multiplications.

Donc l'ordinateur peut calculer simultanément certaines des opérations en fonction du nombre de circuits d'addition et/ou de multiplication disponibles.

A noter que calcul2 contient plus d'opérations sur les entiers que calcul1. Malgré cela, calcul2 est tout de même plus rapide que calcul1.

## Exemple 5: remplacement de tests par des opérations arithmétiques

```
for (i=0; i<n; i++) {  
    u[i] = u0[i];  
    if (terme1) u[i] += a*v[i];  
    if (terme2) u[i] += b*w[i];  
}
```

vs.

```
if (terme1) aa = a; else aa = 0.0;  
if (terme2) bb = b; else bb = 0.0;  
for (i=0; i<n; i++) {  
    u[i] = u0[i] + aa*v[i] + bb*w[i];  
}
```

La meilleure version dépend des valeurs (vrai/faux) de terme1 et terme2