SG6: High Performance Computing

Multithreading with OpenMP

Stéphane Vialle

Stephane.Vialle@centralesupelec.fr
http://www.metz.supelec.fr/~vialle

Programmation OpenMP (par partage de mémoire)

1. **Principes d'OpenMP**
2. Détails de syntaxe et de sémantique
3. Optimisations
4. Exemples de parallélisation
5. Bilan d'OpenMP
6. Mesures et représentation de performances

Principes de base

Développer un code séquentiel :
- conception
- implantation
- mise au point

```
Initialisation();
for (i=0; i<N; i++)
   Calcul(i);
Autre_calcul();
```

Ajouter des directives de compilation parallèles
- parallélisation incrémentale
- peu de code supplémentaire
- limité au parallélisme présent dans le code initial

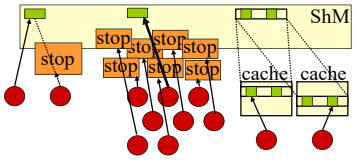
Exemple utilisant une « directive » OpenMP

```
#include <omp.h>
Initialisation();
#pragma omp parallel for private(i)
for (i=0; i<N; i++)
   Calcul(i);
Autre_calcul();
```


Principes de base

OpenMP : basé sur des *threads* et soumise aux mêmes limites

Exploite une mémoire partagée, mais :
- pb de synchronisation
- pb de contention
- pb de *false sharing* (« *cache war* »)



→ Utiliser OpenMP facilite (souvent) l'implantation, mais ne dispense pas de résoudre les problèmes d'algorithmique parallèle en mémoire partagée.

Régions parallèles

```
main() {
  .....
  #pragma omp parallel
  {
    .....
    .....
  }
  .....
}
```

région parallèle

1th : code seq.

3th : **code répliqué**

1th : code seq.

Ex sur une machine à 3 cœurs (!!) :
- Création et destruction de 3 threads en début et fin de région parallèle
- « Join » (synchro) automatique sur la mort des 3 threads en sortie de région parallèle
- Syntaxe très simple et concise

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  .....
  #pragma omp parallel
  {
    .....
    #pragma omp for private(i)
    for (i=0; i<N; i++){
      ..................
    }
    #pragma omp single
    { ..... }
    #pragma omp critical
    { ..... }
    .....
    #pragma omp barrier
    .....
  }
  .....
}
```

région parallèle

Code seq.

Code répliqué

Calculs répartis de même nature

Calcul séq.

Calculs « mutexés »

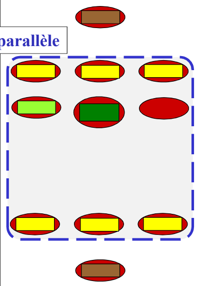
Code répliqué à durée variable -- Synchro -- Code répliqué

Code seq.

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    ......
    #pragma omp sections
    {
      #pragma omp section
      { ...... }
      #pragma omp section
      { ...... }
    }
    ......
  }
  ......
}
```

région parallèle

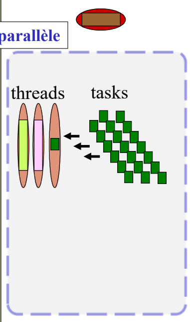


Programmation OpenMP - principes

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp sections
    {
      #pragma omp section
      {
        while (…) {
          ......
          if (…)
            #pragma omp task
            { ...... }
        }
      }
      #pragma omp section
      {
        // Ex: IO operations
        // Write into a file…
        ......
      }
    }
  }
  ......
}
```

région parallèle

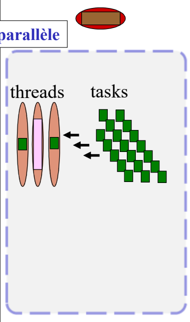


Programmation OpenMP - principes

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp sections
    {
      #pragma omp section
      {
        while (…) {
          ......
          if (…)
            #pragma omp task
            { ...... }
        }
      }
      #pragma omp section
      {
        // Ex: IO operations
        // Write into a file…
        ......
      }
    }
  }
  ......
}
```

région parallèle

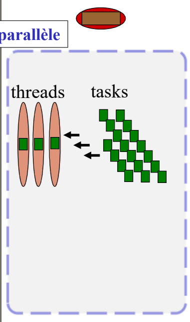


Programmation OpenMP - principes

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp sections
    {
      #pragma omp section
      {
        while (…) {
          ......
          if (…)
            #pragma omp task
            { ...... }
        }
      }
      #pragma omp section
      {
        // Ex: IO operations
        // Write into a file…
        ......
      }
    }
  }
  ......
}
```

région parallèle

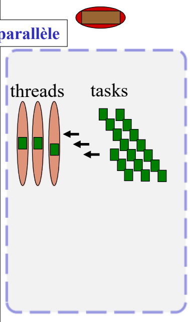


Programmation OpenMP - principes

Ctrl du parallélisme par directives

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp sections
    {
      #pragma omp section
      {
        while (…) {
          ......
          if (…)
            #pragma omp task
            { ...... }
        }
      }
      #pragma omp section
      {
        // Ex: IO operations
        // Write into a file…
        ......
      }
    }
  }
  ......
}
```

région parallèle



Programmation OpenMP - principes

Ctrl explicite du parallélisme

Parallélisation d'un appel de fonction séquentielle :

Code séquentiel

```
main() {
  ......
  f_lib(0, N, SharedTable);
  ......
}
```

Code parallèle

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    // Lower boundary of the thread
    int inf = N/omp_get_num_threads()* omp_get_thread_num();
    // Upper boundary of the thread
    int sup = N/omp_get_num_threads()*(omp_get_thread_num()+1);
    // Call to the sequential library function
    f_lib(inf, sup, SharedTable);
  }
  ......
}
```

`omp_get_num_threads()` : nb of threads in the current region
`omp_get_thread_num()` : rank of the thread

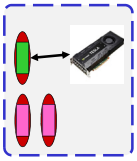
Code répliqué MAIS avec des paramètres spécifiques à chaque thread

Rmq : il faut que le code de la fonction soit « ré-entrant »

Ctrl explicite du parallélisme

```
main() {
  ......
  #pragma omp parallel
  {
    switch (omp_get_thread_num()) {
    case 0 :
      ......          // calcul sur
      break;          // le GPU
    default :
      ......          // calcul sur
      break;          // les cœurs CPU
    }
  }
  ......
}
```

Hyp : 3 threads OpenMP créés sur une machine à 3 cœurs CPU…



…et l'un des cœurs CPU est dédié au pilotage d'un GPU

Faire accomplir au thread 0 (qui existe toujours) une tâche spéciale

- **Pilotage d'un GPU** en parallèle de **calculs sur les autres cœurs CPU**
- IO disque en parallèle de calculs sur les autres cœurs CPU…

Région parallèles de directives orphelines

```
main() {
 int i, j;
 #pragma omp parallel
 {
  #pragma omp for private(i)
  for (i=0; i<N; i++)
    ..................
 }
}
```

Région parallèle explicite

Région parallèle d'une **directive « orpheline »**

```
main() {
 int i, j;
 #pragma omp parallel for private(i)
 for (i=0; i<N; i++)
   ..................
}
```

Directive orpheline : installe sa propre région parallèle minimale

- plus simple et plus compacte
- attention : provoque la création et la mort automatique de threads à chaque exécution de la directive
  → possible pb de perf si on répète/enchaîne ces directives

Programmation OpenMP (par partage de mémoire)

1. Principes d'OpenMP
2. **Détails de syntaxe et de sémantique**
3. Optimisations
4. Exemples de parallélisation
5. Bilan d'OpenMP
6. Mesures et représentation de performances

Parallel for

OpenMP peut paralléliser des boucles de calcul :

- avec une syntaxe légère
- si les itérations sont indépendantes !

```
main() {
 int i;
 .....
 #pragma omp parallel
 {
  ......
  #pragma omp for private(i)
  for (i=0; i<N; i++)
    .........
  ......
 }
 ......
}
```

```
for (i = 1; i < N; i++) {
  tab2[i] = 1 + (tab1[i-1])²
}
```

Algorithme parallélisable

```
for (i = 1; i < N; i++) {
  tab[i] = 1 + (tab[i-1])²
}
```

Algorithme séquentiel !

Parallel for

OpenMP peut paralléliser des boucles de calcul :

- avec une syntaxe légère
- si les itérations sont indépendantes !
- chaque thread créé devra posséder SES propres compteurs de boucles

```
main() {
 int i;
 .....
 #pragma omp parallel
 {
  ......
  #pragma omp for private(i)
  for (i=0; i<N; i++)
    .........
  ......
 }
 ......
}
```

Chaque thread à SA plage de valeur pour son compteur (SES itérations) et chaque thread incrémente SON compteur.

`private(i)` précise que le compteur global *i* devra être remplacé par des compteurs locaux *i* dans chaque corps de thread

Le *i* local masquera alors le *i* global dans la boucle de chaque thread.

Parallel for

OpenMP peut paralléliser des boucles de calcul :

- avec une syntaxe légère
- si les itérations sont indépendantes !
- chaque thread créé devra posséder SES propres compteurs de boucles

```
main() {
 int i;
 .....
 #pragma omp parallel private(i)
 {
  ......
  #pragma omp for
  for (i=0; i<N; i++)
    .........
  ......
 }
 ......
}
```

On peut aussi préciser la clause `private(i)` dès la création de la région parallèle

Le *i* local masque alors le *i* global dans tous le corps de chaque thread

Parallel for

OpenMP peut paralléliser des boucles de calcul :

- avec une syntaxe légère
- si les itérations sont indépendantes !
- chaque thread créé devra posséder SES propres compteurs de boucles

```
main() {
  .....
  #pragma omp parallel
  {
    .....
    #pragma omp for
    for (int i=0; i<N; i++)
      .........
    .....
  }
  .....
}
```

On peut enfin déclarer des compteurs dans les boucles…
… qui deviennent automatiquement privés à chaque thread créé !

Parallel for

Variables privées et partagées dans les threads

```
#define N 1000
double Tab1[N], Tab2[N];
main() {
  int i;
  double alpha = 2.0;
  .....
  #pragma omp parallel for private(i) \
          shared(Tab1,Tab2) \
          shared(alpha)
  for (i = 0; i < N; i++) {
    double coef;
    coef = pow(Tab1[i],alpha);
    Tab2[i] *= coef;
  }
}
```

Chaque thread possèdera une variable locale « i » qui masquera la variable initiale

Comportement par défaut

Variable locale à la boucle parallélisée → chaque thread en possèdera une

Les compteurs de boucles déclarés en amont doivent devenir privés.

Le compilateur OpenMP peut le faire sur des codes simples!…
…**mais non portable!! → privatiser explicitement les compteurs**

Parallel for

Variables privées et partagées dans les threads

```
#define N 1000
double Tab1[N], Tab2[N];
main() {
  double alpha = 2.0;
  .....
  #pragma omp parallel for shared(Tab1,Tab2) \
          shared(alpha)
  for (int i = 0; i < N; i++) {
    double coef;          // var locale : privée
    coef = pow(Tab1[i],alpha);
    Tab2[i] *= coef;
  }
}
```

Variable locale à la boucle parallélisée → chaque thread possèdera son compteur de boucle

Les compteurs de boucles déclarés dans les boucles sont automatiquement privés à chaque thread

→ **La meilleure solution !**

Parallel for

Gestion des compteurs des nids de boucles :

- *i* aura une plage de valeurs différente dans chaque thread
  → chaque thread doit avoir SON *i*
- *j*, *k* et *l* auront les mêmes plages de variation, mais :
  - chaque thread avance à son rythme
  - chaque thread incrémente ses compteurs

  → chaque thread doit avoir SES *j*, *k*, *l*.

```
double sharedTable[I][J][K][L];
main() {
  int i,j,k,l:
  .....
  #pragma omp parallel
  {
    .....
    #pragma omp for private(i,j,k,l)
    for (i=0; i<I; i++)
      for (j=0; j<J; j++)
        for (k=0; k<K; k++)
          for (l=0; l<L; l++) {
            f(i,j,k,l,sharedTab);
          }
    .....
  }
  .....
}
```


Parallel for

Gestion des compteurs des nids de boucles :

- Finalement, avec des déclarations de compteurs locaux…
  …tout est beaucoup plus simple!

```
double sharedTable[I][J][K][L];
main() {
  .....
  #pragma omp parallel
  {
    .....
    #pragma omp for
    for (int i=0; i<I; i++)
      for (int j=0; j<J; j++)
        for (int k=0; k<K; k++)
          for (int l=0; l<L; l++) {
            f(i,j,k,l,sharedTab);
          }
    .....
  }
  .....
}
```


Parallel for

Exemple de gestion de différents types de variables

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
  int i, c;
  int idx = 0;
  double a = 2.0;
  for (c = 0; c < NbC; c++){
    for (i = 0; i < N; i++){
      double coef =
        pow(Tab[idx][i],a);
      Tab[1-idx][i] *= coef;
    }
    idx = 1 - idx;
  }
  printf("%d",idx);// 0 ou 1
}
```

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
  int i, c;
  int idx = 0;
  double a = 2.0;
  #pragma omp parallel \
          private(i,c,idx) \
          shared(Tab,a)
  {
    idx = 0; // NE PAS OUBLIER
    for (c = 0; c < NbC; c++){
      #pragma omp for
      for (i = 0; i < N; i++){
        double coef =
          pow(Tab[idx][i],a);
        Tab[1-idx][i] *= coef;
      }
      idx = 1 - idx;
    }
  }
  printf("%d",idx); // 0
}
```

Parallel for

Exemple de gestion de différents types de variables

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
 int i, c;
 int idx = 0;
 double a = 2.0;
 for (c = 0; c < NbC; c++){
   for (i = 0; i < N; i++){
     double coef =
        pow(Tab[idx][i],a);
     Tab[1-idx][i] *= coef;
   }
   idx = 1 - idx;
 }
 printf("%d",idx);// 0 ou 1
}
```

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
 int i, c;
 int idx = 0;
 double a = 2.0;
 #pragma omp parallel          \
         private(i,c)          \
         shared(Tab,a,idx)
 {
  for (c = 0; c < NbC; c++){
    #pragma omp for
    for (i = 0; i < N; i++){
      double coef =
        pow(Tab[idx][i],a);
      Tab[1-idx][i] *= coef;
    }
    #pragma single
    { idx = 1 - idx; }
  }
 }
 printf("%d",idx); // 0 ou 1
}
```


Parallel for

Propagation de valeurs aux variables privées : clause *firstprivate*

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
 int i, c;
 int idx = 0;
 double a = 2.0;
 for (c = 0; c < NbC; c++){
   for (i = 0; i < N; i++){
     double coef =
        pow(Tab[idx][i],a);
     Tab[1-idx][i] *= coef;
   }
   idx = 1 - idx;
 }
 printf("%d",idx);// 0 ou 1
}
```

Voir aussi « lastprivate »

```
#define NbC 100
#define N  1000
double Tab[2][N];
main() {
 int i, c;
 int idx = 0;
 double a = 2.0;
 #pragma omp parallel          \
         private(i,c)          \
         firstprivate(idx)     \
         shared(Tab,a)
 {
  for (c = 0; c < NbC; c++){
    #pragma omp for
    for (i = 0; i < N; i++){
      double coef =
        pow(Tab[idx][i],a);
      Tab[1-idx][i] *= coef;
    }
    idx = 1 - idx;
  }
 }
 printf("%d",idx); // 0
}
```


Parallel reduce

Def : une « réduction » passe d'un vecteur de dimension *n* à un vecteur de dimension *m* (< *n*)

- c'est toujours une opération délicate en parallélisme
- en OpenMP : *parallel for* + **clause *reduction***
- ex : **réduction d'un vecteur dans un scalaire**

```
#define N 1000
double x[N];
double Sx = 0.0;
double MoyX;

#pragma omp parallel for shared(x) \
                         reduction(+: Sx, Sy)
for (int i = 0; i < N; i++) {
  Sx = Sx + x[i];          // local Sx
}
// global Sx = sum of all local Sx
MoyX = Sx/N;               // global Sx
```

Cohérence de l'opérateur et des opérations : à la charge du développeur

Parallel reduce

Def : une « réduction » passe d'un vecteur de dimension *n* à un vecteur de dimension *m* (< *n*)

- OpenMP peut **réduire dans un vecteur** a une ou plusieurs dimensions

```
double Mark[Ncourse][Nstudent];
double Weight[Ncourse];
double Score[Nstudent];

#pragma omp parallel for reduction(+: Score)
for (int c = 0; c < Ncourse; c++)
  for (int s = 0; s < Nstudent; s++)
    Score[s] += Mark[c][s]*Weight[c];
```

OpenMP récents

Le tableau `Mark[][]` est accédé dans un ordre favorable au cache
→ on conserve cet ordre

Threads plus « gros » si on parallélise la boucle en *c* plutôt que celle en *s*
→ on tente de paralléliser la boucle en *c*

→ Il faut faire une **réduction dans le tableau *Score***

→ Une tableau ***Score*** dans chaque thread : peut excéder la RAM !

Contrôle de l'ampleur du parallélisme

Par défaut OpenMP *inonde* le nœud : un thread par cœur logique !
Mais on peut spécifier le nbr de threads créés

Sol 1 : spécifier le nbr de threads à chaque entrée en région parallèle

```
#pragma omp parallel num_threads(10)
{
  ......
}

......

#pragma omp parallel for num_threads(10)
for …

......

#pragma omp parallel for num_threads(2)
for …
```

Impose le nombre de threads créés juste sur une portion de code OpenMP

Commande à re-spécifier à chaque région parallèle (non robuste)

Contrôle de l'ampleur du parallélisme

Par défaut OpenMP *inonde* le nœud : un thread par cœur logique !
Mais on peut spécifier le nbr de threads créés

Sol 2 : spécifier le nbr de threads jusqu'à une nouvelle spécification

```
omp_set_num_threads(10);
#pragma omp parallel {
  ......
}

......

#pragma omp parallel for
for …

......
omp_set_num_threads(2);
#pragma omp parallel for
for …
```

Impose le nombre de threads :
- pour le reste du programme
- jusqu'à une nouvelle spécification

Contrôle de l'ampleur du parallélisme

Par défaut OpenMP *inonde* le nœud : un thread par cœur logique !
Mais on peut spécifier le nbr de threads créés

Sol 3 : en mixant les deux types de spécifications

```
omp_set_num_threads(10);
#pragma omp parallel {
  ......
}
......

#pragma omp parallel for
for …

......

#pragma omp parallel for num_threads(2)
for …
```

Impose le nombre de threads pour tout le reste du programme

Mais une nouvelle spécification locale l'écrase momentanément

Qu'imprime ce programme ?

```
omp_set_num_threads(10);
printf("Thread %d/%d\n",
       omp_get_thread_num(),
       omp_get_num_threads());

#pragma omp parallel num_threads(2)
{
 printf("Thread %d/%d\n",
        omp_get_thread_num(),
        omp_get_num_threads());

 #pragma omp for private(i,j)
 for (i = 0; i < 4; i++)
   for (j = 0; j < 2; j++)
     print("%d-%d-%d\n",
           omp_get_thread_num(),i,j);
}

printf("Thread %d/%d\n",
       omp_get_thread_num(),
       omp_get_num_threads());
```

Thread 0/1

Thread 0/2 ou Thread 1/2
Thread 1/2 Thread 0/2

th = 0 :

0-0-0
0-0-1
0-1-0
0-1-1

th = 1

1-2-0
1-2-1
1-3-0
1-3-1

Thread 0/1

Mesure du temps écoulé

```
start = omp_get_wtime();
#pragma omp parallel \
            private(cycle,i,j)
{
  ..... // PARALLEL COMPUTATIONS
}
finish = omp_get_wtime();

duration  = finish - start;
gigaflops = NbrOPs/duration/1E9;
.....
```

Début de la mesure du temps

Fin de la mesure de temps

Déduction de la vitesse de calcul

`omp_get_wtime()` :

- Portable sous Linux et Windows
- Mesure le temps qui passe (le « wall clock »)
- Est assez précise
- Est très facile à utiliser

Synchronisation par « locks » explicites

Exemple d'utilisation des fonctions d'OpenMP :

```
int compteur = 0;
omp_lock_t Lock
omp_init_lock(&Lock);

#pragma omp parallel
{
.....
omp_set_lock(&Lock);
compteur++ // accès à une rsrc critique
omp_unset_lock(&Lock);
.....
}
.....
omp_destroy_lock(&Lock);
```

Déclaration d'un verrou

Initialisation du verrou

Utilisation du verrou

Libération du verrou

Permet de réaliser une synchronisation par verrous, qui est portable entre Windows et Linux.

Fonctions disponibles en OpenMP

Execution Environment Functions

```
omp_set_num_threads
omp_get_num_threads
omp_get_max_threads
omp_get_thread_num
omp_get_num_procs
```

```
omp_in_parallel
omp_set_dynamic
omp_get_dynamic
omp_set_nested
omp_get_nested
```

Lock Functions

```
omp_init_nest_lock
omp_destroy_nest_lock
omp_set_nest_lock
omp_unset_nest_lock
omp_test_nest_lock
```

```
omp_init_lock
omp_destroy_lock
omp_set_lock
omp_unset_lock
omp_test_lock
```

Timing Routines

```
omp_get_wtime
omp_get_wtick
```


Evolution d'OpenMP

OpenMP-1 *vs* OpenMP-2 (ou 2.5 ou 3.1 ou 4.0)

OpenMP-1.0	OpenMP-2.0
- 1998	- 2002
- Régions parallèles	- Régions parallèles
- **`Parallel for`**	- **`Parallel for`**
- **`Parallel sections`** avec des « options »	- **`Parallel sections`** … nouvelles « options »
- Peu de composition possible des directives	- Beaucoup de compositions possibles des directives
- **Simple**	- **Devient plus compliqué !**

OpenMP-5.0
OpenMP-4.0
OpenMP-3.1
OpenMP-2.5

De plus en plus de fonctionnalités …

Documentation d'OpenMP…	OpenMP -1.0	OpenMP -2.0	OpenMP -2.5	OpenMP -3.0	OpenMP -3.1	OpenMP -4.0
	1998	2002	2005	2008	2011	2012
	85p	106p	**250p**	**326p**	**354p**	**380p**

OpenMP utilisé au maximum est-il plus simple que les P-Threads ?

Programmation OpenMP (par partage de mémoire)

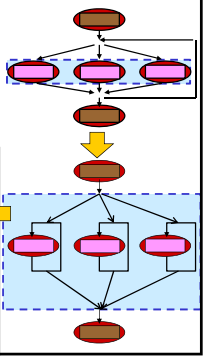
1. Principes d'OpenMP
2. Détails de syntaxe et de sémantique
3. **Optimisations**
4. Exemples de parallélisation
5. Bilan d'OpenMP
6. Mesures et représentation de performances

Réutilisation des threads

Définition d'une région parallèle qui évite de re-créer les threads

```
main() {
  .....
  for (c = 0; c < NbCycle; c++){
    #pragma omp parallel for private(i)
    for (i = 0; i < N; i++)
      ...................
  }
  .....
}
```

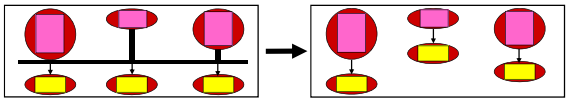
```
main() {
  .....
  #pragma omp parallel private(c)
  {
    for (c = 0; c < NbCycle; c++){
      #pragma omp for private(i)
      for (i = 0; i < N; i++)
        ...................
    }
  }
  .....
}
```



Suppression des synchro inutiles

Suppression de barrières de synchronisation systématiques :

```
#pragma omp sections nowait
#pragma omp for nowait
```



Par défaut : un `wait` est présent à la fin de chaque directive OpenMP
→ barrière de synchronisation de tous les threads de la région

On peut l'enlever en ajoutant `nowait` :

- si les threads n'ont pas besoin d'être resynchronisés à cet endroit du code !
- si il y a matière à gagner du temps : enchainer avec des calculs de tailles différentes et espérer gagner au final

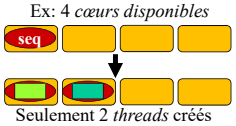
Optimisation de l'ampleur du parallélisme

Eviter les créations de threads inutiles :

1 - Limitation au nombre de tâches à exécuter (< nbr de rsrcs)

```
.....
omp_set_num_threads(2);
#pragma omp sections
{
  #pragma omp section
    {.....  }
  #pragma omp section
    {.....  }
}
```

Ex: 4 *cœurs disponibles*



Seulement 2 *threads* créés

2 – Optimisation du parallélisme selon le couple calcul/machine

```
#pragma omp parallel for num_threads(nth)
for (int i = 0; i < N; i++) {
  ..... // Accès données et calculs
}
```

Selon les calculs et les accès aux données, le nbr optimal de tâches peut varier d'une architecture à l'autre

Equilibrage de charge

Paralléliser en équilibrant la charge

Quelle boucle paralléliser dans ce « nid de boucles » ?

```
void ActStock(double sqrtdt)
{
  int StkIdx, yIdx, xIdx;      // Loop indexes
  #pragma omp parallel private(StkIdx,yIdx,xIdx)
  {
   #pragma omp for
   for (StkIdx = 0; StkIdx < NbStocks; StkIdx++) {
     Parameters_t *parPt = &par[StkIdx];
     for (yIdx = 0; yIdx < Ny; yIdx++)     // Process each
       for (xIdx = 0; xIdx < Nx; xIdx++) {// "trajectory"
         float call;
         // - First pass
         call = ……;     // Calcul de Monte Carlo
         // - The passes that remain
         for (int stock = 1; stock <= StkIdx; stock++)
           call = ……; // Calcul de Monte Carlo
         // Copy result in the global GPU memory
         TabStockCPU[StkIdx][yIdx][xIdx] = call;
       }
   }
  }
}
```

On tente de paralléliser la boucle la plus externe (corps + conséquent)
Mais les premières itérations de la boucle externe durent moins longtemps…

Equilibrage de charge

Paralléliser en équilibrant la charge

Quelle boucle paralléliser dans ce « nid de boucles » ?

```
void ActStock(double sqrtdt)
{
  int StkIdx, yIdx, xIdx;      // Loop indexes
  #pragma omp parallel private(StkIdx,yIdx,xIdx)
  {
   for (StkIdx = 0; StkIdx < NbStocks; StkIdx++) {
     Parameters_t *parPt = &par[StkIdx];
     #pragma omp for
     for (yIdx = 0; yIdx < Ny; yIdx++)     // Process each
       for (xIdx = 0; xIdx < Nx; xIdx++) {// "trajectory"
         float call;
         // - First pass
         call = ……;     // Calcul de Monte Carlo
         // - The passes that remain
         for (int stock = 1; stock <= StkIdx; stock++)
           call = ……; // Calcul de Monte Carlo
         // Copy result in the global GPU memory
         TabStockCPU[StkIdx][yIdx][xIdx] = call;
       }
   }
  }
}
```

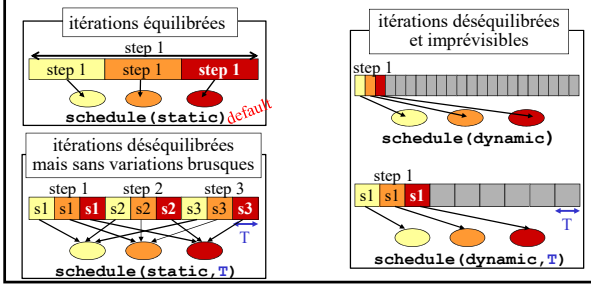
On tente de paralléliser la boucle la plus externe (corps + conséquent)
Mais ici, pour un bon équilibrage de charge statique : il faut paralléliser la 2ème boucle (et non pas la première)

Distributions équilibrées de boucles

Réglage du *scheduling* des *parallel for* :

`#pragma omp for private(…) schedule(mode,size) …`

- mode de répartition : **`static`**, **`dynamic`**, `guided`, `auto`, `runtime`
- taille des tâches : nombre d'itérations traitées



Distributions équilibrées de boucles

Réglage du *scheduling* des *parallel for* :

`#pragma omp for private(…) schedule(mode,size) …`

- mode de répartition : `static`, `dynamic`, **`guided`**, **`auto`**, **`runtime`**
- taille des tâches : nombre d'itérations traitées

`schedule(guided, chunk_size)` :
le nombre d'itérations de chaque tâche est fixé (sauf pour la dernière), mais pas le mode d'affectation des tâches (static/dyna.)

`schedule(auto)` :
le découpage des boucles en tâches est délégué au compilateur

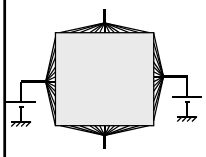
`schedule(runtime)` :
le découpage des boucles en tâches et leur affectation aux threads, se fera à l'exécution seulement

Suppose un compilateur ou un middleware *intelligent*

Programmation OpenMP (par partage de mémoire)

1. Principes d'OpenMP
2. Détails de syntaxe et de sémantique
3. Optimisations
4. **Exemples de parallélisation**
5. Bilan d'OpenMP
6. Mesures et représentation de performances

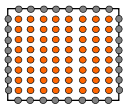
Parallélisation de la relaxation de Jacobi



Calcul des lignes de potentiel dans une plaque diélectrique :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

- Discrétisation et équation aux différences
- Itération jusqu'à la convergence ($V^{n+1}_{i,j} - V^{n}_{i,j} < \varepsilon$)



« stencil »

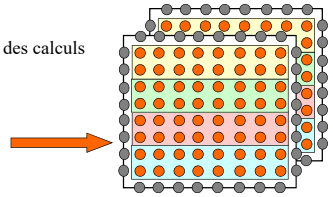
- Condition aux limites : V fixé
- $V^{n+1}_{i,j} = \frac{V^{n}_{i-1,j} + V^{n}_{i+1,j} + V^{n}_{i,j-1} + V^{n}_{i,j+1}}{4}$

Parallélisation de la relaxation de Jacobi

Principe de parallélisation :

- Partitionnement des données et des calculs
- 2 tables (Vn et Vn+1) en ShM

Ex avec 4 *threads* de calcul :
- on donne une zone mémoire continue à chaque thread
- on partitionne la première dimension du tableau



Implantation OpenMP :

- Parallélisation de la boucle sur les lignes
- Utilisation d'une région parallèle plus globale (plus efficace)

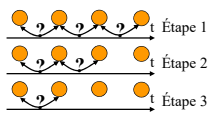
```
#pragma omp parallel private(c)
{
 for (c = 0; c < NbCycle; c++){
   int current = c%2
   int futur = (c+1)%2;
   #pragma omp for private(i,j)
   for (i = 0; i < N; i++)
     for (j = 0; j < N; j++)
       V[futur][i][j] = … … …
 }
}
```


Parallélisation du bubble-sort

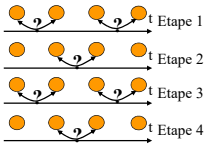
Principe du bubble-sort « *odd-even* » :

Pb : l'algorithme de base du *bubble-sort* est fortement séquentiel !

→ Modifier l'algorithme pour qu'il contienne du parallélisme potentiel !



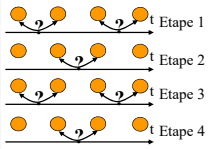
Bubble-sort « *odd-even* » :
- Même complexité
- Comparaisons indépendantes
- → Parallélisable !



Parallélisation du bubble-sort

Implantation du *bubble-sort* « *odd-even* »

- Définition d'une région globale (+ efficace)
- Parallélisations distinctes des 2 boucles de tri.




```
#pragma omp parallel private(step)
{
 for (step = N; step > 0; step--) {
   if (step % 2 == 0) {
      #pragma omp for private(i,buff)
      for (i = 0; i < N-1; i += 2)
         if (Tab[i] > Tab[i+1]) {
           buff = Tab[i];
           Tab[i] = Tab[i+1];
           Tab[i+1] = buff;
         }
   } else {
      #pragma omp for private(i,buff)
      for (i = 1; i < N-1; i += 2)
         if (Tab[i] > Tab[i+1]) {
           buff = Tab[i];
           Tab[i] = Tab[i+1];
           Tab[i+1] = buff;
         }
   }
 }
}
```


Parallélisation du quick-sort

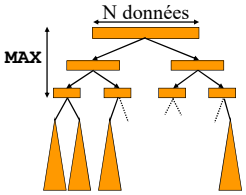
Principe de parallélisation simple du Quick-Sort

Appels récursifs → Créations récursives de *sections* parallèles

→ *« nested parallelism »* nécessaire

→ limiter la profondeur de la parallélisation (variable *DeepPar*), sinon trop de *threads*!

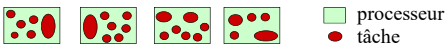
Algorithme parallèle peu efficace !
→ Il existe des algorithmes de quick-sort parallèle beaucoup plus performants



Parallélisation du quick-sort

Optimisation :

- Pb d'équilibrage de charge :
  - selon les pivots …. les *sections* sont plus ou moins importantes
  - solution possible : équilibrage statistique ! Nb Sections >> Nb Processeurs

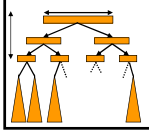


- Il faut donc créer beaucoup plus de *threads* qu'il n'y a de processeurs mais sans saturer les processeurs de *threads* !

Parallélisation du quick-sort

Implantation d'une parallélisation simple du Quick-Sort

Région parallèle & sections & réplication de code (OpenMP-1)



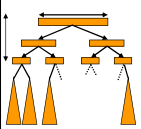
```
void quicksort(int q, int r, int deep)
{
  …
  if (q < r) {
    …… // split the table …
       // classic quick-sort op

    if (deep < MAX) {
      #pragma omp parallel
      {
        #pragma omp sections nowait
        {
          #pragma omp section
          { quicksort(q,s-1,deep+1);}
          #pragma omp section
          { quicksort(s+1,r,deep+1);}
        }
      }
    } else {
      quicksort(q,s-1,deep+1);
      quicksort(s+1,r,deep+1);
    }
  }
}
```


Parallélisation du quick-sort

Implantation d'une parallélisation simple du Quick-Sort

Région parallèle & clause conditionnelle & sections (OpenMP-2)



```
void quicksort(int q, int r, int deep)
{
  …
  if (q < r) {
    …… // split the table …
       // classic quick-sort op

    #pragma omp parallel if(deep < MAX)
    {
      #pragma omp sections nowait
      {
        #pragma omp section
        { quicksort(q,s-1,deep+1);}
        #pragma omp section
        { quicksort(s+1,r,deep+1);}
      }
    }
  }
}
```

Programmation OpenMP (par partage de mémoire)

1. Principes d'OpenMP
2. Détails de syntaxe et de sémantique
3. Optimisations
4. Exemples de parallélisation
5. **Bilan d'OpenMP**
6. Mesures et représentation de performances

Bilan

Stratégies :

I - Algorithmes réguliers contenant un fort parallélisme naturel :

- conserver l'algorithme classique
- compléter l'implantation séquentielle

→ T_{dev} faible, Performances élevées

OK

II - Algorithmes irréguliers ou contenant peu de parallélisme naturel :

conservation de l'algorithme ajouts au code séquentiel → T_{dev} faible, Perfs moyennes	conception d'un nouvel algo nouvelle implantation → T_{dev} élevé, Perfs élevées

OpenMP ne dispense pas de connaître l'algorithmique parallèle !

Multithreading with OpenMP

Questions ?