Cours 5 : Introduction à OpenMP

(diapos de P. Fortin)

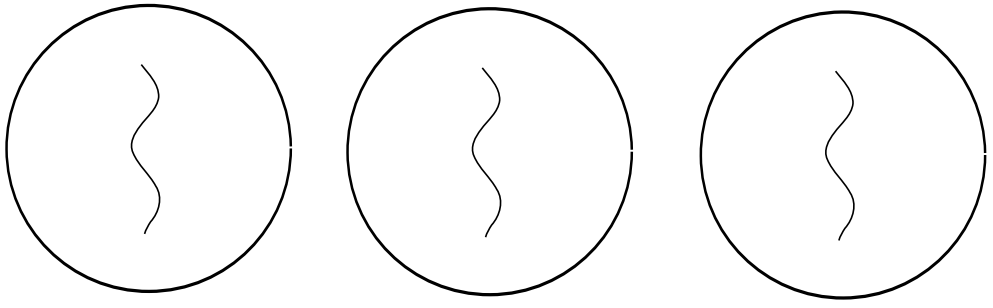
Charles Bouillaguet
charles.bouillaguet@univ-lille.fr

2020-02-14

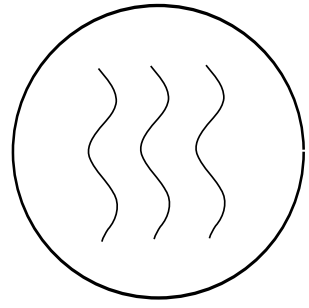
Notions de processus et de thread

Processus : « flot d'exécution » + « espace mémoire »
Thread : « flot d'exécution »

Eléments propres à chaque processus	Eléments propres à chaque thread
Espace d'adressage	Compteur ordinal
Variables globales	Registres
Fichiers ouverts	Pile (dont variables locales)
Processus enfant, signaux...	Etat

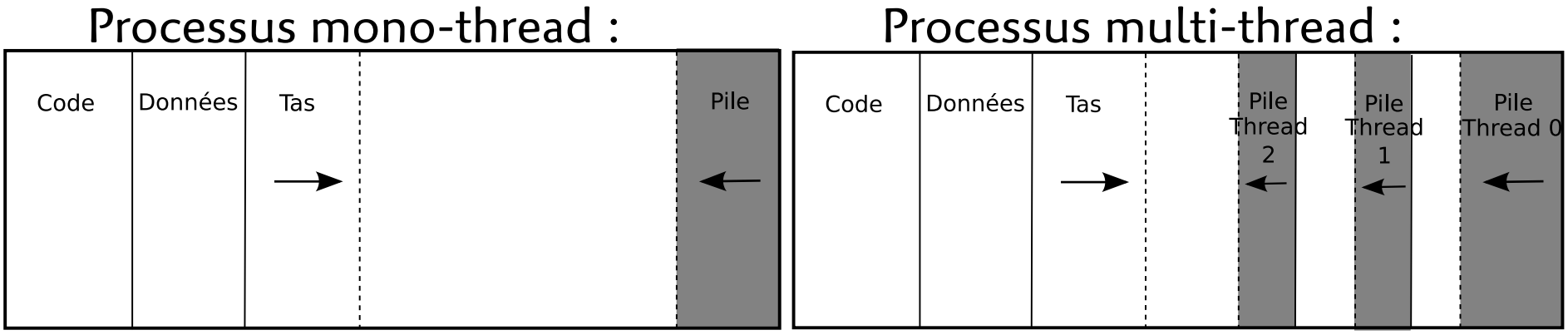


Mode multi-processus



Mode multi-thread

Threads et processus (suite)



Toute la mémoire du processus est potentiellement accessible à tous les threads. En pratique, on distingue :

- variables partagées : variables globales ou statiques (segment de données), variables du tas avec pointeur connu de tous les threads
  $\rightarrow$ Attention aux conflits d'accès à un même emplacement mémoire (*race condition*) ! Exemple : `i = i + 1 ;`
- variables privées : variables locales (pile), variables du tas avec pointeur privé

Programmation en mode multi-thread

Plusieurs expressions possibles du parallélisme :

- parallélisme explicite : threads POSIX
- parallélisme partiellement implicite : OpenMP

$\Rightarrow$ On s'intéresse ici uniquement à OpenMP.

Plusieurs programmations possibles en OpenMP :

- fonctions OpenMP $\rightarrow$ mode SPMD
  - détermination du travail de chaque thread en fonction de son identifiant (comme MPI, threads POSIX...)
  - efficace mais importantes modifications du code
- directives OpenMP (*#pragma* en C et C++, commentaires en Fortran)
  - objectif : parallélisation des nids de boucles
  - préserve le code initial
  - plus souple (équilibrage de charge)
  - l'efficacité dépend du parallélisme présent dans les boucles

$\Rightarrow$ On privilégie ici les directives OpenMP.

Avantages et inconvénients respectifs d'OpenMP / MPI

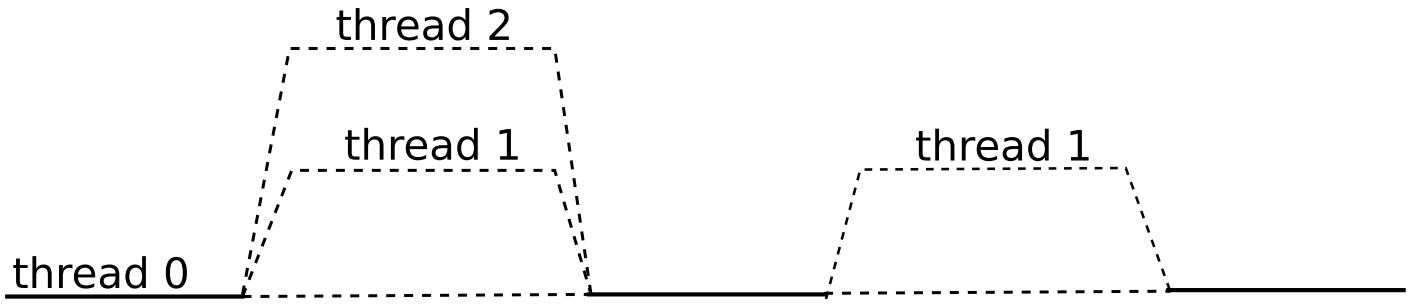
- Avantages d'OpenMP :
  - plus facile à programmer / mettre au point que MPI
  - préserve le code séquentiel original
  - code plus facile à comprendre/maintenir
  - permet une parallélisation progressive
- Inconvénients d'OpenMP :
  - machines à mémoire partagée uniquement
  - adapté à certains schémas de calcul (boucles parallèles ...)
- Avantages de MPI :
  - s'exécute sur machines à mémoire partagée ou distribuée
  - appliquable plus largement qu'OpenMP
  - chaque processus a ses propres variables (pas de conflits)
- Inconvénients de MPI :
  - modifications algorithmiques souvent nécessaires
  - peut être plus dur à mettre au point
  - la performance peut dépendre du réseau de communication utilisé

Historique d'OpenMP

- Échec des différents essais de normalisation
- Nécessité de développer un standard pour développer des programmes pour des machines parallèles **à mémoire partagée**
- 28 octobre 1997, des industriels et des constructeurs adoptent OpenMP (*Open Multi Processing*) comme un standard industriel.
- Novembre 2000 : définition d'OpenMP-2
- Version présentée ici : version 2.5 (depuis 2005)
- Version 3.0 (2008) : nouvelle notion de tâche (*task*)
- Version 4.0 (2013) : directives pour génération de code SIMD et de code pour accélérateurs matériels (GPU...)
- Interface en Fortran, C et C++

Principe de base

- Un processus unique est exécuté sur une machine parallèle à mémoire partagée. Le thread correspondant est le thread « maître » (de numéro 0).
- Des parties de programme sont exécutés en parallèle par des threads selon le modèle *fork and join* :



- La déclaration des zones parallèles se fait à l'aide de directives OpenMP.
- Modèle mémoire OpenMP particulier : le programmeur peut choisir si une variable est *privée* ou *partagée*.

Création d'un programme OpenMP

- Compilation : les directives de compilation (*#pragma* en C et C++, commentaires en Fortran) sont interprétées si le compilateur les reconnaît. Dans le cas contraire, elles sont assimilées à des commentaires. Les directives indiquent au compilateur comment paralléliser le code.
- Édition de liens : bibliothèques particulières OpenMP
- Exécution : des variables d'environnement sont utilisées pour paramétrer l'exécution

Création d'un programme OpenMP

test.c :

```c
#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#endif

int main()
{
  #pragma omp parallel
  {
    printf("En parallele !\n");
    printf("Toujours //  !\n");
  }

  printf("En sequentiel.\n");
}
```

test2.c :

```c
#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#endif

int main()
{
  #pragma omp parallel
  printf("En parallele !\n");

  printf("En sequentiel.\n");
}
```

Compilation et exécution

Compilation

```
gcc test2.c -o test2
gcc -fopenmp test2.c -o test2_openmp
```

Exécution 1 :

```
$ ./test2
En parallele !
En sequentiel.
```

Exécution 2 :

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./test2_openmp
En parallele !
En parallele !
En parallele !
En parallele !
En sequentiel.
```

Compilation conditionnelle - fonctions OpenMP

Compilation conditionnelle :

```
#ifdef _OPENMP

#endif
```

Fonctions OpenMP :

Permettent un mode de programmation SPMD.

- `omp_get_num_threads()`
- `omp_get_thread_num()`
- `omp_set_num_threads()`
- ...

Hello world

Programme

```
#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#endif

int main()
{
  #pragma omp parallel
  {
    #ifdef _OPENMP
    printf("Hello world thread %d/%d\n",
           omp_get_thread_num(),
           omp_get_num_threads());
    #else
    printf("Hello world\n");
    #endif
  }
}
```

Exécution

```
$ gcc hello.c -o hello
$ ./hello
Hello world
$ gcc -fopenmp hello.c \
 -o hello
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./hello
Hello world thread 0/4
Hello world thread 3/4
Hello world thread 1/4
Hello world thread 2/4
```

Les directives OpenMP

Elles sont délimitées par une sentinelle :

```
#pragma omp directive [clause[[, ]clause]...]
```

Par défaut, il y a une barrière de synchronisation à la fin.

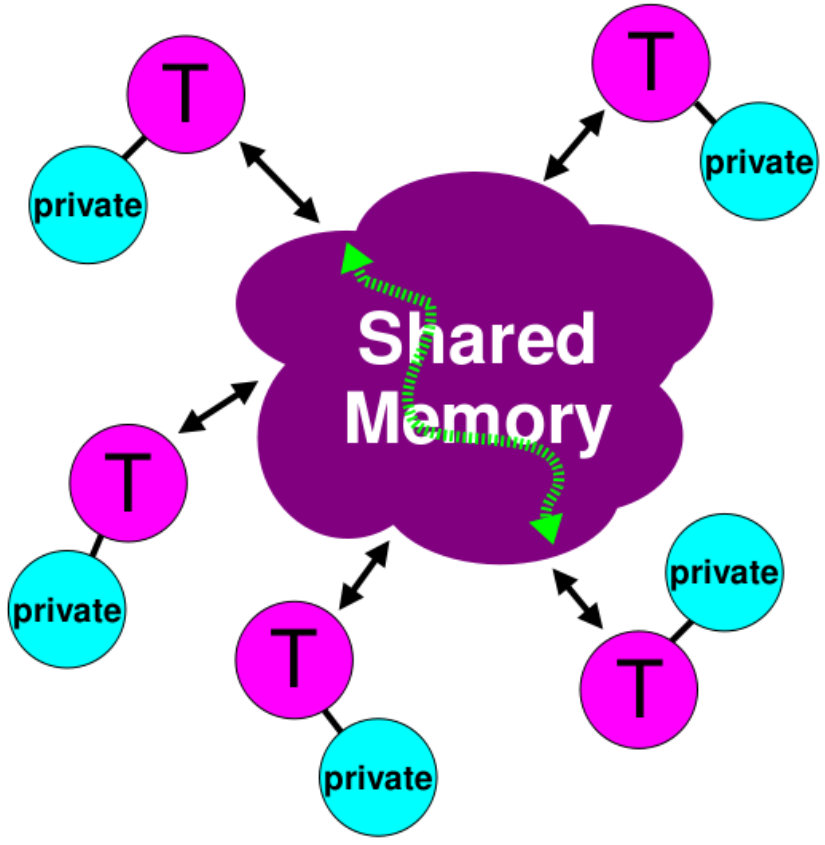
Utilisation des directives OpenMP :

- débranchement externe interdit ! (~~goto~~, ~~setjmp/longjmp~~, ...)
- une seule directive par sentinelle
- majuscule/minuscule importante
- les directives sont : `parallel`, `for`, `sections`, `section`, `single`, `master`, `critical`, `barrier`, `atomic`, `flush`, `ordered`, `threadprivate`

Le modèle mémoire OpenMP

Les variables du code source séquentiel original peuvent être partagées (*shared*) ou privées (*private*) en OpenMP.

- **Variable partagée** : chaque thread accède à la même et unique variable originale.
- **Variable privée** : chaque thread a sa propre copie de la variable originale.



(d'après *An Overview of OpenMP 3.0*, R. van der Pas, IWOMP2009)

Le modèle mémoire OpenMP (suite)

- **Par défaut, les variables présentes au début de la région parallèle sont partagées.**
- On peut modifier leur statut avec `private`, `shared`, `firstprivate`, `lastprivate`, `default(shared)`, `default(none)`, `reduction`, `copyin`
- Les variables locales à un thread (i.e. variables locales d'une fonction appellée par un thread depuis une région parallèle, et variables déclarées dans une région parallèle) sont privées.
- **Synchronisations implicites** entre la mémoire principale et la mémoire "locale" ("vue temporaire") de chaque thread (au début et à la fin de certaines directives).

Directive `parallel`

```
#pragma omp parallel [clause[[, ]clause]...]
bloc structuré
```

Définit une région parallèle.

Liste des clauses associées à cette directive :

- `if` (*scalar_expression*) : les threads sont créés si la clause n'est pas présente ou si l'évaluation de *scalar_expression* est non nulle.
- `private` (*liste_de_variables*), `firstprivate` (*liste_de_variables*), `default` (share | none), `copyin`(*liste_de_variables*)
- `reduction`(*opérateur : liste_de_variables*)
- `num_threads`(*expression_entière*) indique explicitement le nombre de threads exécutant cette région parallèle.

```
int main()
{
    ...
    initialisation();
    #pragma omp parallel ...
    {
        calcul()
    }
    post_calcul();
}
```

Il existe en fait plusieurs possibilités pour définir le nombre de threads (par ordre de priorité décroissante) :

#pragma	:	#pragma omp parallel num_threads(16)
au cours de l'execution	:	*omp_set_num_threads(4)*
variable d'environnement	:	export OMP_NUM_THREADS=4

Les variables sont partagées par défaut

Programme

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

int main()
{
  int c=0;

  #pragma omp parallel
  {
    c++;
    printf("c=%d thread %d\n",
        c, omp_get_thread_num());
  }
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
c=1 thread 3
c=2 thread 0
c=3 thread 1
c=4 thread 2
```

Attention aux conflits !

Programme

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

int main()
{
  int c = 0;

  #pragma omp parallel
  {
    for (int i=0; i<100000; i++)
        c++;
    printf("c=%d thread %d\n",
        c, omp_get_thread_num());
  }
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
c=100000 thread 0
c=200000 thread 3
c=270620 thread 2
c=286162 thread 1
```

Clause `firstprivate`

Les variables nommées dans `firstprivate` sont locales (privées) aux threads, mais la valeur qu'elles avaient avant d'entrer dans la partie parallèle est conservée

Programme

```
int main()
{
int a = 100;
#pragma omp parallel \
                firstprivate(a)
{
  a = a + 10;
  printf("a=%d\n", a);
}
printf("Après a=%d\n", a);
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
a=110
a=110
a=110
a=110
Apres a=100
```

Clause `private`

Les variables nommées dans `private` sont locales (privées) aux threads. Elles sont créés à l'initialisation du thread et NON initialisées.

Un exemple de BUG aléatoire :

Programme

```
int main()
{
  int a = 100;
  #pragma omp parallel private(a)
  {
    a = a + 10;
    printf("a=%d\n", a);
  }
  printf("Apres a=%d\n", a);
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
a=-1208433038
a=-22
a=-22
a=-22
Apres a=100
```

Variables locales

Toutes les variables locales de fonctions appelées depuis une partie parallèle sont locales (privées) aux threads.
Idem pour les variables déclarées dans le bloc parallèle `{..}`.

Programme

```
void func()
{
  int a = 10;
  a += omp_get_thread_num();
  printf("a=%d\n", a);
}

int main()
{
  #pragma omp parallel
  func();
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ test2
10
11
12
13
```

Variables locales (suite)

Compliqué (à éviter)

```
int main()
{
  int a;
  #pragma omp parallel private(a)
  {
    a = ...;
    ...
  }
}
```

Simple (à privilégier)

```
int main()
{

  #pragma omp parallel
  {
    int a = ...;
    ...
  }
}
```

Rappels / Précisions

`#pragma omp parallel`

- Une **équipe de threads** est crée.
- Celui qui a rencontré la directive en fait partie (**maître**).
- Tous les threads de l'équipe exécutent le code qui suit.
- Identifiants 0 (maître), 1, 2, ..., #threads - 1.
  - `omp_get_num_threads()`, `omp_get_thread_num()`
- **Barrière** à la fin.
- Le thread de départ reprend seul l'exécution après.

La directive `for`

```
#pragma omp for  [clause[[, ]clause]...]
⟨ boucle for ⟩
```

Directive de partage de travail

Les threads de l'équipe coopèrent et se **répartissent** le travail.

Clauses associées :

- `private` (*liste_de_variables*), `firstprivate` (*liste_de_variables*),`lastprivate` (*liste_de_variables*)
- `reduction`(*opérateur : liste_de_variables*)
- `ordered`
- `collapse`(*n*)
- `schedule`(*type*, *taille*)
- `nowait`

La directive `for` (2)

Forme canonique des boucles

`for` (*expr_init* ; *expr_logique* ; *increment*)

- L'indice est de type entier.
- L'incrémentation est de la forme $++$, $--$, $+=$, $-=$, $var = var + inc$, $var = inc + var$, $var = var - inc$, avec un incrément entier.
- Test : $<$, $>$, $<=$, $>=$. La borne est une expression invariante.
- Pas de sortie prématurée de la boucle (`break`, `return`, `exit`).

Conséquences de la directive `for` :

- Barrière implicite à la fin du `for` (sauf si `nowait`).
  - Pas de barrière au début.
- **L'indice est une variable privée.**

Exemple

```
#include <omp.h>

int main()
{
  int t[100];
  #pragma omp parallel
  {
    #pragma omp for
    for (int i = 0; i < 100; i++) {
      t[i] = i;
    }
  }
}
```

Avec 4 threads, le premier peut **par exemple** calculer les t[i] de 0 a 24, le second de 25 a 49, ...

Clause `lastprivate`

Les variables nommées dans `lastprivate` sont locales (privées) aux threads. A la fin de la partie parallèle, elles sont affectées avec les valeurs obtenues par la dernière itération (itération $N - 1$).

Programme

```
int a;

#pragma omp parallel
#pragma omp for lastprivate(a)
for(int i = 0; i < 4; i++) {
    a=i*10
    printf("PAR a=%d thread %d \n",
                a, omp_get_thread_num());
}
printf("SEQ a=%d %d\n", a);
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
PAR a=0 thread 0
PAR a=10 thread 1
PAR a=20 thread 2
PAR a=30 thread 3
SEQ a=30
```

Forme raccourcie pour la directive `for`

`#pragma omp parallel for` *[clause[[,]clause]...]*
boucle for

Cette directive admet toutes les clauses de `parallel` et de `for` à l'exception de `nowait`.

```
#pragma omp parallel
#pragma omp for
for (int i = 0 ; i < 4 ; i++) {
    ....
}

#pragma omp parallel for
for (int i = 0 ; i < 4 ; i++) {
    ....
}
```

La clause reduction

Programme

```
int main()
{
  int a[4][4], s=0;
  for (int i = 0; i < 4; i++)
      for (int j = 0; j < 4; j++)
        a[i][j] = i * 4 + j;
  #pragma omp parallel for reduction(+:s)
  for (int i = 0 ; i < 4 ; i++) {
      for (int j = 0; j < 4; j++)
          s += a[i][j];
      printf("PAR=%d : i=%3d  s=%d\n",
           omp_get_thread_num(), i, s);
    }
  }
  printf("SEQ s=%d\n", s);
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
PAR=0 : i=  0  s=6
PAR=1 : i=  1  s=22
PAR=2 : i=  2  s=38
PAR=3 : i=  3  s=54
SEQ s=120
```

La clause `reduction` (suite)

Opérateurs : `+`, `-`, `*` , `&`, `|`, `^`, `&&`, `||`, `min`, `max`

Autorisé sur `omp for`, `omp parallel`, ...

```
int main()
{
  int m = 0;
  #pragma omp parallel reduction(max:m)
  {
    int tid = omg_get_thread_num();
    m = f(tid);
  }
  ...
}
```

Nouveauté dans `reduction`

- `reduction` sur des *tableaux*
- ... ou des portions de tableau
- Depuis OpenMP 4.5 (novembre 2015, gcc ≥ 6.1)

```
double *A = malloc(n * sizeof(*A));
...
#pragma omp parallel reduction(+:A[0:n])
{
    ....
    #pragma omp for
    for (int i = 0; i < n; i++) {
       A[i]= ....
    }
    ....
}
```

Répartition de charge dans les boucles

`omp for` admet des clauses : `schedule` et `nowait`

- clause `nowait` :
  Par défaut, il y a une synchronisation à la fin de la boucle.

- clause `schedule(mode, chunk_size)` :
  4 modes : `static, dynamic, guided, runtime`

Par défaut, le choix dépend de l'implémentation d'OpenMP utilisée.

Exemple schedule

```c
#define MAX 10
int main()
{
  int a[MAX];
  #pragma omp parallel
  {
      int imax = 0;
      int imin = MAX;
      #pragma omp for schedule(static)
      for (int i = 0; i < MAX; i++) {
          imin = (i < imin) ? i : imin;
          imax = (i > imax) ? i : imax;
          a[i] = 1;
          sleep(1); /* pour augmenter la charge */
          printf("%3d:%3d\n",omp_get_thread_num(), i);
      }
      printf("T%d imin=%d imax=%d\n", omp_get_thread_num(), imin, imax);
  }
}
```

Clauses `static` et `dynamic`

schedule(...)

static

```
  1:  3
  3:  8
  2:  6
  0:  0
  1:  4
  3:  9
  2:  7
  0:  1
  1:  5
  0:  2
T1 imin=3 imax=5
T0 imin=0 imax=2
T2 imin=6 imax=7
T3 imin=8 imax=9
```

static, 2

```
  1:  2
  3:  6
  2:  4
  0:  0
  1:  3
  3:  7
  0:  1
  2:  5
  0:  8
  0:  9
T0 imin=0 imax=9
T1 imin=2 imax=3
T3 imin=6 imax=7
T2 imin=4 imax=5
```

dynamic, 2

```
  1:  4
  0:  0
  2:  6
  3:  2
  1:  5
  2:  7
  0:  1
  3:  3
  1:  8
  1:  9
T1 imin=4 imax=9
T3 imin=2 imax=3
T2 imin=6 imax=7
T0 imin=0 imax=1
```

schedule

- `schedule(static)` : chaque thread a un bloc de la même taille.
- `schedule(static, n)` : `n` indique la taille des paquets (*chunk*). Distribution bloc-cyclique.
- `schedule(dynamic, n)`, les paquets sont affectés aux premiers threads disponibles.
  Valeur de *n* par défaut : `1`.
- `guided` : équilibrage de charge dynamique avec une taille de paquet proportionnelle au nombre d'itérations encore non attribuées divisé par le nombre de threads (taille décroissante vers 1)
- `auto` : OpenMP se débrouille.
- `runtime` : le choix est reporté à l'exécution
  Exemple : `export OMP_SCHEDULE="static,1"`

Clause et directive ordered

exécution séquentielle $\longrightarrow$ débogage et usage rare

```
#pragma omp parallel
{
        int imax = 0;
        int imin = MAX;
        #pragma omp for ordered schedule(static, 2)
        for(int i = 0; i < MAX; i++) {
          int t;
          imin = (i < imin) ? i : imin;
          imax = (i > imax) ? i : imax;
          a[i ] =i;
          #pragma omp ordered
          printf("%3d:%3d\n",omp_get_thread_num(), i);
        }
        printf("thread %d imin=%d imax=%d\n",
                omp_get_thread_num(),imin,imax);
}
```

Directive `sections`

Chaque section est exécutée par un unique thread (assez rare).

```
#pragma omp sections [clause[[, ]clause]...]
{
[#pragma omp section ]
bloc structuré
[#pragma omp section
bloc structuré]
...
}
```

Listes des clauses possibles :

- `private` (*liste_de_variables*), `firstprivate` (*liste_de_variables*),`lastprivate` (*liste_de_variables*)
- `reduction`(*opérateur : liste_de_variables*)
- `nowait`

Directives `sections`

Programme

```
#pragma omp parallel
#pragma omp sections
{
  #pragma omp section
  printf("section 1 thread %d\n",
              omp_get_thread_num());
  #pragma omp section
  printf("section 2 thread %d\n",
             omp_get_thread_num());
  #pragma omp section
  printf("section 3 thread %d\n",
              omp_get_thread_num());
  #pragma omp section
  printf("section 4 thread %d\n",
              omp_get_thread_num());
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=3
section 1 thread 0
section 2 thread 0
section 3 thread 1
section 4 thread 2
```

Directive `single`

```
#pragma omp single  directive [clause[[, ]clause]...]
bloc structuré
```

But : définir, dans une région parallèle, une portion de code qui sera exécutée par un seul thread.

- Barrière implicite à la fin de `single`.
- `nowait` et `copyprivate` sont incompatibles.
- Rien n'est dit sur le thread qui exécute la directive.

Listes des clauses possibles :

- `private` (*liste_de_variables*), `firstprivate` (*liste_de_variables*), `copyprivate` (*liste_de_variables*)
- `nowait`

Directive `single`

Programme

```
int main()
{
  int a = 10;
  #pragma omp parallel firstprivate(a)
  {
    #pragma omp single
    a = 20;

    printf("thread %d a=%d\n",
        omp_get_thread_num(), a);
  }
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
thread 0 a=20
thread 1 a=10
thread 3 a=10
thread 2 a=10
```

Directive `master`

```
#pragma omp master
bloc structuré
```

- Pas de clause
- **Pas de barrière implicite**
- Seul le thread 0 (master) exécute le code associé

Synchronisations en OpenMP

Plusieurs possibilités :

- barrières
- directives `atomic` et `critical`
- verrous via fonctions OpenMP (non traitées ici) :
  `omp_init_lock()`
  `omp_{set,test}_lock()`
  `omp_unset_lock()`
  `omp_destroy_lock()`

Directive `barrier`

```
#pragma omp barrier
```

Lorsqu'un thread rencontre une barrière, il attend que tous les autres soient arrivés à ce même point.

Remarque : pour des problèmes de syntaxe C :

```
if (n != 0)
      #pragma omp barrier
```

est incorrect.

```
if (n != 0) {
      #pragma omp barrier
}
```

est correct.

Directive `atomic`

```
#pragma omp atomic
expression-maj
```

- La mise à jour est atomique.
- L'effet ne concerne que l'instruction suivante.
- *expression-maj* est de la forme :
  - `++x, x++, --x, x--`
  - *x binop= expr ;*
    x = x binop expr ;
    x = expr binop x ;
    - *binop* $\in \{+, *, -, /, \&, \wedge, |, >>, <<\}$,
    - l'expression *expr* ne doit pas faire référence à *x*.
- Seul le chargement et la mise à jour de la variable forment une opération atomique, l'évaluation de l'expression *expr* ne l'est pas.

Programme

```
#include <omp.h>

int main()
{
  int c = 0;
  #pragma omp parallel
  {
    for (int i = 0; i < 100000; i++) {
       #pragma omp atomic
       c++;
    }
    printf("c=%d thread %d\n",
      c, omp_get_thread_num());
  }
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
c=100000 thread 0
c=294308 thread 2
c=394308 thread 3
c=400000 thread 1
```

Directive `atomic` avancée (depuis OpenMP 3.0, 2008)

```
#pragma omp atomic [ update | capture ]
expression-maj
ou :
#pragma omp atomic capture
bloc-structuré
```

- La clause `update` est équivalente à l'absence de clause.
- Pour la clause `capture`, `expression-maj` peut être :

`v = x++;`	`v = x binop= expr;`
`v = x--;`	`v = x = x binop expr;`
`v = ++x;`	`v = x = expr binop x;`
`v = --x;`	

où `x`, `v` sont des expressions *l-values* de type scalaire, et `expr` est une expression de type scalaire (voir autres contraintes sur slide précédent et dans la norme).

Directive `atomic` avancée (suite) (depuis OpenMP 3.0)

- Pour la clause `capture` (suite), `bloc-structuré` peut être :

```
{v = x; x binop= expr;}
{x binop= expr; v = x;}
{v = x; x = x binop expr;}
{v = x; x = expr binop x;}
{x = x binop expr; v = x;}
{x = expr binop x; v = x;}
{v = x; x = expr;}
```

```
{v = x; x++;}
{v = x; ++x;}
{++x; v = x;}
{x++; v = x;}
{v = x; x--;}
{v = x; --x;}
{--x; v = x;}
{x--; v = x;}
```

Directive `critical`

```
#pragma omp critical [nom]
bloc structuré
```

- Un seul thread à la fois peut exécuter le *bloc stucturé*
- « **section critique** »
- Le thread est bloqué à l'entrée du bloc structuré tant qu'un autre thread exécute un bloc portant le même nom.
- Le nom est utile pour l'édition multi-fichiers et pour distinguer des sections critiques indépendantes.

Exemple de directive `critical`

Ajout d'un nouvel élément au début d'une liste chaînée

```
struct item_t {
  int val;
  struct item_t *next;
};
...
struct item_t *list = (struct item_t *) malloc(sizeof(*list));
...
#pragma omp parallel
{
   ...
   (struct item_t *) nouv =  malloc(sizeof(*nouv));
   nouv->val = ...
   #pragma omp critical
   {
      nouv->next = list;
      list = nouv;
   }
   ...
}
```

Différence `atomic, critical`

`atomic :`

- destinée à la mise à jour de variables
- dépend du matériel et de l'OS
  - instructions atomiques du processeur

`critical :`

- destinée à englober une partie plus importante de code
- implémentation avec des verrous a priori

Différence `atomic, critical`

`atomic :`

- destinée à la mise à jour de variables
- dépend du matériel et de l'OS
  - instructions atomiques du processeur
- À privilégier si possible.

`critical :`

- destinée à englober une partie plus importante de code
- implémentation avec des verrous a priori

Directive `threadprivate`

Permet de définir le statut des variables globales ou statiques dans les threads (usage pas très fréquent).

Une variable `threadprivate` ne doit pas apparaître dans une autre clause sauf pour `copyin`, `copyprivate`, `schedule`, `num_thread`, `if`.

Une variable `threadprivate` ne doit pas être une référence (C++).

Directive threadprivate

Programme

```
int a = 10;  // variable globale
#pragma omp threadprivate(a)

int main()
{
    #pragma omp parallel
    {
        int rang = omp_get_thread_num();
        a += rang;
        printf("thd=%d a=%d\n", rang, a);
    }
    printf("SEQ a=%d\n",a);
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ ./a.out
thd=0 a=10
thd=3 a=13
thd=1 a=11
thd=2 a=12
SEQ a=10
```

Parallélisme imbriqué (nesting)

- une directive `parallel` dans une directive `parallel`
- un certain nombre de règles sont à respecter (cf. spec.)
- une variable d'environnement : `OMP_NESTED` doit prendre la valeur TRUE (ou FALSE) pour autoriser (ou non) le parallélisme imbriqué (non autorisé par défaut).

Parallélisme imbriqué

Programme

```
#define MAX 4

#pragma omp parallel for
for (int i = 0; i < MAX; i++) {
    #pragma omp parallel for
    for (int j = 0; j < MAX; j++) {
      printf("%3d:(%2d,%2d) \n",
          omp_get_thread_num(), i, j);
    }
}
```

Exécution

```
$ export OMP_NUM_THREADS=4
$ export OMP_NESTED=TRUE
  0:( 2, 0)
  2:( 2, 2)
  0:( 0, 0)
  3:( 2, 3)
  3:( 0, 3)
  3:( 1, 3)
  2:( 1, 2)
  0:( 1, 0)
  1:( 1, 1)
  1:( 2, 1)
  1:( 0, 1)
  2:( 0, 2)
  3:( 3, 3)
  0:( 3, 0)
  1:( 3, 1)
  2:( 3, 2)
```

Bibliothèque OpenMP

Liste des fonctions :

- `void omp_set_num_threads(int num_thread)` : fixe le nombre de threads utilisable par le programme. L'appel doit se situer dans une région séquentielle. Dans une région parallèle, le comportement est inconnu.
- `int omp_get_num_threads(void)`
- `int omp_get_max_threads(void)` : retourne le nombre de threads maximum qui sera utilisé pour la prochaine région parallèle (valable si la clause `num_threads` n'est pas utilisée).
- `int omp_get_thread_num(void)`
- `int omp_get_num_procs(void)`
- `int omp_in_parallel(void)` : retourne un entier non nul si l'appel a lieu dans une région parallèle.

Bibliothèque OpenMP (2)

Liste des fonctions :

- `void omp_set_nested(int` *nested*`)` : *nested* prend pour valeur 0 pour désactiver l'imbrication du parallélisme. L'appel doit se situer dans une région séquentielle. Dans une région parallèle, le comportement est inconnu.
- `int omp_get_nested(void)`

- `double omp_get_wtime(void)` la différence entre deux appels permet de calculer le *wall-clock time* en secondes.
- `int omp_get_wtick(void)`

Les variables d'environnement

- `OMP_NUM_THREADS`
- `OMP_SCHEDULE` :

```
export OMP_SCHEDULE="static,4"
export OMP_SCHEDULE="dynamic"
```

- `OMP_NESTED`
- …

Cheat Sheet

Le plus courant

- Le *must* : `#pragma omp parallel for`
- Directive `atomic` et `critical`
- Clauses `schedule`, `reduction` et `lastprivate`

Moins courant : mode SPMD

- Région parallèle avec `#pragma omp for` dedans
- `omp_get_thread_num()` et `omp_get_num_threads()`
- Directives `barrier`, `master` ou `single`

Plus rare (réservé aux cas durs mais pas seulement...)

Tout le reste !

Threads POSIX

Bibliothèque `pthread`

- POSIX = Portable Operating System Interface for uniX
- Threads POSIX = interface portable pour
  - Créer des threads
  - Synchroniser des threads entre eux

Programmation « bas-niveau »

- Parallélisme explicite (et gestion « manuelle »)
- Débugage potentiellement ardu

Threads POSIX (suite)

Modèle « *fork/join*

```c
#include <pthread.h>
int pthread_create(pthread_t *thread, const pthread_attr_t *attr,
                   void *(*start_routine) (void *), void *arg);
int pthread_join(pthread_t thread, void **retval);
```

Gestion de la mémoire

- Tout l'espace du processus accessible à tous les threads
- Variables « privées » (sur la pile de chaque thread)
- Variables globales $\rightarrow$ partagées
- Variables sur le tas $\rightarrow$ partagées (si adresse connue)

Tâches OpenMP (depuis v3.0, 2008)

Point d'orthographe

Tache marque, salissure, souillure. *Une tache d'encre.*

Tâche travail à exécuter. *Une tâche ardue.*

Tâches OpenMP (depuis v3.0, 2008)

Point d'orthographe

Tache marque, salissure, souillure. *Une tache d'encre.*

Tâche travail à exécuter. *Une tâche ardue.*

« Rappel » : `#pragma omp parallel`

- Une **équipe de threads** est crée.
- ...
- Une **tâche implicite** est créée pour chaque thread.
- Elle lui est **liée** (peut pas migrer sur un autre thread)

tâche = code + données associées, le tout exécuté par un thread.

Directive `omp task`

```
#pragma omp task [clause], [clause], ...
bloc structuré
```

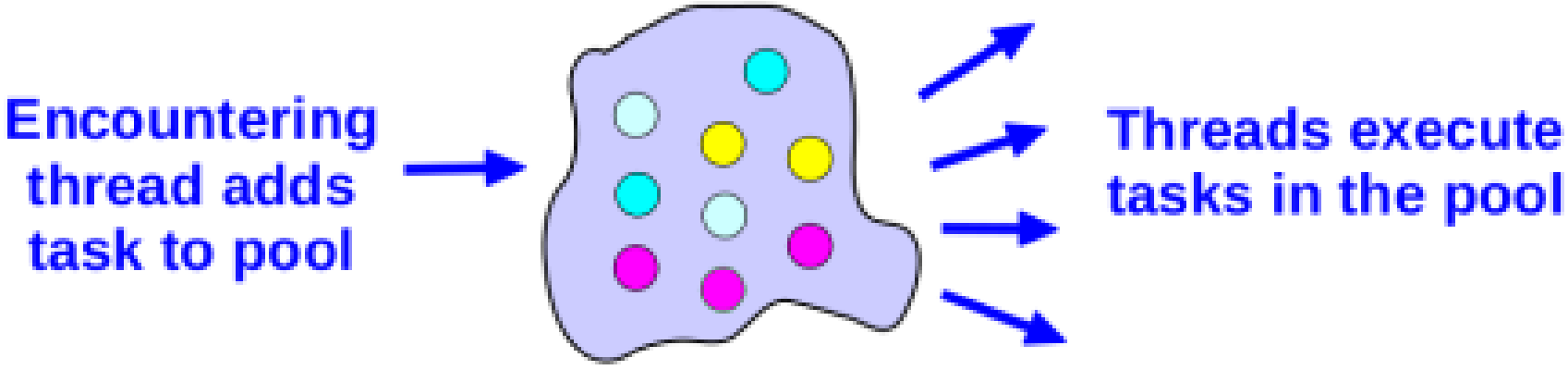
- Le thread qui rencontre ceci crée une **tâche explicite**.
- Exécution immédiate ou différée.
- Exécution par un des threads de l'équipe... si disponible.

Directive `omp task`

```
#pragma omp task [clause], [clause], ...
bloc structuré
```

- Le thread qui rencontre ceci crée une **tâche explicite**.
- Exécution immédiate ou différée.
- Exécution par un des threads de l'équipe... si disponible.
- Un thread peut suspendre l'exécution d'une tâche et en démarrer/reprendre une autre...
- ... Mais seulement à certains moments : *task scheduling points*

« Task Pool »



Developer specifies tasks in application
Run-time system executes tasks

(An Overview of OpenMP 3.0, R. van der Pas, IWOMP2009)

Synchronisation des tâches

Modèle *Fork/Join*

Barrières « normales »

- Implicites : à la fin d'une région parallèle, de `omp for`, ...
- Explicites : **#pragma omp barrier**

Garantie : Toutes les tâches crées par un thread de l'équipe courante sont terminées à la sortie de la barrière.

Barrière de tâches : **#pragma omp taskwait**

- La tâche courante attend la terminaison de ses tâches filles.
- Seulement filles directes, pas descendantes.

Exemple : parcours d'une liste chainée

```
struct item_t {
  ...
  struct item_t *next;
};
struct item_t *e;
```

Séquentiel

```
while (e != NULL) {

  process(e);
  e = e->next;
}
```

Avec tâches

```
#pragma omp parallel
#pragma omp single
while (e != NULL) {
  #pragma omp task
  process(e);
  e = e->next;
}
```

Exemple : descente dans un arbire binaire

```
struct tree_t {
  ...
  struct tree_t *left, *right;
};
struct tree_t *root;
```

Séquentiel

```
void parcours(struct tree_t *t)
{
  ...
  if (t->left)

      parcours(t->left);
  if (t->right)

      parcours(t->right);
}


parcours(root);
```

Avec tâches

```
void parcours(struct tree_t *t)
{
  ...
  if (t->left)
      #pragma omp task
      parcours(t->left);
  if (t->right)
      #pragma omp task
      parcours(t->right);
}
#pragma omp parallel
#pragma omp single
parcours(root);
```

Directive `omp task`

```
#pragma omp task [clause], [clause], ...
bloc structuré
```

Clauses associées :

- `private` (*liste_de_variables*), `firstprivate` (*liste_de_variables*), `shared` (*liste_de_variables*)
- `default(shared | none)`
- `untied`
- `depend`(*dependance-type* : *list*)
- `if`(*expression*)

Tâches : portée des variables

- Le plus utile avec les tâches : **firstprivate**
- Attribut **firstprivate** par défaut sur toutes les variables...
- **sauf** si elles sont déjà considérées comme **shared**
  - Variable global
  - Variable déclarée avant la région parallèle
  - Variable explicitement marquée comme `shared`

Attention aux variables partagées sur la pile

```
void f()
{
  int i = 3;
  #pragma omp task shared(i)
  printf("%d\n", i);
}

#pragma omp parallel
#pragma omp single
f();
```

Tâches : cas où shared est a priori nécessaire

```
struct tree_t {
  ...
  struct tree_t *left, *right;
};
struct tree_t *root;

/* Renvoie le nombre de noeuds de l'arbre. */
int size(struct tree_t *t)
{
  int s_left = 0, s_right = 0;
  if (t->left)
      #pragma omp task shared(s_left)
      s_left = size(t->left);
  if (t->right)
      #pragma omp task shared(s_right)
      s_right = size(t->right);
  #pragma omp taskwait
  return s_left + s_right;
}
#pragma omp parallel
#pragma omp single
printf("%d\n", size(root));
```

Tâches : ordonnancement

Liaison tâche $\leftrightarrow$ thread

- Par défaut les tâches sont **tied** (liées).

$\rightarrow$ toujours exécutées par le même thread (celui qui les a crées).

- Tâche suspsendue seulement aux *task scheduling points* : création/terminaison de tâche, barrière, `taskwait`, `taskyield`.

Problème potentiel : déséquilibrage de charge.

Clause **untied**

- La tâche peut passer d'un thread à l'autre lors d'un *task scheduling point*.
- Attention aux variables `threadprivate`.
- Attention à l'indice du thread.
- Attention aux sections critiques.

Tâches : granularité

Créer une tâche a un coût non-trivial

Ne pas créer des tâches minuscules

- *Clause* **if** de la directive `omp task`
  - `#pragma omp task if(prof < PROF_MAX)`
  - La tâche est quand même créée...
  - ...mais exécutée tout de suite par le thread courant

- *Instruction* `if` :

```
if (prof < PROF_MAX) {
  #pragma omp task
  stuff(...);
} else {
  stuff(...);
}
```

→ à privilégier a priori

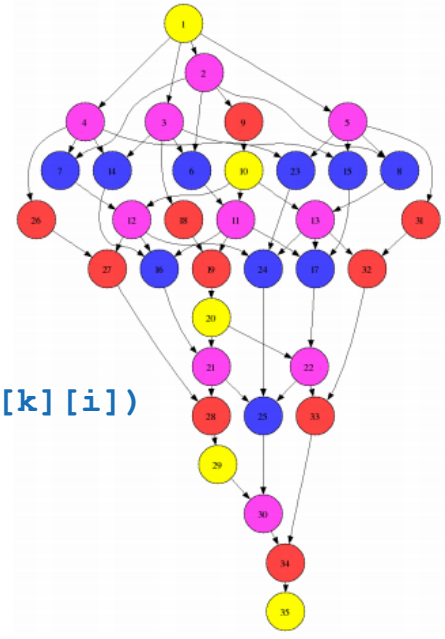
Tâches : dépendances

TODO...

Tâches : dépendances

Exemple de la mort (Christian Terboven)

```
void blocked_cholesky( int NB, float A[NB][NB] ) {
   int i, j, k;
   for (k=0; k<NB; k++) {
     #pragma omp task depend(inout:A[k][k])
        spotrf (A[k][k]) ;
     for (i=k+1; i<NT; i++)
       #pragma omp task depend(in:A[k][k]) depend(inout:A[k][i])
          strsm (A[k][k], A[k][i]);
       // update trailing submatrix
       for (i=k+1; i<NT; i++) {
         for (j=k+1; j<i; j++)
           #pragma omp task depend(in:A[k][i],A[k][j])
                            depend(inout:A[j][i])
              sgemm( A[k][i], A[k][j], A[j][i]);
         #pragma omp task depend(in:A[k][i]) depend(inout:A[i][i])
            ssyrk (A[k][i], A[i][i]);
       }
   }
}
```



* image from BSC