Paradigmes de base de la programmation concurrente

Table des matières

Programmation concurrente

– Programme concurrent

= programme qui contient *plusieurs* processus (ou *threads*) qui *coopèrent*

Coopération ⇒ Communication, échange d'information

Deux principales façons de communiquer :

- Par l'intermédiaire de variables *partagées*
- Par l'échange de messages et de signaux (par ex., *canaux* de communication)

Note : On considère un *thread* comme étant un processus léger (*lightweight process*)

– Différents types de programmes concurrents

- Programme multi-contextes (*multi-threaded*) = contient plusieurs *threads*

  Utilisation : Pour mieux organiser/structurer une application (plus grande modularité)

  Exemples : Système d'exploitation multi-tâches, fureteurs multi-tâches, interface personnes-machines vs. logique d'affaire

- Programme parallèle = chaque processus s'exécute sur son propre processeur

  Utilisation : Pour résoudre plus rapidement un problème ou pour résoudre un problème plus gros

  Exemples : Prévisions météorologiques, prospection minière, physique moderne, bioinformatique (génomique)

- Programme distribué = les processus communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un réseau (⇒ délais plus longs)

  Utilisation : Pour répartir, géographiquement, les données et les traitements

  Exemples : Serveurs de fichiers, accès à distance à des banques de données

Note : les catégories précédentes *ne sont pas* mutuellement exclusives. Par exemple, de nombreuses machines parallèles modernes (qu'on utilise essentiellement pour développer des applications *parallèles*) sont des *multi-ordinateurs*, donc des machines composées d'un ensemble de processeurs (avec leur mémoire) réliés par un réseau.

0 Patrons de base de la programmation concurrente

Les différents types d'applications concurrentes peuvent généralement être réalisées en utilisant un certain nombre de *patrons* de base. Évidemment, certains de ces patrons sont plus appropriés pour certains types d'applications concurrente — par exemple, le patron client/serveur est souvent utilisé pour des applications distribuées. Toutefois, aucun de ces patrons n'est exclusif à un type d'application. Un programme parallèle, par exemple, pourrait donc être développé en utilisant un ou plusieurs des patrons présentés plus bas.

Les cinq (5) patrons de base de la programmation concurrente selon G.R. Andrews [And00] sont les suivants :

1. Parallélisme itératif : Programme contenant plusieurs processus avec des boucles, et communicant généralement par l'intermédiaire de variables partagées.
2. Parallélisme récursif : Programme avec procédures récursives exécutées en parallèle, avec communication par variables partagées.
3. Producteurs/consommateurs (filtres et pipelines) : Ensemble de processus qui communiquent entre eux de façon uni-directionnelle, généralement organisés sous forme de pipeline.
4. Clients/serveurs : Les processus clients font des requêtes et attendent les réponses ; les processus serveurs attendent les requêtes et y répondent. Communication *bi*-directionnelle.
5. Pairs interagissant (*interacting peers*) : Les processus exécutent (en gros) le même code et *s'échangent des messages* pour coopérer et accomplir leur tâche.

Remarque importante : plusieurs des exemples de programmes MPD présentés dans les pages qui suivent (plus précisément,ceux en anglais) sont tirés du site *web* de G.R. Andrews, le concepteur du langage MPD :

`http://www.cs.arizona.edu/mpd/programs/tutorial.html`

Consultez ce site *web* pour plus de détails sur le langage (ainsi que le chapitre "Le langage MPD") et pour d'autres exemples de programmes.

1 Parallélisme itératif

- Programme itératif = utilise des boucles pour examiner des données et calculer des résultats
- Programme parallèle itératif = contient deux ou plusieurs processus itératifs
- Chaque processus calcule les résultats pour un sous-ensemble des données, puis les résultats sont combinés
- Souvent utilisé pour des calculs *embarassingly parallel* = problèmes pouvant être décomposés en un grand nombre de parties indépendantes, générant ainsi une grande quantité de parallélisme
- Exemples : Deux versions de la multiplication de matrices :
  - Programme MPD 1 : version avec instruction `co` (processus créés de façon dynamique).

– Programme MPD 2 : version avec déclarations `process` (déclaration de processus en *arrière-plan* avec création semi-dynamique).

  Note : la clause `final` (Programme MPD 2) assure que la série d'instructions qui suit le `final` ne s'exécutera que lorsque *tous* les processus créés par le programme auront terminé ou seront bloqués.

Si on ignore le temps requis pour générer les matrices `a` et `b` ainsi que le temps pour imprimer le résultat (matrice `c`), donc si on ne considère que la partie effectuant la multiplication des matrices, ces deux algorithmes ont alors les caractéristiques suivantes :

– Programme MPD 1 : Exactement $\mathtt{n}^2$ processus sont créés par le programme (on ne compte pas le programme principal lui-même comme un processus). Chaque processus s'exécute en temps $\Theta(\mathtt{n})$ (boucle `for` de la procédure `inner`). Si on considère qu'un processeur distinct est associé à chaque processus, le coût de l'algorithme (voir chapitre suivant) sera donc $\Theta(\mathtt{n}^3)$ (n^2 processeurs durant un temps $\Theta(n)$).
– Programme MPD 2 : Même caractéristiques.

Programme MPD 1 Multiplication parallèle de matrices à granularité fine : version avec instruction `co` (processus créées de façon dynamique) [Exemple G.R. Andrews]

```
# matrix multiplication using co and fine-grained concurrency
# usage:  a.out size

resource matrix_mult()
  # read command line argument for matrix sizes
  int n; getarg(1,n);

  # declare matrices and initialize a and b
  real a[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
       b[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
       c[n,n];

  # compute inner product of a[i,*] * b[*,j]
  procedure inner(int i, int j) {
    real sum = 0.0;
    for [k = 1 to n] {
      sum += a[i,k] * b[k,j];
    }
    c[i,j] = sum;
  }

  # compute n**2 inner products concurrently
  co [i = 1 to n, j = 1 to n]
    inner(i,j);
  oc

  # print result, by rows
  for [i = 1 to n] {
    for [j = 1 to n] {
      writes(c[i,j], " ");
    }                        # one line per row
    write();                 # append a newline
  }
end
```

Programme MPD 2 Multiplication parallèle de matrices à granularité fine : version avec `process` (processus définis à l'aide de déclarations, donc création semi-dynamique) [Exemple G.R. Andrews]

```
# matrix multiplication using process declarations and fine-grained concurrency
# usage:  a.out size

resource matrix_mult()
  # read command line argument for matrix sizes
  int n; getarg(1,n);

  # declare matrices and initialize a and b
  real a[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
       b[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
       c[n,n];

  # compute inner product of a[i,*] * b[*,j]
  process inner[i = 1 to n, j = 1 to n] {
    real sum = 0.0;
    for [k = 1 to n] {
      sum += a[i,k] * b[k,j];
    }
    c[i,j] = sum;
  }

  # wait for processes to terminate, then print result, by rows
  final {
    for [i = 1 to n] {
      for [j = 1 to n] {
        writes(c[i,j], " ");
      }                        # one line per row
      write();                 # append a newline
    }
  }
end
```

Remarque sur le parallélisme itératif

Certains programmes ou procédures, bien qu'ils ne contiennent pas de boucles comme tel, entrent dans la catégorie des programmes concurrents avec parallélisme *itératif*. C'est le cas lorsque ces programmes *ne contiennent pas de récursivité* et ne correspondent pas non plus à aucun des autres paradigmes présentés plus bas. Par exemple, la procédure `multVectScal` suivante — elle multiplie un vecteur `a` de taille `n` par une constante `c` (un *scalaire*) pour produire un vecteur résultat `b` lui aussi de taille `n` — utilise une forme de parallélisme itératif :

```
procedure fois( int x, int y ) returns int z
{ z = x * y; }

procedure multVectScal( int a[*], int c, res int b[*], int n )
{
  co [i = 1 to n]
    b[i] = fois(a[i], c)
  oc
}
```

Ici, il s'agit de parallélisme itératif à *granularité (très) fine* (*fine granularity*). On dit que la granularité est *fine* lorsque les processus n'exécutent qu'un petit nombre d'instructions. Lorsque les processus exécutent un grand nombre d'instructions, on parle alors de *granularité grossière* (*coarse granularity*).

Notons que, dans cet exemple, il a été nécessaire d'introduire une fonction auxiliaire `fois` (pour multiplier deux entiers) puisque les restrictions syntaxiques de MPD font que seules des *activations* de fonctions ou procédures peuvent apparaître dans un `co`.

2 Parallélisme récursif

- Le parallélisme récursif est utile si le problème peut être résolu à l'aide d'un algorithme contenant de nombreux appels récursifs (par ex., diviser-pour-régner), appels récursifs pouvant s'évaluer de façon *indépendante* les uns des autres $\Rightarrow$ on fait les appels en parallèle

- Si trop de parallélisme (trop nombreux appels récursifs), alors l'arbre de récursion peut être tronqué (élagué, en anglais *pruned*), e.g., solution non récursive/non parallèle lorsque le sous-problème devient *suffisamment simple* — même principe que celui décrit à la Section 2.7 du manuel

- Exemples :
  - Intégration numérique, Programme MPD 3.
  - Factoriel, Programme MPD 4.

    Examinons le comportement de ce dernier algorithme lorsque `seuil = 1` (donc avec récursion jusqu'aux cas de base *triviaux*, c'est-à-dire un seul élément à traiter). Pour simplifier, supposons que $n = 2^k$:
    * Nombre total de processus : chaque niveau de récursion va générer deux nouveaux processus. L'appel pour le problème de taille n va donc générer deux (2) processus pour traiter les problèmes de taille $n/2$, lesquels vont générer (au total) quatre processus pour les problèmes de taille $n/4$, etc., jusqu'à ce que n processus pour les problèmes de taille `1` soient générés (au niveau k). Au total, on aura donc le nombre suivant de processus :

$$\sum_{i=1}^{k} 2^i$$

Programme MPD 3 Programme avec processus récursifs pour intégration d'une fonction [Exemple G.R. Andrews]

```
# a parallel recursive MPD program for approximating the integral
# of f(x) from x==a to x==b for f(x) = sin(x)*exp(x)

# usage:  a.out epsilon a b

resource parallel_quad()
  real epsilon; getarg(1, epsilon);
  real a, b; getarg(2, a); getarg(3, b);

  procedure f(real x) returns real fx {
    fx = sin(x) * exp(x);
  }

  procedure quad(real left, real right, real fleft, real fright, real lrarea)
                          returns real area {
    real mid = (left+right)/ 2;
    real fmid = f(mid);
    real larea = (fleft + fmid) * (mid-left) / 2;     # left area
    real rarea = (fmid + fright) * (right-mid) / 2;   # right area
    if (abs((larea+rarea) - lrarea) > epsilon) {
      # recurse to integrate both halves in parallel
      co larea = quad(left, mid, fleft, fmid, larea)
      // rarea = quad(mid, right, fmid, fright, rarea)
      oc;
    }
    area = larea + rarea;
  }

  int start = age();    # start time, in milliseconds
  real area = quad(a, b, f(a), f(b), (f(a)+f(b))*(b-a)/2);
  int finish = age();   # finish time, in milliseconds

  write("epsilon =", epsilon," a =", a, " b = ", b);
  write("area =", area, " time = ",finish-start);
end
```

Programme MPD 4 Fonction factoriel avec parallélisme récursif et élagage (utilisation d'une solution séquentielle pour problème simple)

```
resource factoriel()
  int n;     getarg(1, n);
  int seuil; getarg(2, seuil);

  procedure fact( int i, int j, int seuil ) returns int resultat
  {
    if (j - i <= seuil) {
      # Probleme simple: solution sequentielle et iterative

      resultat = 1;
      for [k = i to j] {
        resultat *=  k;
      }
    }
    else {
      # Probleme plus complexe: solution parallele et recursive

      int r1, r2;
      int mid = (i+j) / 2;

      co  r1 = fact(i,     mid, seuil);
      //  r2 = fact(mid+1, j,   seuil);
      oc
      resultat = r1 * r2;
    }
  }

  int resultat = fact( 1, n, seuil );
  write( "fact(", n, ") = ", resultat );
end
```

En d'autres mots, $2(n-1)$ processus seront créés au total (le premier appel par le programme principal n'est pas compté comme un processus).

* Nombre de processeurs : parmi les divers processus créés, à un instant donné, au plus n d'entre eux auront à être actifs de façon véritablement *concurrente* (pour traiter les n feuilles en parallèle). On peut donc utiliser n processeurs pour traiter l'ensemble des processus.
* Les divers processus à un même niveau de récursion peuvent tous s'exécuter en parallèle. Le temps total requis dépendra donc (asymptotiquement) du nombre de niveaux de récursion, c'est-à-dire, de la profondeur de l'arbre. Ceci peut être décrit par l'équation de récurrence suivante :

$$\begin{aligned} T(1) &= \Theta(1) \\ T(n) &= T(n/2) + \Theta(1) \end{aligned}$$

  Le temps d'exécution sera donc $\Theta(\lg\, n)$.
* Le coût sera $\Theta(n \lg\, n)$.

3 Producteurs/consommateurs (pipeline)

- Producteur = processus qui produit un flot (*stream*) de résultats
- Consommateur = processus qui reçoit un flot de données et le traite
- Filtre = processus qui consomme un flot en entrée et produit un nouveau flot en sortie
- Pipeline = séquence de filtres
- Exemple : Utilisation de processus et *pipes* sur Unix pour supprimer les commandes d'un fichier LaTeX, Script 1. Les commandes utilisées sont les suivantes (description produite par `man`) :
  - `sed` : "*The* `sed` *utility is a stream editor that reads one or more text files, makes editing changes according to a script of editing commands, and writes the results to standard output.*
  - `grep` : "*The* grep *utility searches files for a pattern and prints all lines that contain that pattern.*"

    Note : Rôle de l'option "`-v`" de `grep` : "*Print all lines except those that contain the pattern.*
  - `tr` : "*The* `tr` *utility copies the standard input to the standard output with substitution or deletion of selected characters.*".
  - `wc` : "*The* `wc` *utility reads one or more input files and, by default, writes the number of newline characters, words and bytes contained in each input file to the standard output.*".

    Note : Rôle de l'option "`-w`" de `wc` : "*Count words delimited by white space characters or new line characters.*"

4 Clients/serveurs

– Producteur/consommateur ⇒ flot uni-directionnel d'information (du producteur vers le consommateur)

– Client/serveur ⇒ flot *bi-directionnel*

Script 1 Script Unix pour la suppression des commandes LaTeX dans un fichier

```
cat $1.tex \
 | sed '/\\begin{programmeMPD}/,/\\end{programmeMPD}/d' \
 | sed '/\\begin{table}/,/\\end{table}/d' \
 | sed '/\\begin{picture}/,/\\end{picture}/d' \
 | grep -v "^%" \
 | tr "[~]" "[ ]" \
 | tr "[\t]" "[\n]"\
 | tr "[ ]" "[\n]"\
 | grep -v '\\'  \
 | wc -w
```

- Le client fait une requête au serveur puis attend la réponse
- Le serveur reçoit la requête du client, la traite, puis retourne une réponse

– Analogie :

- Client = procédure appelante
- Serveur = procédure appelée (par plusieurs autres)

– Exemples : systèmes d'exploitation, serveurs de fichiers, bases de données, RPC (*Remote Procedure Call*) et RMI (*Remote Method Invocation*, en Java)

– Style généralement utilisé dans les systèmes répartis et distribués plutôt que dans les programmes parallèles

5 Pairs interagissants

– *Peers* = pairs ("*n.m.* Personne semblable quant à la fonction, la situation sociale", selon le petit Robert)

– *Interacting peers*

⇒ processus égaux, interagissant généralement (mais pas toujours) de façon *symétrique* entre eux

= chaque processus exécute, *grosso modo*, le même algorithme (style SPMD = *Single Program Multiple Data*) et communique avec les autres processus de façon à calculer sa partie des résultats

⇒ communication par échange de messages

⇒ les données de chaque processus sont strictement privées

– Exemple : multiplication de matrices à l'aide d'échange de messages : Programmes MPD 5 et 6. Le programme utilise un processus coordonnateur (Programme MPD 5) et W processus "*esclaves*" (travailleurs) (Programme MPD 6). Chaque travailleur calcule N/W rangées du résultat (pour simplifier, on suppose que N est un multiple de W).

Programme MPD 5 Multiplication de matrices à l'aide de processus distribués interagissant par l'intermédiaire d'un coordonnateur [Exemple G.R. Andrews]

```
# Distributed matrix multiplication using message passing.
# Usage:  a.out N numWorkers

resource distributed_matrix_mult()
  # read command line arguments for matrix sizes and numWorkers
  int n; getarg(1, n);
  int numWorkers; getarg(2, numWorkers);
  if ((n % numWorkers) != 0)
    { write("N must be a multiple of numWorkers"); stop(1); }
  int stripSize = n/numWorkers;

  op data  [numWorkers] (real m[*,*]);    # channels to Workers
  op result[numWorkers] (real m[*,*]);    # channels to Coordinator

  process Coordinator {
    real a[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
         b[n,n] = ([n] ([n] 1.0)),
         c[n,n];
    # send strips of a[*,*] and all of b[*,*] to Workers
    for [w = 1 to numWorkers] {
      int startRow = stripSize*(w-1) + 1;
      int endRow = startRow + stripSize - 1;
      send data[w] (a[startRow:endRow,*]);
      send data[w](b[*,*]);
    }
    # gather results from Workers
    for [w = 1 to numWorkers] {
      int startRow = stripSize*(w-1) + 1;
      int endRow = startRow + stripSize - 1;
      receive result[w](c[startRow:endRow,*]);
    }
    # print results
    for [i = 1 to n] {
      for [j = 1 to n] { writes(c[i,j]); writes(" "); }
      write();
    }
  }
```

Programme MPD 6 Multiplication de matrices à l'aide de processus distribués (suite) [Exemple G.R. Andrews]

```
  process Worker[w = 1 to numWorkers] {
    real a[stripSize,n], b[n,n], c[stripSize,n];
    # receive strip of a and all of b from Coordinator
    receive data[w](a[*,*]);
    receive data[w](b[*,*]);
    # compute inner products of a[i,*] * b[*,j]
    for [i = 1 to stripSize, j = 1 to n] {
      real sum = 0.0;
      for [k = 1 to n]
        { sum += a[i,k] * b[k,j]; }
      c[i,j] = sum;
    }
    # send results back to Coordinator
    send result[w](c[*,*]);
  }

end distributed_matrix_mult
```

A Différentes façons ... de diviser-pour-régner

Comme on l'a vu dans la première partie du cours, il existe différentes façons d'utiliser la stratégie diviser-pour-régner. Dans le cas d'un programme concurrent, cela est d'autant plus vrai qu'il existe, pour une décomposition donnée en sous-problèmes, différentes façons d'associer les divers sous-problèmes à des processus. Voyons quelques exemples, qui présentent des façons différentes de calculer la somme des éléments d'un tableau.

A.1 Décomposition récursive

Dans le programme MPD 7, chaque instance (récursive) de la procédure `somme` génère un processus distinct. Le nombre total de processus créés dépend donc de la taille du tableau à traiter.

A.2 Décomposition avec un nombre statique de processus

Dans le programme MPD 8, on crée un nombre fixe de processus — `NBPROCS`, un paramètre spécifié de façon statique, c'est-à-dire, au moment de la compilation. Pour simplifier, on suppose que le nombre d'éléments à additionner est un multiple du nombre de processus.

Chacun de ces processus est responsable de calculer la somme d'un sous-intervalle du tableau `a` (plus précisément, le processus `i` doit faire la somme du sous-tableau allant de la borne `inf(i, n, NBPROCS)` jusqu'à la borne `sup(i, n, NBPROCS)` inclusivement).

Les résultats intermédiaires sont transmis par l'intermédiaire d'une variable partagée, à savoir le tableau `toti` (plus précisément, le résultat produit par le processus `i` est conservé à la position `i` du tableau `toti`). Ces résultats intermédiaires sont *ensuite* additionnés les uns avec les autres dans la boucle `for` du programme principal.

Les parties du code indiquées par `begin` et `final` s'exécutent, respectivement, *avant* le début de l'exécution des processus en arrière-plan et *après* la fin de l'exécution de ces processus.

Programme MPD 7 Somme des éléments d'un tableau avec décomposition récursive

```
resource sommeTableau()
  # Lecture et verification du nombre d'elements a generer et a traiter
  int n; getarg(1, n);
  if (n <= 0) { write("*** Erreur: n <= 0" ); stop(1); }

  int a[1:n];             # Tableau dont on veut calculer la somme des elements.

  # Generation (aleatoire) des elements du tableau a.
  procedure generer( res int a[1:*], int n ) {
    for [i = 1 to n] { a[i] = int(random(1, n)) }
  }

  # Impression des elements du tableau a.
  procedure imprimer( int a[1:*], int n ) {
    for [i = 1 to n-1] { writes( a[i], ", " ) }
    write( a[n] );
  }

  # Somme (recursive) des elements a[i..j]
  procedure somme( int i, int j ) returns int resultat {
    # Utilise (en lecture seulement) la variable globale a.
    if ( i == j ) {
      resultat = a[i];
    } else {
      int r1, r2, m = (i + j) / 2;
      co   r1 = somme(i,   m);
      //   r2 = somme(m+1, j);
      oc
      resultat = r1 + r2;
    }
  }

  #
  # Programme principal
  #

  # Generation aleatoire des elements
  generer(a, n)

  # Calcul de la somme
  int s = somme( 1, n );

  # Impression des resultats
  imprimer( a, n );
  write( "somme", " = ", s );
end
```

Programme MPD 8 Somme des éléments d'un tableau avec décomposition statique (en fonction d'un nombre fixe de processus)

```
resource sommeTableau()
  const int NBPROCS = 10;     # Nombre de processus a creer

  # Lecture et verification du nombre d'elements a generer et a traiter
  int n;
  getarg(1, n);
  if (n <= 0 | (n % NBPROCS) != 0) {
    write("*** Erreur: n <= 0 | ( n %", NBPROCS, #") != 0" ); stop(1);
  }

  int a[1:n];

  int toti[1:NBPROCS];        # Tableau pour resultats intermediaires

  # Bornes inferieure et superieure du i-ieme intervalle.
  procedure inf( int i, int n, int nbProcs ) returns int r
  { r = (i-1) * (n / nbProcs) + 1 }
  procedure sup( int i, int n, int nbProcs ) returns int r
  { r = i * (n / nbProcs) }

  ...

  # Processus (iteratifs) pour la somme des elements d'un sous-intervalle
  process somme[i = 1 to NBPROCS] {
    int resultat = 0;
    for [k = inf(i, n, NBPROCS) to sup(i, n, NBPROCS)] {
      resultat += a[k];
    }
    toti[i] = resultat;
  }

  #
  # Programme principal
  #
  begin {
    # Generation aleatoire des elements
    generer(a, n);
  }

  # Calcul de la somme
  final {
    int tot = 0;
    for [i = 1 to NBPROCS] {
      tot += toti[i];
    }

    # Impression des resultats
    imprimer( a, n );
    write( "somme", " = ", tot );
  }
end
```

A.3 Décomposition style "sac de tâches"

Dans le programme MPD 9, plutôt que de fixer le nombre de processus, on spécifie plutôt la taille désirée pour chacune des tâches. Ici, cette taille est spécifiée par la variable `tailleTache` (spécifiée au moment de l'appel du programme), qui indique la taille du sous-intervalle devant être traité par chacune des instances de la procédure `somme`. Pour simplifier, on suppose que le nombre total d'éléments du tableau est un multiple de la taille des tâches. Dans l'exemple du programme MPD 9, on crée un processus pour chacun des sous-intervalles (`nbProcs = n/tailleTache`). Comme on a plusieurs processus qui vont accéder, en lecture *et* écriture, une même variable partagée, on utilise donc un sémaphore pour en protéger l'accès (`totLibre`).

Une telle approche où on fixe la taille des tâches qu'on répartit ensuite entre les divers processus disponibles est habituellement utilisée dans le cadre d'une approche dite "*sac de tâches*" (*bag of tasks*). Lorsqu'on utilise cette stratégie, on crée un certain nombre de processus (nombre qui peut être déterminé par la structure de la machine, c'est-à-dire, par le nombre de processeurs). On crée aussi, de façon indépendante, un certain nombre de tâches (plus précisément, de *descripteurs* de tâches), tâches qu'on insère dans une structure de données appropriée, appelée *sac de tâches* (en anglais, *bag of tasks*, parfois aussi appelé, *task pool*). Lorsqu'un processus/processeur devient libre, il choisit alors une des tâches disponibles dans le sac et l'exécute. Dans certains cas, l'exécution d'une telle tâche génère alors de nouvelles tâches, lesquelles sont simplement ajoutées au sac. Le programme dans son ensemble se termine lorsqu'il ne reste plus *aucune* tâche à exécuter, c'est-à-dire lorsque le sac de tâches est vide. Le programme MPD 10 illustre l'allure générale d'une telle mise en oeuvre pour le problème du calcul de la somme des éléments d'un tableau.

Programme MPD 9 Somme des éléments d'un tableau avec décomposition en tâches de taille fixe (style "sac de tâches")

```
resource sommeTableau()
  # Lecture et verification du nombre d'elements a generer et a traiter,
  # de meme que du nombre d'elements a traiter par processus.
  ...
  int tailleTache; getarg(2, tailleTache);
  if (tailleTache <= 0 | tailleTache > n | (n % tailleTache != 0) ) {
    write("*** Erreur: tailleTache <= 0 | tailleTache > ", n, "| n %", tailleTache, "!= 0" ); stop(1);
  }


  # La matrice a traiter.
  int a[1:n];

  int tot = 0;          # Variable globale mise a jour directement par les processus.
  sem totLibre = 1;     # Semaphore protegeant l'acces a tot.

  # Bornes inferieure et superieure du i-ieme intervalle.
  procedure inf( int i, int tailleTache ) returns int r
  { r = (i-1) * tailleTache + 1 }
  procedure sup( int i, int tailleTache ) returns int r
  { r = i * tailleTache }

  ...

  # Somme (iterative) des elements a[i..j] avec mise a jour de la var. globale
  procedure somme( int i, int j ) {
    int resultat = 0;
    for [k = i to j] {
      resultat += a[k];
    }
    P(totLibre); tot += resultat; V(totLibre)
  }

  #
  # Programme principal
  #

  # Generation aleatoire des elements
  generer(a, n);

  # Calcul de la somme.
  int nbProcs = n / tailleTache;
  co [i = 1 to nbProcs]
    somme( inf(i, tailleTache), sup(i, tailleTache) )
  oc

  # Impression des resultats
  ...
end
```

Programme MPD 10 Somme des éléments d'un tableau avec un véritable "sac de tâches"

```
resource sommeTableau()
  ...
  int nbProcs; getarg(3, nbProcs);
  if (nbProcs <= 0) { write("*** Erreur: nbProcs <= 0" ); stop(1); }
  ...

  #
  # Structures de donnees et operations pour gestion du sac de taches.
  #
  ...
  # Ajout d'une tache (sous-intervalle a[i..j]) dans le sac.
  procedure ajouterTache( int i, int j ) { ... }

  # Retrait d'une tache du sac.
  procedure obtenirTache( var int i, var int j ) returns bool disponible { ... }

  # Selection d'une tache et execution.
  procedure somme() {
    int i, j;
    while ( obtenirTache(i, j) ) {
      int resultat = 0;
      for [k = i to j] {
        resultat += a[k];
      }
      P(totLibre); tot += resultat; V(totLibre);
    }
  }

  ...

  # Ajout des taches dans le sac.
  for [i = 1 to n / tailleTache] {
    ajouterTache(inf(i, tailleTache), sup(i, tailleTache));
  }

  # Activation des taches.
  co [i = 1 to nbProcs]
    somme()
  oc
  # Se termine lorsque tous les processus ont termine, c'est-a-dire
  # lorsqu'ils ont tous detecte que le sac de taches etait vide.

  # Impression des resultats
  ...
end
```

B Une autre façon de classifier les paradigmes de programmation parallèle

Une autre classification intéressante des modèles de programmation parallèle, qui peut aussi aider à mieux comprendre certaines notions importantes de conception d'algorithmes parallèles, est celle qui distingue entre parallélisme de données, parallélisme de contrôle et parallélisme de flux. Ces trois styles de programmation parallèle sont présentés comme suit par Gengler, Ubéda et Desprez [GUD96, p. 97].

> - Le **parallélisme de données** (*data parallelism*) exploite comme source de parallélisme la régularité des données et applique en parallèle un même calcul à des données distinctes. [...]
> - Le **parallélisme de contrôle** (*control parallelism*) consiste à faire des choses différentes en même temps afin de générer du parallélisme. [...]
> - Le **parallélisme de flux** (*flow parallelism*) correspond à la technique du travail à la chaîne. Chaque donnée subit une séquence de traitements. C'est cette séquence qui est utilisée comme source de parallélisme et le parallélisme de flux réalise la séquence de traitements en mode pipeline en exploitant une régularité des données.

Ces différents styles, qu'on peut retrouver combinés dans un même programme ou algorithme, sont décrits plus en détails dans les sections suivantes.

B.1 Parallélisme de données

Le *parallélisme de données* correspond à l'application d'une même opération sur tous les éléments d'une collection de données *homogène*, c'est-à-dire dont les éléments sont tous de même type. Ces collections de données sont soit des listes (des séquences) — dans les langages fonctionnels par exemple — soit des tableaux — dans les langages de programmation impératifs plus *mainstream*. Dans les deux cas, on parle de structures de données *régulières*, par opposition aux structures de données dynamiques basées sur l'utilisation de pointeurs et donnant lieu à des arbres ou des graphes, donc des structures de formes non régulières. Un programme écrit dans le style parallélisme de données est donc composé d'une séquence d'applications d'opérations sur des collections. L'ensemble du travail effectué par le programme consiste donc en une série de phases de calcul, où chaque phase est une application d'une opération sur une collection, et où les différentes phases peuvent évidemment manipuler des collections différentes.

La forme la plus simple de parallélisme de données survient lorsque les calculs sur les différents éléments sont complètement *indépendants* les uns des autres, ce qui fait que l'ordre d'exécution n'a aucune importance et, donc, que tous les calculs peuvent se faire en parallèle.

Par exemple, soit l'opération consistant à multiplier chacun des éléments d'une collection par l'entier 2. En MPD, l'application d'une telle opération sur les éléments d'un tableau d'entiers `a` pour obtenir un tableau `b` pourrait alors s'écrire comme suit :

```
int a[n], b[n]
co [i = 1 to n]
  b[i] = 2 * a[i]
oc
```

Langages pour le parallélisme de données avec tableaux

Certains langages de programmation supportent *directement* le parallélisme de données sur des collections représentées par des tableaux. Par exemple, la même opération sur des tableaux (multiplication par 2 de chacun des éléments) pourrait s'écrire simplement comme suit en Fortran 90 :

```
integer A(n), B(n)
B = 2 * A
```

Ici, c'est le compilateur qui s'occupe de générer le code qui permettra l'exécution en parallèle des diverses multiplications et affectations. C'est aussi le compilateur qui s'occupera de *distribuer* les données entre les processeurs, en fonction des directives spécifiées par le programmeur, une tâche cruciale du processus de *programmation* parallèle lorsqu'on utilise le style parallélisme de données. Par exemple, en HPF (*High Performance Fortran*), la directive `DISTRIBUTE` permet d'indiquer au compilateur de quelle façon les éléments d'un tableau doivent être distribués entre les processeurs. Chaque processeur est alors responsable de calculer les éléments indiqués — on parle alors de la règle *owner computes*, i.e., "*the processor that "owns" a value is responsible for updating that value*" [Fos95]. La Figure 1 (adaptée de [Fos95, p. 254]) illustre les deux principaux types de décomposition et distribution d'un tableau à deux (2) dimensions 8×8 sur quatre (4) processeurs, à savoir distribution par bloc ou distribution cyclique (ou des combinaisons des deux modes).

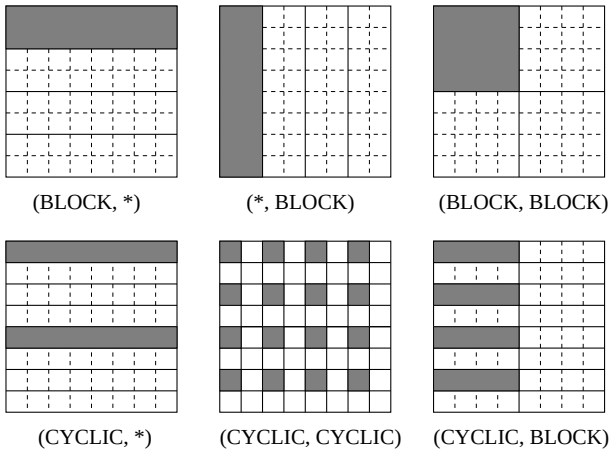


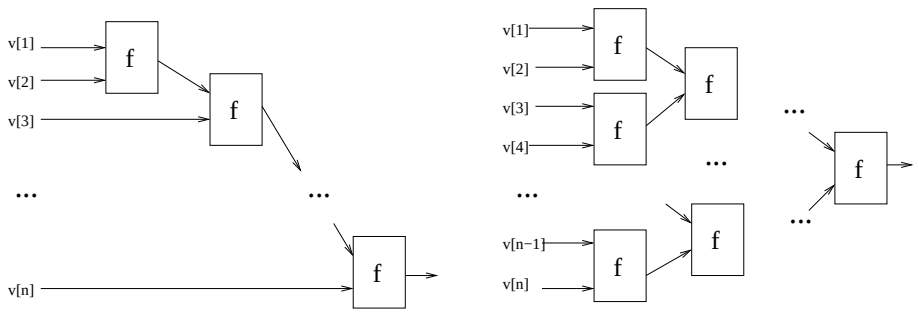
Figure 1: Différents types de distribution des données pour un tableau 8×8 sur quatre (4) processeurs en HPF. Les données pour le processeur no. 1 sont en gris.

En fait, la décomposition des données est le pendant pour le parallélisme de données de la décomposition en tâches pour le parallélisme de contrôle. Nous n'aborderons pas plus à fond la question de la distribution des données ici, cette question étant plutôt du ressort d'un cours de *programmation [parallèle]* plutôt qu'un cours de conception d'algorithmes [parallèles] — entre autres parce qu'elle dépend fortement de l'architecture de la machine parallèle utilisée.

Les principaux types d'opérations sur les collections

Les opérations sur les collections sont généralement de l'un des types suivants :

- α*-notation* : ce type consiste à appliquer une opération sur chacun des éléments d'une collection pour obtenir un résultat qui est lui-même une collection, de taille identique. Dans la terminologie des langages fonctionnels, on parle alors d'un opération



(a) Schéma béta

(b) Schéma béta−logarithmique

Figure 2: Schémas de réduction β et β-logarithmique

de type `map`. Par contre, certains auteurs français parlent plutôt d'un schéma de type *α-notation* [GUD96].

Plus spécifiquement, soit f une opération unaire (un argument) et $C = [c_1, \ldots, c_n]$ une collection de taille n. L'application de f à la collection C produira alors la collection R de taille n satisfaisant la propriété suivante :

$$R = [f(c_1), \ldots, f(c_n)]$$

On peut aussi généraliser l'idée aux opérations k-aire, c'est-à-dire avec k arguments. Soit les k collections $C^1, \ldots, C^k$ toutes de taille n. L'application de g, une fonction de k arguments, sur ces k collections produira alors la collection R de taille n satisfaisant la propriété suivante :

$$R = [g(c_1^1, \ldots, c_1^k), \ldots, g(c_n^1, \ldots, c_n^k)]$$

- *β-réduction* : ce type consiste à appliquer une opération *binaire* sur les divers éléments de la collection pour obtenir un résultat qui est un *scalaire*. Dans la terminologie des langages fonctionnels, on parle alors d'un opération de type `fold`.

  Par exemple, soit $\oplus$ une opération binaire et $C = [c_1, \ldots, c_n]$ une collection. L'application de $\oplus$ sur C via une β-réduction produira alors le résultat r satisfaisant la condition suivante :

  $$r = ((((c_1 \oplus c_2) \oplus c_3) \oplus \ldots) \oplus c_n)$$

  Dans le cas où $\oplus$ est associative — ce qui est habituellement le cas pour les opérations utilisées dans une telle β-réduction, par exemple, $+$, $*$, `MAX`, `MIN` — l'ordre d'application de l'opération $\oplus$ n'a donc pas d'importance. On peut donc parenthéser cette expression de façon différente sans changer le résultat[1]. Par exemple, pour $n = 8$, on peut alors parenthéser l'expression comme suit :

  $$(((c_1 \oplus c_2) \oplus (c_3 \oplus c_4)) \oplus ((c_5 \oplus c_6) \oplus (c_7 \oplus c_8)))$$

  Comme l'illustre la Figure 2 (adaptée de [GUD96, p. 107]), on peut alors obtenir une évaluation parallèle qui pourra s'effectuer en temps logarithmique plutôt qu'en temps séquentiel, d'où le terme *β-réduction logarithmique*.

[1] Et si ignore, dans le cas des nombres à virgule flottante, les questions d'arrondissement

- Calcul de préfixes : pour ce type, on applique une opération binaire associative sur les divers éléments de la collection pour obtenir un résultat qui sera une autre collection de même taille, où le $i$ème éléments de la collection résultante est obtenu par une série d'applications de l'opération binaire sur les i premiers éléments. Plus précisément, soit $\oplus$ une opération binaire et $C = [c_1, \ldots, c_n]$ une collection. Le calcul de préfixes sur C avec $\oplus$ produira alors le résultat R satisfaisant la condition suivante, donc tel que $R_i = c_1 \oplus c_2 \oplus \ldots \oplus c_i$:

  $$R = [c_1, c_1 \oplus c_2, c_1 \oplus c_2 \oplus c_3, \ldots, c_1 \oplus \ldots \oplus c_{n-1}, c_1 \oplus \ldots \oplus c_{n-1} \oplus c_n]$$

  On verra au chapitre sur les algorithmes PRAM que le calcul des préfixes est très intéressant car il peut s'exécuter efficacement (en temps logarithmique) et de nombreuses autres opérations peuvent être réalisées, de façon parallèle efficace, par l'utilisation d'un calcul de préfixes approprié — en fait, les deux premiers types d'opération sur des collections (α et β) peuvent s'exprimer comme des calculs de préfixe.

B.2 Parallélisme de contrôle

Le parallélisme de contrôle consiste à décomposer le travail à effectuer en différentes tâches, à identifier celles qui peuvent s'exécuter en parallèle, puis finalement à *ordonner*, à l'aide de structures de contrôle appropriées, l'exécution de ces diverses tâches — certains auteurs utilisent aussi le terme *task graph model* [GGKK03], ou encore *parallélisme de tâches*.

Parmi les exemples vus précédemment, ceux présentés à la section 1 sur le parallélisme récursif sont des programmes parallèles basés sur la parallélisme de contrôle, la décomposition en tâches se faisant par l'intermédiaire de la stratégie diviser-pour-régner (récursive).

B.3 Parallélisme de flux

Le parallélisme de flux est défini comme suit [GUD96, p. 132] :

> Le parallélisme de flux correspond au principe du *travail à la chaîne*. Une séquence d'opérations doit être appliquée en cascade à une série de données similaires. Les opérations à réaliser sont associées à des éléments de calculs chaînés de façon à ce que l'entrée d'une opération soit la sortie de l'opération précédente. Le parallélisme de flux n'est donc rien d'autre qu'un fonctionnement en mode *pipeline* des éléments du calcul.

Ce type de parallélisme correspond donc au paradigme *producteur–consommateur* vu précédemment.

Notons que la frontière entre parallélisme de flux et parallélisme de données peut parfois être floue. Ainsi, si l'ensemble des données du flux est entièrement disponible en mémoire, il est alors généralement aisé passer du mode parallélisme de flux au mode parallélisme de données, chacun des filtres du pipeline pouvant alors simplement être vu comme une application de style parallélisme de données (de type α ou β).

B.4 Un exemple : évaluation d'un polynôme en une série de points

On veut évaluer un polynôme $p(x) = a+bx+cx^2+dx^3$ sur un ensemble de n valeurs $v_1, \ldots, v_n$. En d'autres mots, on veut calculer : $a+bv_1+cv_1^2+dv_1^3, a+bv_2+cv_2^2+dv_2^3, \ldots, a+bv_n+cv_n^2+dv_n^3$. On suppose pour simplifier qu'il s'agit d'un polynôme à coefficients entiers et à valeur entière.

Algorithme séquentiel

L'algorithme suivant, exprimé en MPD, permet d'effectuer les évaluations désirées, où `v` contient les points d'évaluation et `r` retourne les résultats associés :

```
procedure evaluerPolynome( int a, int b, int c, int d, int v[n],
                           res int r[n] )
{
  for [i = 1 to n] {
    r[i] = a + b*v[i] + c*v[i]**2 + d*v[i]**3
  }
}
```

Parallélisme de données

La procédure suivante[2] permet, dans le style parallélisme de données, d'évaluer le polynôme $p(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ sur l'ensemble de n valeurs :

```
procedure evaluerPolynome( int a, int b, int c, int d, int v[n],
                           res int r[n] )
{
  co [i = 1 to n]
    r[i] = a + b*v[i] + c*v[i]**2 + d*v[i]**3
  oc
}
```

Il s'agit ici d'un schéma parallèle de type α. Du point de vue *algorithmique pure*, donc avec une machine parallèle idéale et sans contrainte, cette approche est intéressante car elle s'exécute en temps $\Theta(1)$ ... sauf qu'elle nécessite n processeurs.

Parallélisme de contrôle

Pour un index `i` donné, l'évaluation du polynôme $a + bx + cx^2 + dx^3$ en un point v_i demande d'évaluer diverses sous-expressions. L'évaluation de chacune de ces sous-expressions peut alors être vue comme une tâche indépendante, certaines pouvant s'effectuer en parallèle, alors que d'autres ne le peuvent pas (lorsqu'il y a des dépendances entre sous-expressions). On obtient alors le segment de code présenté dans l'Exemple de code 1, qui introduit du parallélisme de granularité *très fine* (tâche = évaluation d'une sous-expression simple, style machine à flux de données (*dataflow*)).

Ici, le temps d'exécution est $\Theta(n)$. Par contre, au plus trois (3) processeurs sont requis. Évidemment, dans un programme plus complexe, on identifierait des tâches de granularité moins fine ... et on utiliserait aussi le parallélisme de boucles (de données), puisque toutes les itérations sont indépendantes les unes des autres.

Parallélisme de flux

L'évaluation d'un polynôme à l'aide du style parallélisme par flux repose sur la méthode de Horner d'évaluation des polynômes. Le polynôme $p(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ peut être évalué comme suit :

$$p(x) = (((((d * x) + c) * x) + b) * x) + a$$

[2]Notez qu'il ne s'agit pas d'un segment de code MPD valide : en MPD, seules des invocations de fonctions ou de procédures peuvent apparaître dans le corps d'une instruction `co`.

```
procedure evaluerPolynome( int a, int b, int c, int d, int v[n],
                           res int r[n] )
{
  for [i = 1 to n] {
    co
      t1 = v[i]**2
      t2 = v[i]**3
    oc
    co
      t3 = b * v[i]
      t4 = c * t2
      t5 = d * t3
    oc
    co
      t6 =  a + t3
      t7 = t4 + t5
    oc
    r[i] = t6 + t7
  }
}
```

Exemple de code 1: Procédure pour évaluer un polynôme en une série de points avec parallélisme de contrôle (de granularité (*très*) fine)

Soit alors les fonctions suivantes :

$$\begin{aligned} f_0\ (x,\ y) &= (x, y * x + d) \\ f_1\ (x,\ y) &= (x, y * x + c) \\ f_2\ (x,\ y) &= (x, y * x + b) \\ f_3\ (x,\ y) &= (x, y * x + a) \end{aligned}$$

L'évaluation du polynôme $p(x)$ peut alors être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} p(x) &= r_2 \\ &\quad \texttt{where}\ (r_1, r_2) = f_3\ (f_2\ (f_1\ (f_0\ (x, 0)))) \end{aligned}$$

Code Haskell 1 Évaluation d'un polynôme à l'aide de parallélisme de données et parallélisme de flux

```
evaluerPolynome a b c d v = map (evalPoly a b c d) v

evalPoly a b c d x = r2
where
(r1, r2) = (f3 . f2 . f1 . f0) (x, 0)
f0 (x, y) = (x, y * x + d)
f1 (x, y) = (x, y * x + c)
f2 (x, y) = (x, y * x + b)
f3 (x, y) = (x, y * x + a)
```

Or, l'expression $f_3\ (f_2\ (f_1\ (f_0\ (x, 0))))$ peut être simplement vue comme une composition séquentielle des fonctions, c'est-à-dire comme une sorte de pipeline où on transmet

l'argument à f_0 qui transmet son résultat à f_1 et ainsi de suite. Dans un langage fonctionnel comme Haskell, ceci s'exprime de façon très élégante à l'aide de l'opérateur de composition de fonctions — `(f3 . f2 . f1 . f0)` —, tel qu'illustré dans le Code Haskell 1. Dans ce programme Haskell, on combine parallélisme de données, via l'opérateur `map` dans la fonction `evaluerPolynome` (schéma α appliqué à une collection représentée par une séquence), et parallélisme de flux dans la fonction `evalPoly`.

Références

[And00] G.R. Andrews. *Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming.* Addison-Wesley, Reading, MA, 2000. [QA76.58A57 2000].

[Fos95] I. Foster. *Designing and Building Parallel Programs.* Addison-Wesley, 1995. `http://www-unix.mcs.anl.gov/dbpp`.

[GGKK03] A. Grama, A. Gupta, G. Karypis, and V. Kumar. *Introduction to Parallel Computing (Second Edition).* Addison-Wesley, 2003.

[GUD96] M. Gengler, S. Ubéda, and F. Desprez. *Initiation au parallélisme—Concepts, architectures et algorithmes.* Masson, 1996. [QA76.58G45].