Systèmes concurrents

Philippe Quéinnec

ENSEEIHT
Département Sciences du Numérique

17 octobre 2024

Cinquième partie

Programmation multiactivité

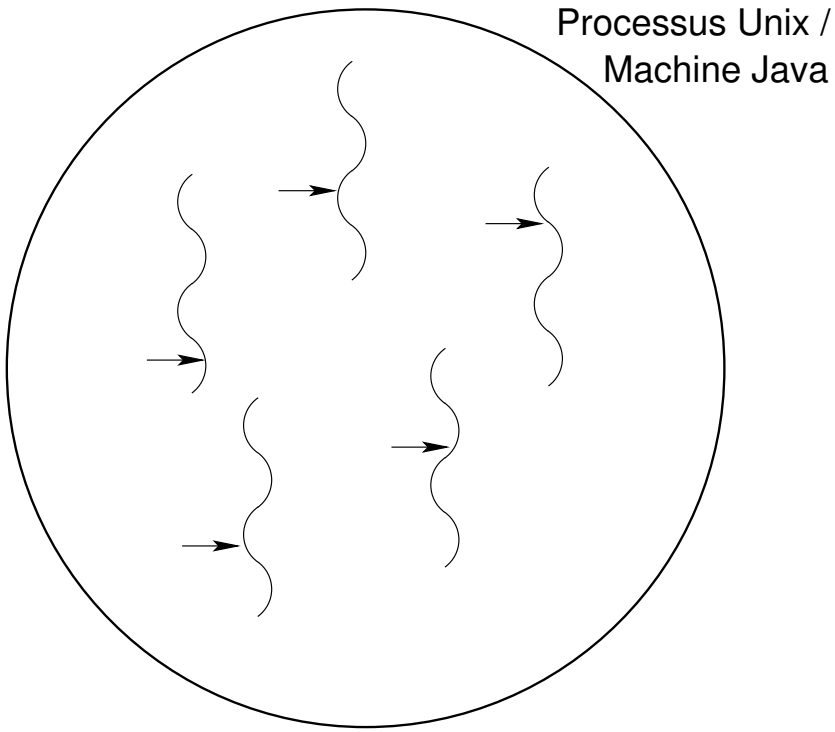
Contenu de cette partie

Préparation aux TP : présentation des outils de programmation concurrente autour de la plateforme Java

- notion d'activité
- présentation de la plateforme
- classe `Thread`
- objets de synchronisation : moniteurs...
- régulation des activités : pools d'activités, appels asynchrones, fork/join...
- outils de synchronisation de bas niveau
- autres environnements et modèles : Posix, OpenMP...

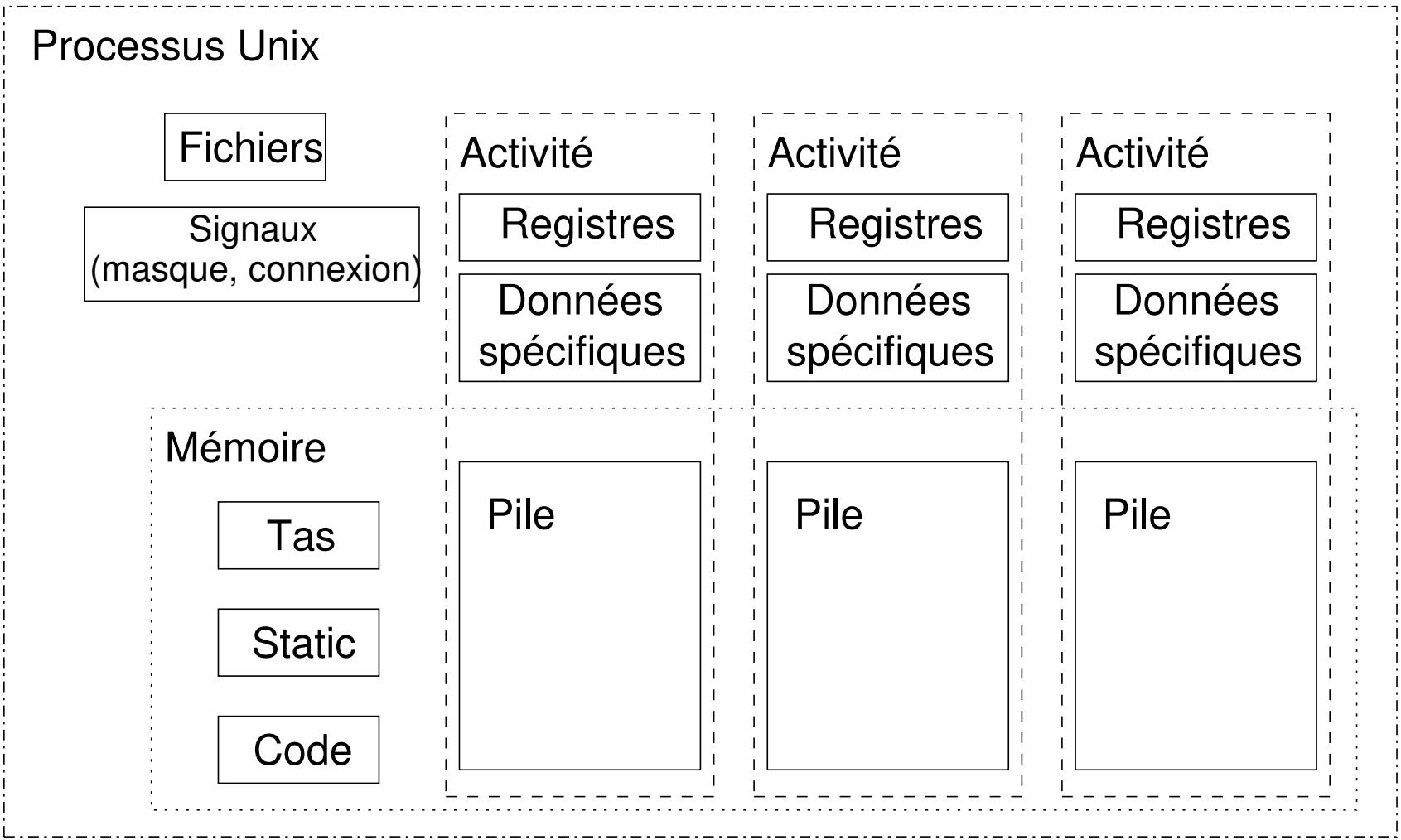
Plan

Processus multiactivité



1 espace d'adressage, plusieurs flots de contrôle.
$\Rightarrow$ plusieurs activités (ou processus légers) au sein d'un même processus UNIX / d'une même machine virtuelle Java.

Processus multiactivité



Processus lourds vs activités

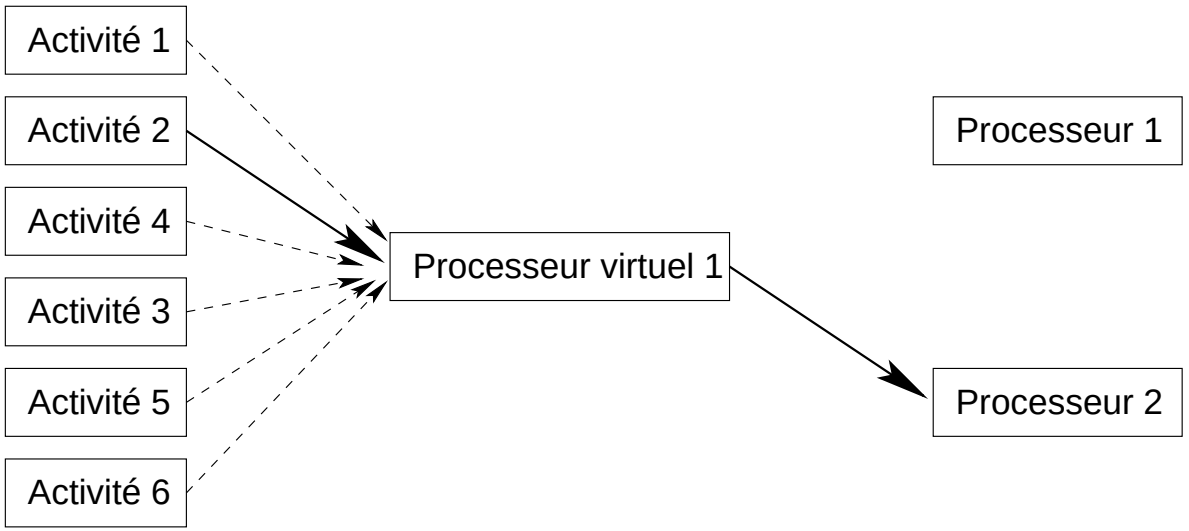
- *Processus lourds* : représentent l'exécution d'une application, du point de vue du système
  - → unité d'allocation de ressources
    - isolation des espaces d'adressage
    - commutation coûteuse
- *Activités* (threads, processus légers...) :
  - unité d'exécution : décomposition d'un traitement en sous-traitements parallèles, pour tirer profit de la puissance de calcul disponible, ou simplifier la conception
  - les ressources (mémoire, fichiers...) du processus lourd exécutant un traitement sont partagées entre les activités réalisant ce traitement
  - une bibliothèque applicative gère le partage entre activités du temps processeur alloué au processus lourd
    → commutation plus efficace.

Processeurs virtuels

Entre le processeur physique et les activités, il existe généralement une entité interne au noyau, appelé *kernel process* ou *processeur virtuel*.
Cette entité est *généralement* l'unité de blocage : un appel système bloquant (`read...`) bloque le processeur virtuel qui l'exécutait.

1. Many-to-one : 1 seul processeur virtuel par processus
2. Many-to-many : 1 processeur virtuel par activité
3. Many-to-few : quelques processeurs virtuels par processus

Many-to-one



\+ commutation entre activités efficace

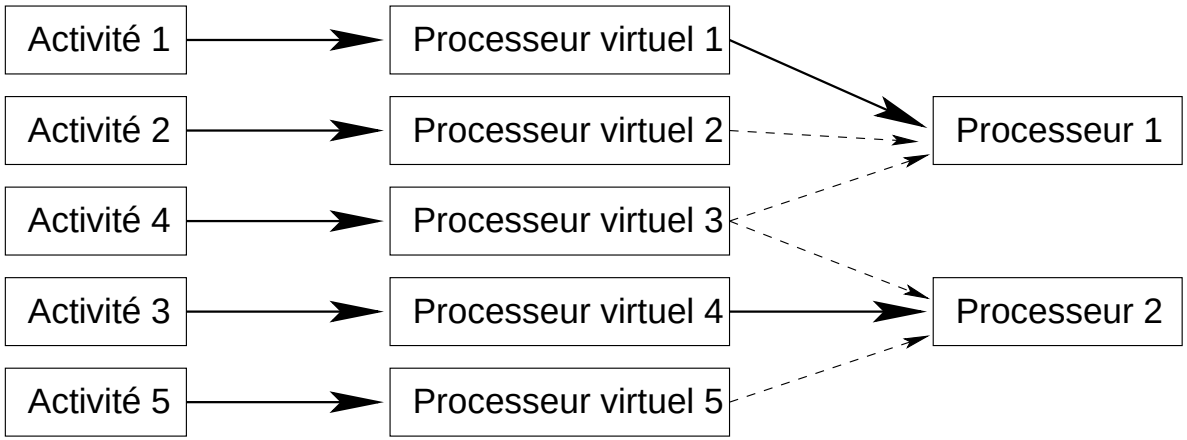
\+ implantation simple et portable

\− pas de bénéfice si plusieurs processeurs

\− blocage du processus (donc de toutes les activités) en cas d'appel système bloquant, ou implantation complexe

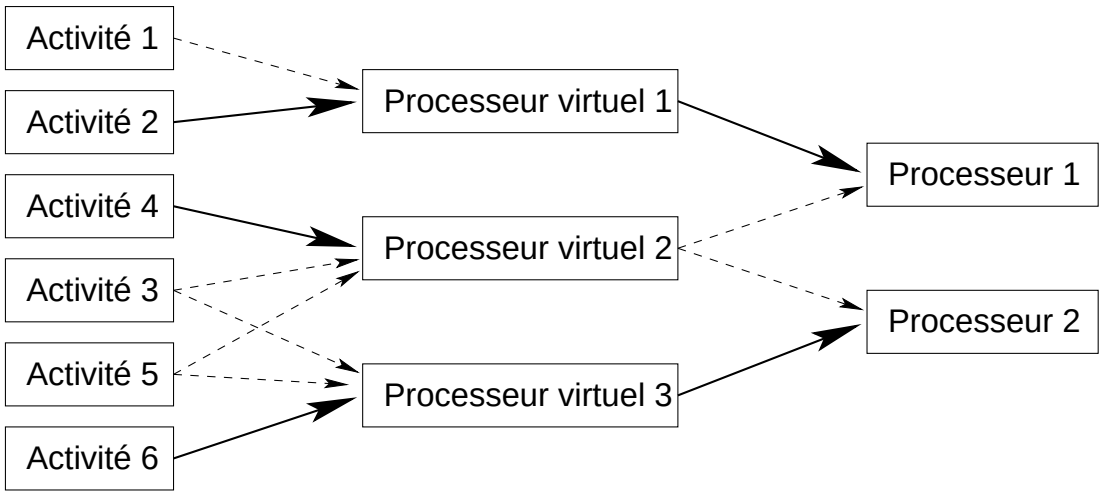
→ modèle quasiment abandonné

Many-to-many



+ vrai parallélisme si plusieurs processeurs physiques
+ pas de blocage des autres activités en cas d'appel bloquant
– commutation moins efficace (dans le noyau)
– ressources consommées élevées
– nombre modéré d'activités (~ 100)

Many-to-few



+ vrai parallélisme si plusieurs processeurs physiques
+ meilleur temps de commutation
+ meilleur rapport ressources/nombre d'activités
+ pas de blocage des autres activités en cas d'appel bloquant
+ grand nombre d'activités (> 1000)
− complexe, particulièrement si création automatique de nouveaux processeurs virtuels
− faible contrôle des entités noyau

Plan

Conception d'applications parallèles en Java

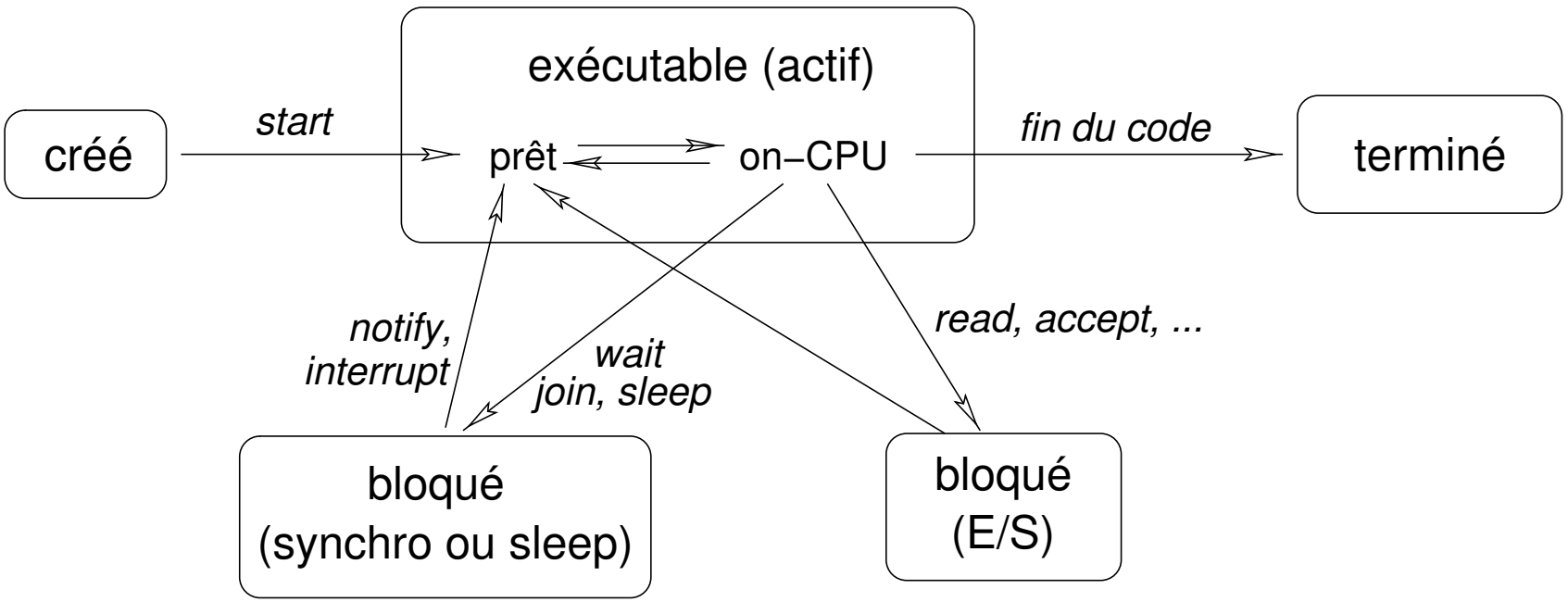
Java permet de manipuler

- les processus lourds : classes `java.lang.ProcessBuilder` et `java.lang.Process`
- les activités : classe `java.lang.Thread`

Le degré de parallélisme des applications Java peut être

- contrôlé directement (manipulation des threads)
- ou régulé
  - explicitement : interface `java.util.concurrent.Executor`
  - implicitement : programmation asynchrone/fonctionnelle

Cycle de vie d'une activité



Création d'une activité – interface `Runnable`

Code d'une activité

```
class MonActivité implements Runnable {
        public void run() { /* code de l'activité */ }
}
```

Création d'une activité

```
Runnable a = new MonActivité(...);
Thread t = new Thread(a); // activité créée
t.start(); // activité démarrée
...
t.join(); // attente de la terminaison
```

```
Thread t = new Thread(() -> { /* code de l'activité */ });
t . start ();
```

Création d'activités – exemple

```
class Compteur implements Runnable {
    private int max;
    private int step;
    public Compteur(int max, int step) {
        this.max = max; this.step = step;
    }
    public void run() {
        for (int i = 0; i < max; i += step)
          System.out.println(i);
    }
}

public class DemoThread {
    public static void main (String[] a) {
        Compteur c2 = new Compteur(10, 2);
        Compteur c3 = new Compteur(15, 3);
        new Thread(c2).start();
        new Thread(c3).start();
    }
}
```

Création d'une activité – héritage de Thread

Déconseillé : risque d'erreur de redéfinition de `Thread.run`.

Héritage de la classe `Thread` et redéfinition de la méthode `run` :

Définition d'une activité

```
class MonActivité extends Thread {
    public void run() { /* code de l'activité */ }
}
```

Utilisation

```
MonActivité t = new MonActivité(); // activité créée
t.start(); // activité démarrée
...
t.join(); // attente de la terminaison
```

Quelques méthodes

Classe `Thread` :

`static Thread currentThread()`
: obtenir l'activité appelante

`static void sleep(long ms) throws InterruptedException`
: suspend l'exécution de l'activité appelante pendant la durée indiquée (ou jusqu'à ce que l'activité soit interrompue)

`void join() throws InterruptedException`
: suspend l'exécution de l'activité appelante jusqu'à la terminaison de l'activité sur laquelle `join()` est appliquée (ou jusqu'à ce que l'activité appelante soit interrompue)

Interruption

Mécanisme minimal permettant d'interrompre une activité.
La méthode `interrupt()` appliquée à une activité provoque :

soit la levée de l'exception `InterruptedException` si l'activité est bloquée sur une opération de synchronisation (`Thread.join`, `Thread.sleep`, `Condition.await`, `Object.wait`...)

soit le positionnement d'un indicateur `interrupted`, testable :

`boolean isInterrupted()` qui renvoie la valeur de l'indicateur de l'activité sur laquelle cette méthode est appliquée ;

`static boolean interrupted()` qui renvoie et *efface* la valeur de l'indicateur de l'activité appelante.

Pas d'interruption des entrées-sorties bloquantes + nécessité de tester dans le code ⇒ peu utile.

Données localisées / spécifiques

Un même objet localisé (instance de `InheritableThreadLocal` ou `ThreadLocal`) possède une valeur spécifique dans chaque activité.

```
class MyValue extends ThreadLocal {
    // surcharger éventuellement initValue
}

class Common {
    static MyValue val = new MyValue();
}
```

`// thread t1`	`// thread t2`
`o = new Integer(1);`	`o = "machin";`
`Common.val.set(o);`	`Common.val.set(o);`
`x = Common.val.get();`	`x = Common.val.get();`

Utilisation ≈ variable globale propre à chaque activité : identité de l'activité, priorité, date de création, requête traitée...

Plan

Objets de synchronisation

Le paquetage `java.util.concurrent` fournit

- une réalisation des moniteurs
- divers autres objets de synchronisation
  - barrière
  - compteur
  - sémaphore
  - ...
- le contrôle du degré de parallélisme : `Thread`, `Executor`
- des structures de données autorisant/facilitant les accès concurrents
  - accès atomiques : `ConcurrentHashMap`...
  - accès non bloquants : `ConcurrentLinkedQueue`

Moniteur Java

Principe des moniteurs

- 1 verrou assurant l'exclusion mutuelle
- plusieurs variables conditions associées à ce verrou
- attente/signalement de ces variables conditions
- = un moniteur
- pas de priorité au signalé et pas de file des signalés

Moniteur Java - un producteur/consommateur (1)

```
import java.util.concurrent.locks.*;
class ProdCon {
  Lock verrou = new ReentrantLock();
  Condition pasPlein = verrou.newCondition();
  Condition pasVide = verrou.newCondition();
  Object[] items = new Object[100];
  int depot, retrait, nbElems;

  public void deposer(Object x) throws InterruptedException {
        verrou.lock();
        while (nbElems == items.length)
            pasPlein.await();
        items[depot] = x;
        depot = (depot + 1) % items.length;
        nbElems++;
        pasVide.signal();
        verrou.unlock();
    }
    ...
```

Moniteur Java - un producteur/consommateur (2)

```
    ...
    public Object retirer() throws InterruptedException {
        verrou.lock();
        while (nbElems == 0)
          pasVide.await();
        Object x = items[retrait];
        retrait = (retrait + 1) % items.length;
        nbElems--;
        pasPlein.signal();
        verrou.unlock();
        return x;
    }
}
```

Producteurs/consommateurs

Paquetage `java.util.concurrent`

BlockingQueue

`BlockingQueue` = producteurs/consommateurs (interface)

`LinkedBlockingQueue` = prod./cons. à tampon non borné

`ArrayBlockingQueue` = prod./cons. à tampon borné

```
BlockingQueue bq = new ArrayBlockingQueue(4); // capacité
bq.put(m);      // dépôt (bloquant) d'un objet en queue
x = bq.take(); // obtention (bloquante) de l'objet en tête
```

Barrière

java.util.concurrent.CyclicBarrier

Rendez-vous bloquant entre N activités : passage bloquant tant que les N activités n'ont pas demandé à franchir la barrière ; passage autorisé pour toutes quand la N-ième arrive.

```
CyclicBarrier barriere = new CyclicBarrier(3);
for (int i = 0; i < 8; i++) {
    Thread t = new Thread(
        () -> { barriere.await();
                System.out.println("Passé !");
              });
    t.start();
}
```

Généralisation : la classe `Phaser` permet un rendez-vous (bloquant ou non) pour un *groupe variable* d'activités.

Compteurs, Verrous L/R

java.util.concurrent.countDownLatch

countDownLatch(N) valeur initiale du compteur

await() bloque si strictement positif, rien sinon.

countDown() décrémente (si strictement positif).
Lorsque le compteur devient nul, toutes les activités bloquées sont débloquées.

interface `java.util.concurrent.locks.ReadWriteLock`

Verrous pouvant être acquis en mode

- exclusif (`writeLock().lock()`),
- partagé avec les autres non exclusifs (`readLock().lock()`)

→ schéma lecteurs/rédacteurs.

Implantation : `ReentrantReadWriteLock` (avec/sans équité)

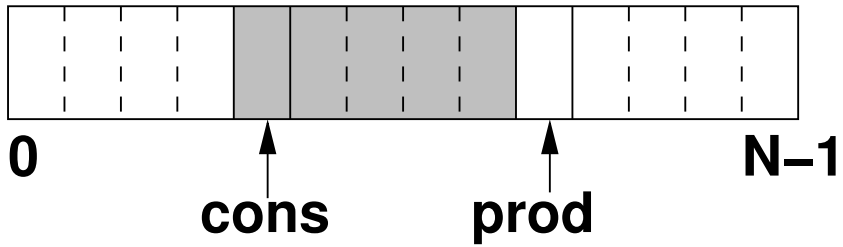
Sémaphores

Définition

Un sémaphore encapsule un entier, avec une contrainte de positivité, et deux opérations atomiques d'incrémentation et de décrémentation.

- contrainte de positivité : l'entier est toujours positif ou nul.
- opération `down` ou `acquire` : décrémente le compteur s'il est strictement positif ; si le compteur est nul, l'activité appelante est bloquée en attendant de pouvoir le décrémenter.
- opération `up` ou `release` : incrémente le compteur.

Producteurs/consommateurs avec sémaphore




```
init () { mutex := new Semaphore(1);
  vide  := new Semaphore(N); // compte le nb de cases vides
  plein  := new Semaphore(0); // compte le nb de cases occupées
}
```

```
déposer(Object v) {
  vide.acquire();
  // précond : pas tout plein
  mutex.acquire(); // excl. mutuelle
  tampon[prod] = v;
  prod = prod + 1 % N;
  mutex.release();
  // postcond : pas tout vide
  plein.release();
}
```

```
Object retirer() {
  plein.acquire();
  // précond : pas tout vide
  mutex.acquire(); // excl. mutuelle
  Object res = tampon[cons];
  cons = cons + 1 % N;
  mutex.release();
  // postcond : pas tout plein
  vide.release();
  return res;
}
```

Atomicité à grain fin

Outils pour réaliser la coordination par l'accès à des données partagées, plutôt que par suspension/réveil (attente/signal d'événement)

- le paquetage `java.util.concurrent.atomic` fournit des classes qui permettent des accès atomiques cohérents,
- et des opérations de mise à jour conditionnelle du type `TestAndSet`.
- Les lectures et écritures des références déclarées `volatile` sont atomiques et cohérentes.

$\Rightarrow$ synchronisation non bloquante

Danger

Concevoir et valider de tels algorithmes est très ardu. Ceci a motivé la définition d'objets de synchronisation et de patrons (producteurs/consommateurs...)

Plan

Services de régulation du parallélisme : exécuteurs

Idée

Séparer la création et la vie des activités des autres aspects (fonctionnels, synchronisation...)
→ définition d'un service de gestion des activités (exécuteur), régulant/adaptant le nombre d'activités effectivement actives, en fonction de la charge courante et du nombre de CPU disponibles :

- trop d'activités → consommation de ressources inutile
- pas assez d'activités → capacité de calcul sous-utilisée

Interfaces d'exécuteurs

- Interface `java.util.concurrent.Executor` :
  `void execute(Runnable r)`,
  - fonctionnellement équivalente à `(new Thread(r)).start()`
  - mais `r` ne sera pas forcément exécuté immédiatement / par une nouvelle activité.
- Interface `java.util.concurrent.ExecutorService` :
  `Future<T> submit(Callable<T> task)`
  soumission d'une tâche rendant un résultat, récupérable ultérieurement, de manière asynchrone.
- L'interface `ScheduledExecutorService` est un `ExecutorService`, avec la possibilité de spécifier un calendrier (départs, périodicité...) pour les tâches exécutées.

Utilisation d'un Executor (sans lambda)

```
import java.util.concurrent.*;
public class ExecutorExampleOld {
 public static void main(String[] a) throws Exception {
    final int NB = 10;
    ExecutorService exec = Executors.newCachedThreadPool();
    Future<?>[] res = new Future<?>[NB];
    for (int i = 0; i < NB; i++) { // lancement des travaux
      int j = i;
      exec.execute(new Runnable() {
                          public void run() {
                              System.out.println("hello" + j); }});
      res[i] = exec.submit(new Callable<Integer>() {
                          public Integer call() { return 3 * j; }});
    }
    // récupération des résultats
    for (int i = 0; i < NB; i++) {
        System.out.println(res[i].get());
    }
 }
}
```

Exécution pseudo-concurrente des NB actions et NB calculs

Utilisation d'un Executor (avec lambda)

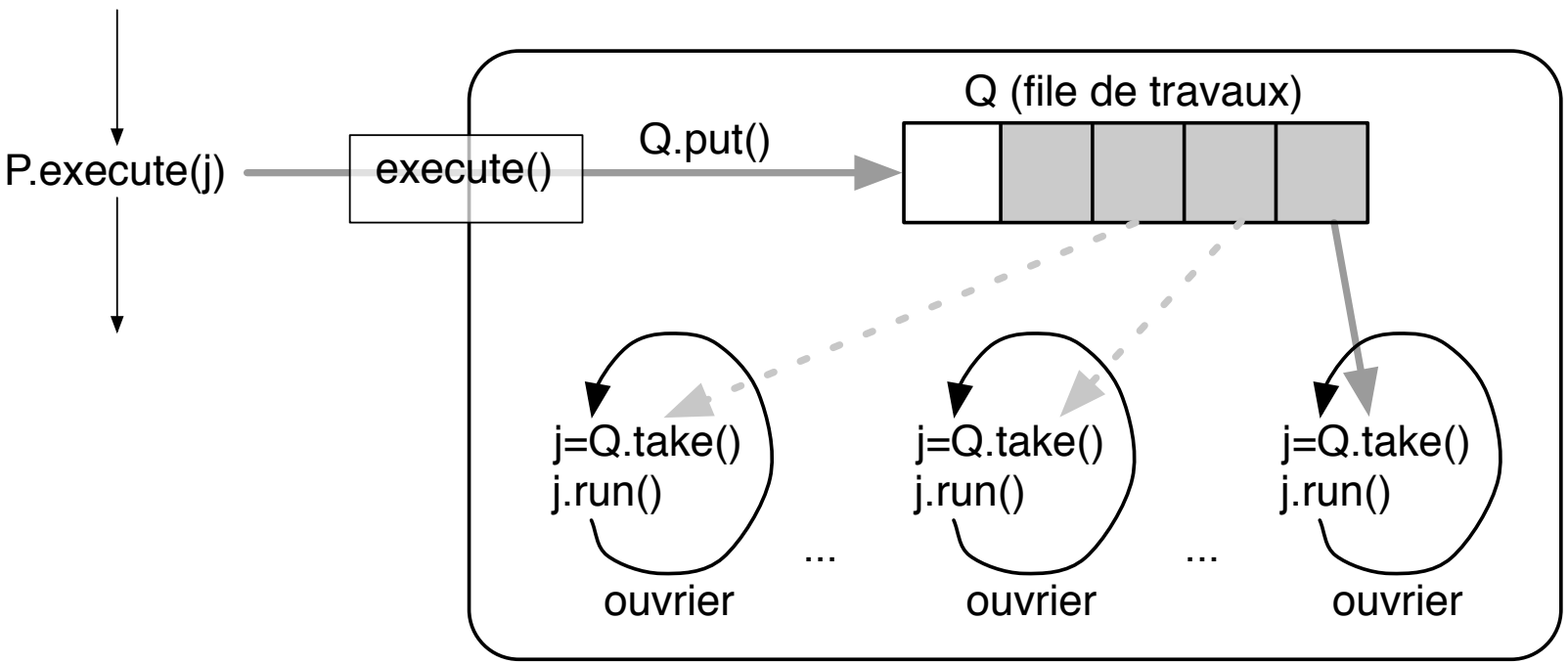
```
import java.util.concurrent.*;
public class ExecutorExample {
 public static void main(String[] a) throws Exception {
    final int NB = 10;
    ExecutorService exec = Executors.newCachedThreadPool();
    Future<?>[] res = new Future<?>[NB];

    // lancement des travaux
    for (int i = 0; i < NB; i++) {
      int j = i;
      exec.execute(() -> { System.out.println("hello" + j); });
      res[i] = exec.submit(() -> { return 3 * j; });
    }

    // récupération des résultats
    for (int i = 0; i < NB; i++) {
        System.out.println(res[i].get());
    }
 }
}
```

Exécution pseudo-concurrente des NB actions et NB calculs

Pool de Threads

Schéma de base pour la plupart des implémentations d'exécuteurs

- Une file d'attente de travaux à effectuer
- Un ensemble (fixe ou dynamique) d'activités (ouvriers)
- Une politique de distribution des travaux aux activités (réalisée par un protocole ou par une activité)



Pool P *[sans politique de distribution particulière (file partagée)]*

Implantation minimale d'un pool de threads

```
import java.util.concurrent.*;
public class NaiveThreadPool2 implements Executor {
  private BlockingQueue<Runnable> queue;

  public NaiveThreadPool2(int nthr) {
    queue = new LinkedBlockingQueue<Runnable>();
    for (int i=0; i<nthr; i++)
        (new Thread(new Worker())).start();
  }

  public void execute(Runnable job) { queue.put(job); }

  private class Worker implements Runnable {
    public void run() {
      while (true) {
        Runnable job = queue.take(); // bloque si besoin
        job.run();
      }
  }}
}
```

Exécuteurs prédéfinis

`java.util.concurrent.Executors` est une fabrique pour des stratégies d'exécution :

- Nombre fixe d'activités : `newSingleThreadExecutor()`, `newFixedThreadPool(int nThreads)`
- Nombre d'activités adaptable : `newCachedThreadPool()`
  - Quand il n'y a plus d'activité disponible et qu'un travail est déposé, création d'une nouvelle activité
  - Quand la queue est vide et qu'un délai suffisant (p.ex. 1 min) s'est écoulé, terminaison d'une activité inoccupée
- Parallélisme massif avec vol de jobs : `newWorkStealingPool(int parallelism)`

`java.util.concurrent.ThreadPoolExecutor` permet de contrôler les paramètres de la stratégie d'exécution : politique de la file (FIFO, priorités...), file bornée ou non, nombre minimal / maximal de threads...

Évaluation asynchrone

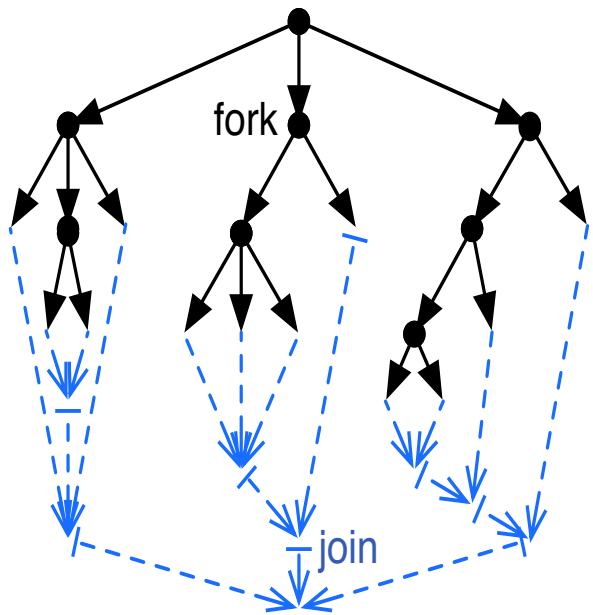
- Evaluation paresseuse : l'appel effectif d'une fonction peut être différée (éventuellement exécutée en parallèle avec l'appelant)
- `submit(...)` fournit à l'appelant une référence à la valeur future du résultat.
- L'appelant ne se bloque que quand il veut utiliser le résultat de l'appel, si l'évaluation n'est pas terminée.
  → appel de la méthode `get()` sur le `Future`

```
class FonctionAsynchrone implements Callable<TypeRetour> {
  public TypeRetour call() { ... return v; }
}

ExecutorService executor = Executors.newCachedThreadPool();
Callable<TypeRetour> fonc = new FonctionAsynchrone();
Future<TypeRetour> appel = executor.submit(fonc);
...
TypeRetour ret = appel.get(); // éventuellement bloquant
```

Schéma diviser pour régner (fork/join, map/reduce)

Schéma de base

Résultat résoudre(Problème pb) {
  si (pb est assez petit) {
    résoudre directement pb
  } **sinon** {
    décomposer le problème en parties indépendantes
    fork : créer des sous-tâches
              pour résoudre chaque partie
    join : attendre la réalisation de ces sous-tâches
    fusionner les résultats partiels
    retourner le résultat
  }

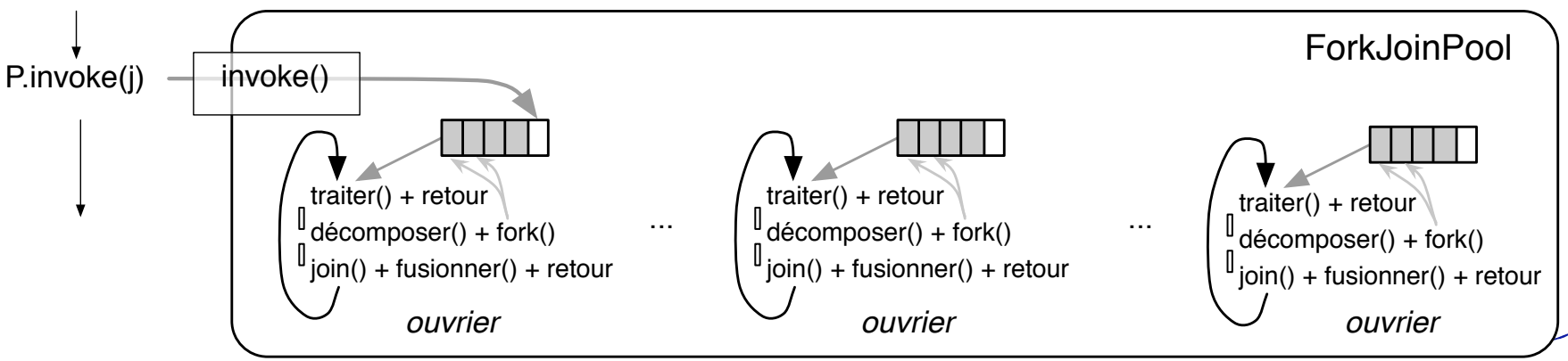


Exécuteur pour le schéma fork/join (1/3)

Difficulté de la stratégie diviser pour régner :
schéma exponentiel + coût de la création d'activités

Classe `ForkJoinPool`

- Ensemble prédéterminé (pool) d'activités,
  chacune équipée d'une file d'attente de travaux à traiter.
- Les activités gérées sont des instances de `ForkJoinTask`
  (méthodes `fork()` et `join()`)



Exécuteur pour le schéma fork/join (2/3)

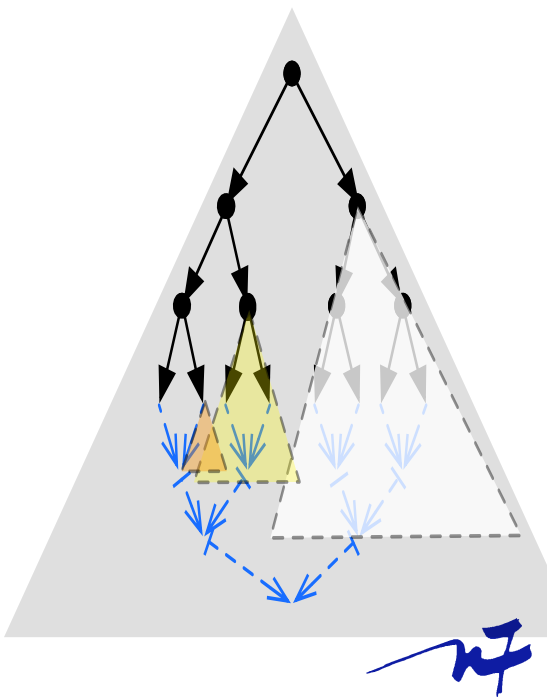
Activité d'un ouvrier du ForkJoinPool :

- Un ouvrier traite la tâche placée en tête de sa file
- Un ouvrier appelant `fork()` ajoute les travaux créés en tête de sa propre file

→

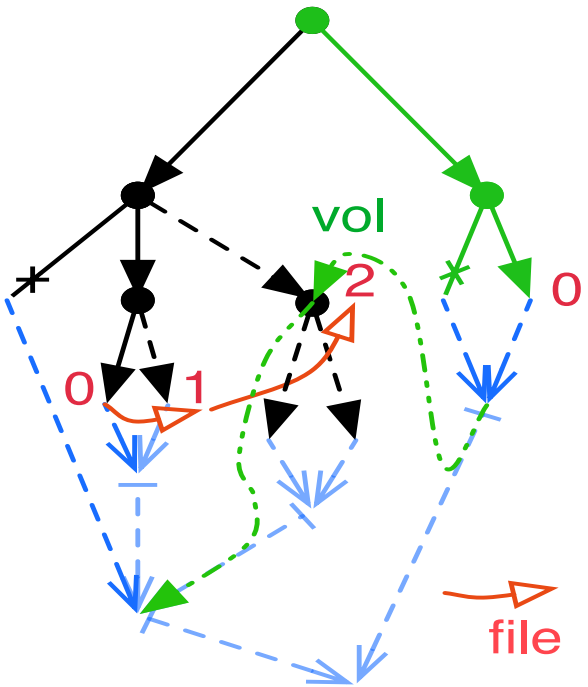
Chaque ouvrier traite un arbre de tâches qu'il

- parcourt et traite en profondeur d'abord → économie d'espace
- construit progressivement en largeur, au fur et à mesure de son parcours : lorsqu'un ouvrier descend d'un niveau, les frères de la tâche à traiter sont créés, et placés en tête de la file d'attente



Exécuteur pour le schéma fork/join (3/3)

Vol de travail : lorsqu'une activité a épuisé les travaux de sa file, elle prend un travail en queue d'une autre file



La tâche prise correspond au dernier sous-arbre (le plus proche de la racine) qui était affecté à l'ouvrier « volé »

→ pas de conflits si les sous-problèmes sont bien partitionnés

→ pas d'attente inutile pour l'ouvrier « volé » puisque la tâche volée était la dernière à traiter.

Plan

Synchronisation (Java ancien)

Obsolète

La protection par exclusion mutuelle (`synchronized`) sert encore, mais abandonner la synchronisation sur objet et utiliser les véritables moniteurs introduits dans Java 5.

Principe

- exclusion mutuelle
- attente/signalement sur un objet
- équivalent à un moniteur avec une seule variable condition

Exclusion mutuelle

Tout objet Java est équipé d'un verrou d'exclusion mutuelle.

Code synchronisé

```
synchronized (unObj) {
    // Exclusion mutuelle vis-à-vis des autres
    // blocs synchronized(cet objet)
}
```

Méthode synchronisée

```
synchronized T uneMethode(...) { ... }
```

DANGER : exclusion d'accès à l'objet sur lequel on applique la méthode, pas à la méthode elle-même. Équivalent à :

```
T uneMethode(...) { synchronized (this) { ... } }
```

Exclusion mutuelle

Chaque classe possède aussi un verrou exclusif qui s'applique aux méthodes de classe (méthodes statiques) :

```
class X {
      static synchronized T foo() {  ...  }
      static synchronized T' bar() {  ...  }
}
```

`synchronized` assure l'exécution en exclusion mutuelle pour toutes les méthodes statiques synchronisées de la classe `X`.
Ce verrou ne concerne pas l'exécution des méthodes d'objets.

Synchronisation par objet

Archaïque : ne pas utiliser.

Méthodes `wait` et `notify[All]` applicables à tout objet, pour lequel l'activité a obtenu l'accès exclusif.

`unObj.wait()` libère l'accès exclusif à l'objet et bloque l'activité appelante en attente d'un réveil via une opération `unObj.notify`

`unObj.notify()` réveille une unique activité bloquée sur l'objet, et la met en attente de l'obtention de l'accès exclusif (si aucune activité n'est bloquée, l'appel ne fait rien) ;

`unObj.notifyAll()` réveille toutes les activités bloquées sur l'objet, qui se mettent toutes en attente de l'accès exclusif.

Synchronisation basique – exemple

```
class StationVeloToulouse {
    private int nbVelos = 0;

    public void prendre() throws InterruptedException {
        synchronized(this) {
            while (this.nbVelos == 0) {
                this.wait();
            }
            this.nbVelos--;
        }
    }

    public void rendre() {
        // assume : toujours de la place
        synchronized(this) {
            this.nbVelos++;
            this.notify();
        }
    }
}
```

Synchronisation basique – exemple

```
class BarriereBasique {
    private final int N;
    private int nb = 0;
    private boolean ouverte = false;
    public BarriereBasique(int N) { this.N = N; }

    public void franchir() throws InterruptedException {
        synchronized(this) {
            this.nb++;
            this.ouverte = (this.nb >= N);
            while (! this.ouverte)
              this.wait();
            this.nb--;
            this.notifyAll();
        }
    }
    public synchronized void fermer() {
        if (this.nb == 0)
          this.ouverte = false;
    }
```

Difficultés

- prises multiples de verrous :

```
synchronized(o1) { synchronized(o2) { o1.wait(); } }
```

  `o1` est libéré par `wait`, mais pas `o2`

- une seule notification possible pour une exclusion mutuelle donnée → résolution difficile des problèmes de synchronisation

Pas des moniteurs de Hoare !

- programmation difficile

→ affecter un objet de blocage distinct à chaque requête et gérer soit-même les files d'attente

- pas de priorité au signalé, pas d'ordonnancement sur les déblocages

Plan

PThreads : activités en C, C++

Librairie multiactivité pour le C

- manipulation d'activités (création, terminaison...) : `pthread_create`, `pthread_exit`
- synchronisation : verrous, variables condition :
  - `pthread_mutex_init`, `pthread_mutex_lock`, `pthread_mutex_unlock`
  - `pthread_cond_init`, `pthread_cond_wait`, `pthread_cond_signal`, , `pthread_cond_broadcast`
- primitives annexes : données spécifiques à chaque activité, politique d'ordonnancement...

Windows API (C, C++)

Plus de 150 (?) fonctions, dont :

- création d'activité : `CreateThread`
- exclusion mutuelle : `InitializeCriticalSection`, `EnterCriticalSection`, `LeaveCriticalSection`
- synchronisation basique : `WaitForSingleObject`, `WaitForMultipleObjects`, `SetEvent`
- synchronisation ≪ évoluée ≫ : `SleepConditionVariableCS`, `WakeConditionVariable`

Note : l'API Posix Threads est aussi supportée (ouf).

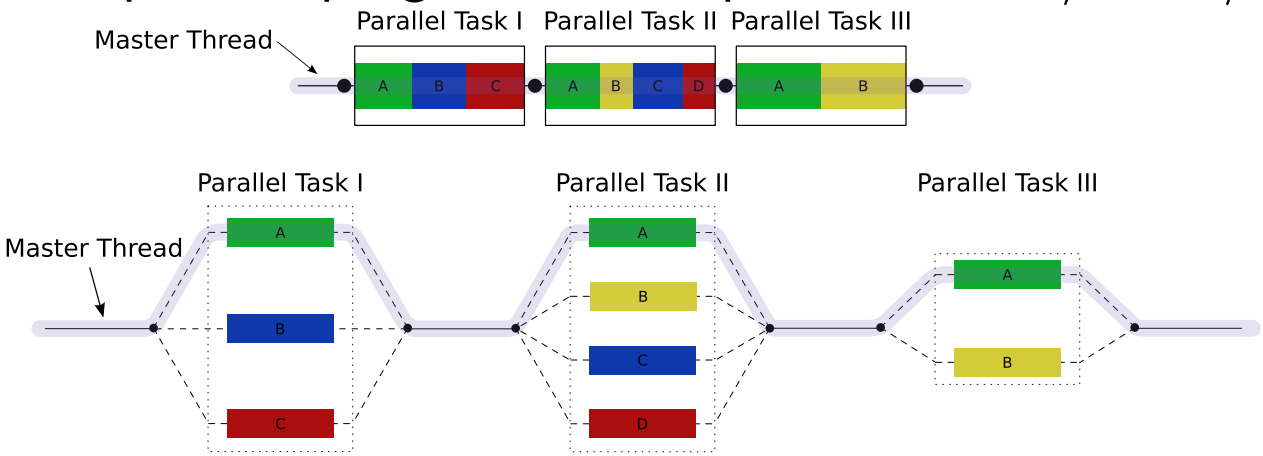
.NET (C#)

Très similaire à Java ancien :

- Création d'activité :
  `t = new System.Threading.Thread(méthode);`
- Démarrage : `t.Start();`
- Attente de terminaison : `t.Join();`
- Exclusion mutuelle : `lock(objet) { ... }`
  (mot clef du langage)
- Synchronisation élémentaire :
  `System.Threading.Monitor.Wait(objet);`
  `System.Threading.Monitor.Pulse(objet);` (= notify)
- Sémaphore :
  `s = new System.Threading.Semaphore(nbinit,nbmax);`
  `s.Release(); s.WaitOne();`

OpenMP

- API pour la programmation parallèle en C/C++/Fortran



- Annotations dans le code, interprétées par le compilateur

Boucle parallèle

```
int i, a[N];
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < N; i++)
    a[i] = 2 * i;
```

(figure : source wikicommons)

OpenMP avantages/inconvénients

+ simple
+ amélioration progressive du code
+ une seule version séquentielle / parallèle
+ peu de modifications sur le code séquentiel d'origine
– exclusivement multiprocesseur à mémoire partagée
– compilateur dédié
– peu de primitives de synchronisation (atomicité uniquement)
– gros travail sur du code mal conçu
– introduction de bugs en parallélisant du code non parallélisable

Intel Threading Building Blocks

- Bibliothèque pour C++
- Structures de contrôles optimisées `parallel_for`...
- Structures de données optimisées `concurrent_queue`...
- Peu de primitives de synchronisation (exclusion mutuelle, verrou lecteurs/rédacteurs)
- Implantation spécialisée par modèle de processeur
- Partage de tâches par « vol de travail »
- Inconvénient : portabilité (compilateur + matériel)

Conclusion

- Cycle de vie des activités
  - explicite
  - implicite par gestionnaire du parallélisme
- Synchronisation
  - Outil générique : moniteur (= exclusion mutuelle + conditions)
  - Objets spécifiques : producteur/consommateur, compteurs...