

# Systèmes concurrents

Philippe Quéinnec

9 octobre 2017



## Sixième partie

# Programmation multi-activités Java & Posix Threads



## Contenu de cette partie

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

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

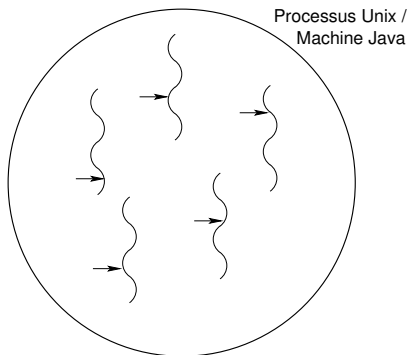


# Plan

- 1 Généralités
- 2 Threads Java
  - Manipulation des activités
- 3 Synchronisation Java
  - Moniteur Java
  - Autres objets de synchronisation
  - Régulation du parallélisme
  - Synchronisation (java d'origine)
- 4 POSIX Threads & autres approches
  - Posix Threads
  - Synchronisation Posix Thread
  - Autres approches



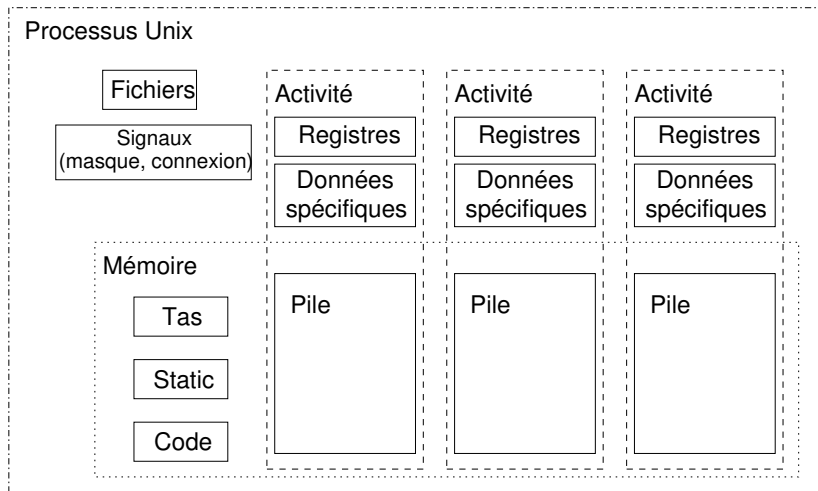
# Processus multi-activités



1 espace d'adressage, plusieurs flots de contrôle.

⇒ plusieurs **activités** (ou processus légers) au sein d'un même processus UNIX / d'une même machine virtuelle Java.





# Plan

- 1 Généralités
- 2 Threads Java
  - Manipulation des activités
- 3 Synchronisation Java
  - Moniteur Java
  - Autres objets de synchronisation
  - Régulation du parallélisme
  - Synchronisation (java d'origine)
- 4 POSIX Threads & autres approches
  - Posix Threads
  - Synchronisation Posix Thread
  - Autres approches



# Conception d'applications parallèles en Java

Java permet de manipuler

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

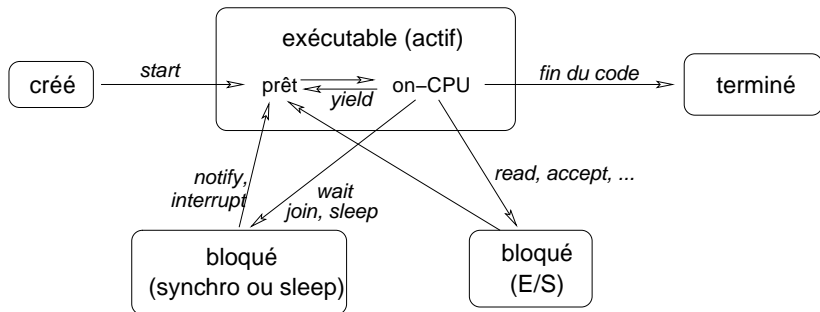
Le degré de parallélisme des applications Java peut être

- 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 1

Implantation de l'interface Runnable (méthode run)

## Définition d'une activité

```
class X implements Runnable {  
    public void run() { /* code du thread */ }  
}
```

## Utilisation

```
X x = new X(...);  
Thread t = new Thread(x); // activité créée  
t.start();                // activité démarrée  
:  
t.join();                 // attente de la terminaison
```

## 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 2

Héritage de la classe Thread et implantation de la méthode run :

### Définition d'une activité

```
class X extends Thread {  
    public void run() { /* code du thread */ }  
}
```

### Utilisation

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

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

## 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`, `Object.wait`)

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

`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  $\Rightarrow$  peu utile.



## VARIABLES LOCALISÉES

Chaque activité possède **sa propre valeur** associée à un **même** objet localisé.

Instances de `ThreadLocal` ou `InheritableThreadLocal`.

```
class MyValue extends ThreadLocal {  
    // surcharger éventuellement initialValue  
}  
class Common {  
    static MyValue val = new MyValue();  
}
```

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

```
thread t2  
o = "machin";  
Common.val.set(o);  
x = Common.val.get();
```

# Plan

- 1 Généralités
- 2 Threads Java
  - Manipulation des activités
- 3 Synchronisation Java
  - Moniteur Java
  - Autres objets de synchronisation
  - Régulation du parallélisme
  - Synchronisation (java d'origine)
- 4 POSIX Threads & autres approches
  - Posix Threads
  - Synchronisation Posix Thread
  - Autres approches





# Objets de synchronisation

Le paquetage `java.util.concurrent` fournit

- une réalisation des moniteurs
- divers autres objets de synchronisation
  - barrière
  - sémaphore
  - compteur
  - ...
- 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

```
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();
    }
    :
}
```

# Sémaphores, producteurs/consommateurs

Paquetage `java.util.concurrent`

## Sémaphore

```
Semaphore s = new Semaphore(1); // nb init. de jetons
s.acquire();                    // = down
s.release();                    // = up
```

## 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() {
        public void run() {
            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`

`init(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)

# 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.

⇒ synchronisation non bloquante

## Danger

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

# Services de régulation du parallélisme : exécuteurs

## Idée

Séparer la création et la gestion des activités des autres aspects (fonctionnels, synchronisation...)

- définition d'un service de gestion des activités (exécuteur), régulant/adaptant le nombre de threads effectivement actifs, en fonction de la charge courante et du nombre de processeurs physiques disponibles :
  - trop de threads → consommation de ressources inutile
  - pas assez de threads → capacité de calcul sous-utilisée





## Interfaces d'exécuteurs

- L'interface `java.util.concurrent.Executor` définit la méthode  
`void execute(Runnable r)`,
  - fonctionnellement équivalente à `(new Thread(r)).start()`,
  - avec la différence que `r` ne sera pas forcément exécutée immédiatement/par un thread spécifique.
- L'interface `ExecutorService` permet de soumettre (méthode `submit(...)`) des tâches rendant un résultat (`Callable`), lequel pourra être récupéré par la suite, de manière asynchrone.
- L'interface `ScheduledExecutorService` est un `ExecutorService`, avec la possibilité de spécifier un calendrier (départs, périodicité...) pour les tâches exécutées.



## Exemple d'utilisation d'un Executor

```
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];

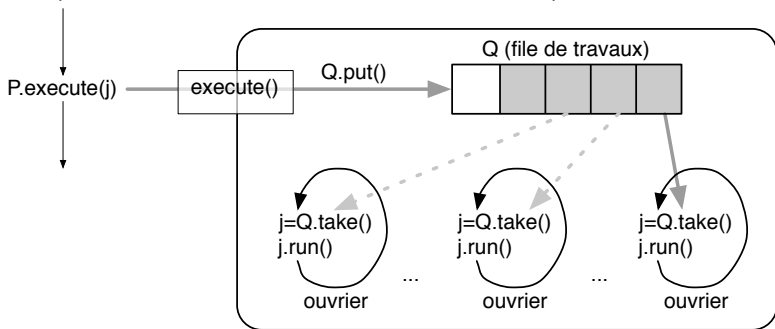
        // lancement des travaux
        for (int i = 0; i < NB; i++) {
            int j = i;
            exec.execute(() -> { System.out.println("hello"+j); });
            res[i] = exec.submit(() -> { return 3*j; });
        }

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

# 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)]

# Thread pool naïf

```
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 Worker()).start(); }
    }

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

    private class Worker extends Thread {
        public void run() {
            while (true) {
                Runnable job = queue.take(); // bloque si nécessaire
                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. 1mn) s'est écoulé, terminaison d'une activité inoccupée
- Parallélisme massif avec vol de jobs :  
`newWorkStealingPool(int parallelism)`

`java.util.concurrent.ThreadPoolExecutor` permet de contrôler l'ensemble des paramètres de la stratégie d'exécution : politique de la file (FIFO, priorités...), file bornée ou non bornée, nombre de threads minimum, maximum...



# 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 doit utiliser le résultat de l'appel (si l'évaluation de celui-ci n'est pas terminée).
  - appel de la méthode `get()` sur le Future

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

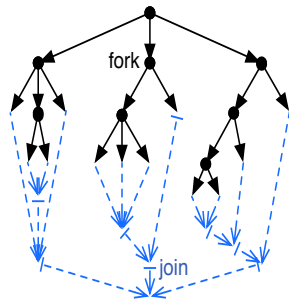
```
ExecutorService executor = Executors.newCachedThreadPool();  
Callable<TypeRetour> fonc = new FonctionAsynchrone();  
Future<TypeRetour> appel = executor.submit(fonc);  
...  
TypeRetour ret = appel.get(); // éventuellement bloquant
```

# 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
  }
}
  
```

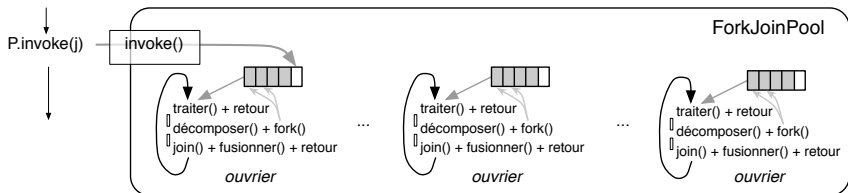


# Exécuteur pour le schéma fork/join (1/3)

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)

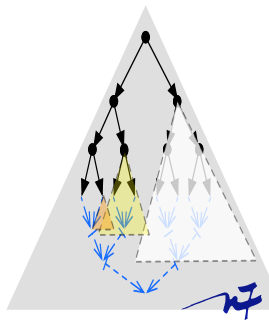
### Activité d'un ouvrier du ForkJoinPool

- 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

→

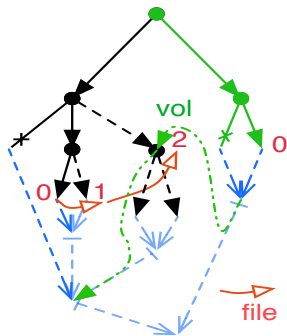
Chaque ouvrier traite un arbre de tâches qu'il

- **parcourt** (et traite) **en profondeur** d'abord (en préordre) → 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.



# Synchronisation (Java ancien)

## Principe

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

Obsolète : la protection par exclusion mutuelle (`synchronized`) sert encore, mais éviter la synchronisation sur objet et préférer les véritables moniteurs introduits dans Java 5.



# Exclusion mutuelle

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

## Code synchronisé

```
synchronized (unObj) {  
    < Excl. mutuelle vis-à-vis des autres  
    blocs synchronized(unObj) >  
}
```

## Méthode synchronisée

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

(exclusion d'accès de l'objet sur lequel on applique la méthode, pas de la méthode elle-même)



# 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

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(); } }
```

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

## Pas des moniteurs de Hoare !

- programmer comme avec des sémaphores
- 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



```
class Requête {
    bool ok;
    // paramètres d'une demande
}
List<Requête> file;
```

## demande bloquante

```
req = new Requête(...)
synchronized(file) {
    if (satisfiable(req)) {
        // + maj état applicatif
        req.ok = true;
    } else {
        file.add(req)
    }
}
synchronized(req) {
    while (! req.ok)
        req.wait();
}
```

## libération

```
synchronized(file) {
    // + maj état applicatif
    for (Requête r : file) {
        synchronized(r) {
            if (satisfiable(r)) {
                // + maj état applicatif
                r.ok = true
                r.notify();
            }
        }
    }
}
```

# Plan

- 1 Généralités
- 2 Threads Java
  - Manipulation des activités
- 3 Synchronisation Java
  - Moniteur Java
  - Autres objets de synchronisation
  - Régulation du parallélisme
  - Synchronisation (java d'origine)
- 4 **POSIX Threads & autres approches**
  - Posix Threads
  - Synchronisation Posix Thread
  - Autres approches



# Posix Threads

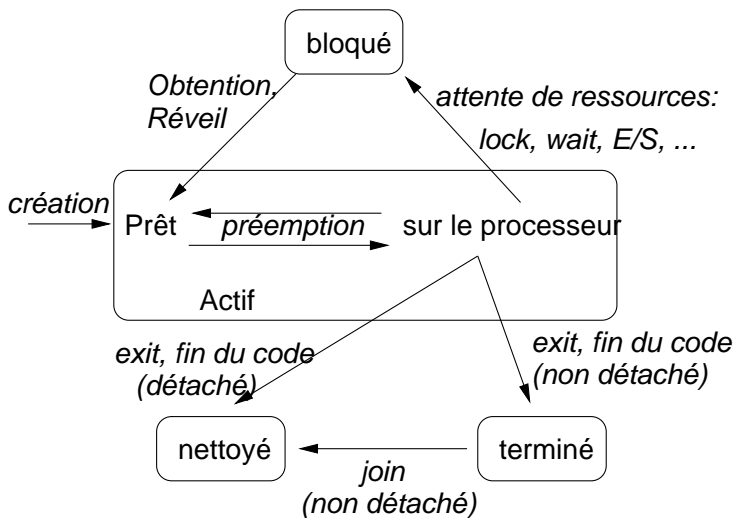
Standard de librairie multi-activités pour le C, supporté par de nombreuses implantations plus ou moins conformantes.

Contenu de la bibliothèque :

- manipulation d'activités (création, terminaison. . . )
- synchronisation : verrous, variables condition.
- primitives annexes : données spécifiques à chaque activité, politique d'ordonnancement. . .
- ajustement des primitives standard : processus lourd, E/S, signaux, routines réentrantes.



# Cycle de vie d'une activité



## Création d'une activité

```
int pthread_create (pthread_t *thread,  
                  const pthread_attr_t *attr,  
                  void * (*start_routine)(void *),  
                  void *arg);
```

Crée une nouvelle activité pour exécuter la routine indiquée, appelée avec l'argument `arg`. Les attributs sont utilisés pour définir la priorité et la politique d'ordonnancement (scheduling policy). `thread` contient l'identificateur de l'activité créée.

```
pthread_t pthread_self (void);  
int pthread_equal (pthread_t thr1, pthread_t thr2);
```

`self` renvoie l'identificateur de l'activité appelante.

`pthread_equal` : vrai si les arguments désignent la même activité.

# Terminaison

```
void pthread_exit (void *status);
```

Termine l'activité appelante en fournissant un code de retour. `pthread_exit(NULL)` est automatiquement exécuté en cas de terminaison du code de l'activité sans appel de `pthread_exit`.

```
int pthread_join (pthread_t thr, void **status);
```

Attend la terminaison de l'activité et récupère le code retour. L'activité ne doit pas être détachée ou avoir déjà été « jointe ».



## Terminaison – 2

```
int pthread_detach (pthread_t thread);
```

Détache l'activité thread.

Les ressources allouées pour l'exécution d'une activité (pile. . . ) ne sont libérées que lorsque l'activité s'est terminée et que :

- *ou* join a été effectué,
- *ou* l'activité a été détachée.





## L'activité initiale

Au démarrage, une activité est automatiquement créée pour exécuter la procédure `main`. Elle exécute une procédure de démarrage qui contient le code :

```
{ int r = main(argc,argv); exit(r); }
```

Si la procédure `main` se termine, le process unix est ensuite terminé (par l'appel à `exit`), et non pas seulement l'activité initiale. Pour éviter que la procédure `main` ne se termine alors qu'il reste des activités :

- bloquer l'activité initiale sur l'attente de la terminaison d'une ou plusieurs autres activités (`pthread_join`);
- terminer explicitement l'activité initiale avec `pthread_exit`, ce qui court-circuite l'appel de `exit`.



## Données spécifiques

### Données spécifiques

Pour une clef donnée (partagée), chaque activité possède **sa propre valeur** associée à cette clef.

```
int pthread_key_create (pthread_key_t *clef,  
                       void (*destructeur)(void *));  
  
int pthread_setspecific (pthread_key_t clef,  
                        void *val);  
  
void *pthread_getspecific (pthread_key_t clef);
```



# Synchronisation PThread

## Principe

Moniteur de Hoare élémentaire avec priorité au signaleur :

- verrous
- variables condition
- pas de transfert du verrou à l'activité signalée



# Verrou

```
pthread_mutex_t m = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;  
  
int pthread_mutex_init (pthread_mutex_t *mutex,  
                        const pthread_mutex_attr *attr);  
  
int pthread_mutex_destroy (pthread_mutex_t *m);
```



# Verrouillage/déverrouillage

```
int pthread_mutex_lock (pthread_mutex_t *m);  
int pthread_mutex_trylock (pthread_mutex_t *m);  
int pthread_mutex_unlock (pthread_mutex_t *m);
```

- `lock` verrouille le verrou, avec blocage en attente si déjà verrouillé. Renvoie 0 si ok.
- `trylock` verrouille le verrou si possible et renvoie 0, sinon renvoie EBUSY si le verrou est déjà verrouillé.
- `unlock` déverrouille. Seule l'activité qui a verrouillé `m` a le droit de le déverrouiller.



## Variable condition

```
pthread_cond_t vc = PTHREAD_COND_INITIALIZER;  
  
int pthread_cond_init (pthread_cond_t *vc,  
                      const pthread_cond_attr *attr);  
  
int pthread_cond_destroy (pthread_cond_t *vc);
```



# Attente/signal

```
int pthread_cond_wait (pthread_cond_t*,
                      pthread_mutex_t*);
int pthread_cond_timedwait (pthread_cond_t*,
                            pthread_mutex_t*,
                            const struct timespec *abstime);
```

`cond_wait` l'activité appelante doit posséder le verrou spécifié. L'activité se bloque sur la variable condition après avoir libéré le verrou. L'activité reste bloquée jusqu'à ce que `vc` soit signalée et que l'activité ait réacquis le verrou.

`cond_timedwait` comme `cond_wait` avec délai de garde. À l'expiration du délai de garde, le verrou est reobtenu et la procédure renvoie `ETIMEDOUT`.



# Attente/signal

```
int pthread_cond_signal (pthread_cond_t *vc);  
int pthread_cond_broadcast (pthread_cond_t *vc);
```

`cond_signal` signale la variable condition : une activité bloquée sur la variable condition est réveillée et tente de réacquérir le verrou de son appel de `cond_wait`. Elle sera effectivement débloquée quand elle le réacquerra.

`cond_broadcast` toutes les activités en attente sont réveillées, et tentent d'obtenir le verrou correspondant à leur appel de `cond_wait`.





# Ordonnancement

Par défaut : ordonnancement arbitraire pour l'acquisition d'un verrou ou le réveil sur une variable condition.

Les activités peuvent avoir des priorités, et les verrous et variables conditions peuvent être créés avec respect des priorités.



## 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#)

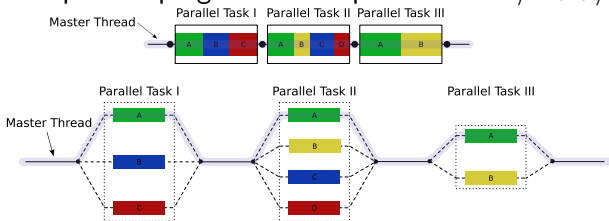
Très similaire à Java :

- 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;
```

# OpenMP avantages/inconvénients

- + simple
- + amélioration progressive du code
- + une seule version séquentielle / parallèle
- + peu de modifications sur le code séquentiel d'origine
- exclusivement multiprocesseurs 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)

