

Sixième chapitre

Programmer avec les threads

- Introduction aux threads

- Comparaison entre threads et processus
- Avantages et inconvénients des threads
- Design d'applications multi-threadées

- Modèles de threads

- Threads utilisateur ou noyau, modèles M:1, 1:1 et M:N
- Études de cas

- Programmer avec les Pthreads

- Gestion des threads
- Mutexes, sémaphores POSIX et variables de condition

- Conclusion

Qu'est ce qu'un thread

Définition d'un thread

- ▶ Techniquement : un **flot d'exécution** pouvant être ordonnancé par l'OS
- ▶ En pratique : une procédure s'exécutant indépendamment du main
- ▶ Mot français : fil d'exécution ou processus léger (*lightweight process*)

Programme *multi-threadé*

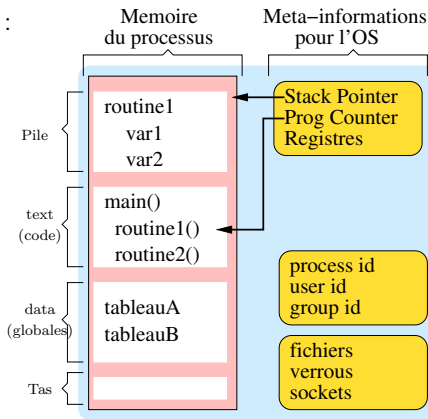
- ▶ Un programme contenant diverses fonctions et procédures
- ▶ Ces procédures peuvent être exécutées simultanément et/ou indépendamment

Comparaison de processus et threads (1/2)

Processus «classique» (ou «lourd»)

Processus UNIX contient diverses informations :

- ▶ PID, PGID, UID, GID
- ▶ L'environnement
- ▶ Répertoire courant
- ▶ Pointeur d'instruction (PC)
- ▶ Registres
- ▶ Pile
- ▶ Tas
- ▶ Descripteurs de fichier
- ▶ Gestionnaires de signaux
- ▶ Bibliothèques partagées
- ▶ Outils d'IPC (tubes, sémaphores, shm, etc)

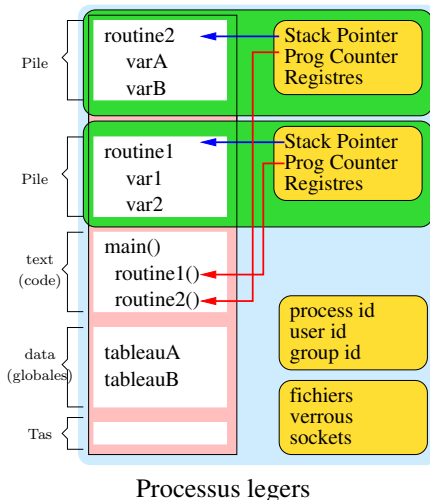


Processus classique

Comparaison de processus et threads (2/2)

Processus légers

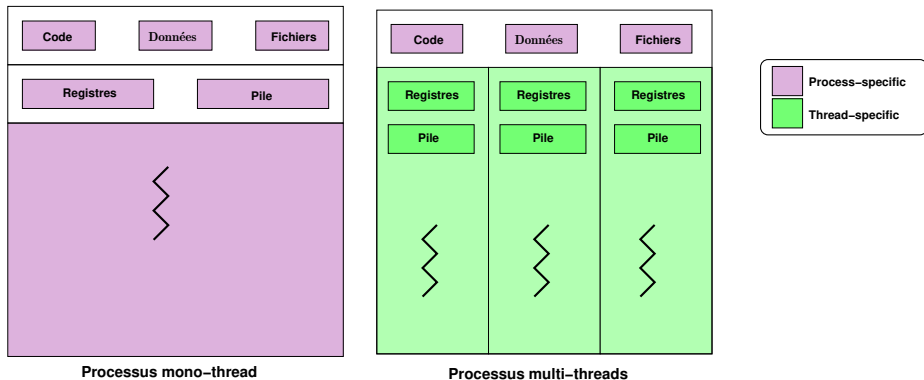
- ▶ Plusieurs threads coexistent dans le même processus «lourd»
- ▶ Ils sont ordonnançables séparément
- ▶ Informations spécifiques
 - ▶ Pile
 - ▶ Registres
 - ▶ Priorité (d'ordonnancement)
 - ▶ Données spécifiques
 - ▶ Liste des signaux bloqués
- ▶ Le reste est partagé
 - ▶ Si un thread ferme un fichier, il est fermé pour tous
 - ▶ Si un thread fait `exit()`, tout s'arrête
 - ▶ Globales et pointeurs vers le tas : variables partagées (à synchroniser)



Processus légers

Processus vs. thread en résumé

- ▶ Processus : environnement d'exécution pour les threads au sein de l'OS
État vis-à-vis de l'OS (fichiers ouverts) et de la machine (mémoire)
- ▶ Processus = Thread + Espace d'adressage



L'espace d'adressage est *passif*; le thread est *actif*

Pourquoi processus dits «légers» ?

Les threads contiennent moins de choses

- ▶ Partagent la plupart des ressources du processus lourd
- ▶ Ne dupliquent que l'indispensable
- ▶ \Rightarrow 2 threads dans 1 processus consomment moins de mémoire que 2 processus

Les threads sont plus rapides à créer

- ▶ Car il y a moins de choses à dupliquer

Les communications inter-threads sont rapides

- ▶ Pas besoin d'appels systèmes

Usage des threads

Pourquoi utiliser les threads

- ▶ Objectif principal : gagner du temps (threads moins gourmands que processus)

Quand utiliser les threads

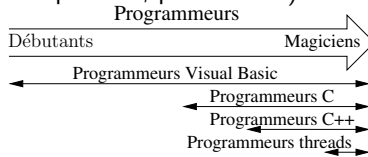
- ▶ Pour un recouvrement calcul/communication
- ▶ Pour avoir différentes tâches de priorité différentes
ordonnancement temps réel «mou»
- ▶ Pour gérer des événements asynchrones
Tâches indépendantes activées par des événements de fréquence irrégulière
Exemple : Serveur web peut répondre à plusieurs requêtes en parallèle
- ▶ Pour tirer profit des systèmes SMP ou CMP (multi-cœurs)

Quand (pourquoi) ne pas utiliser les threads

Problèmes du partage de la mémoire

- ▶ Risque de corruption mémoire (risque de compétition)
- ▶ Besoin de synchronisation (risque d'interblocage)
- ⇒ Communication inter-threads rapide mais dangereuse
- ▶ Segfault d'un thread → mort de tous
- ▶ Casse l'abstraction en modules indépendants
- ▶ Extrêmement difficile à debugger (dépendances temporelles ; peu d'outils)

Programmer avec les threads,
c'est enlever les gardes-fous de l'OS
pour gagner du temps



(Why Threads are a Bad Idea, USENIX96)

Obtenir de bonnes performances est très difficile

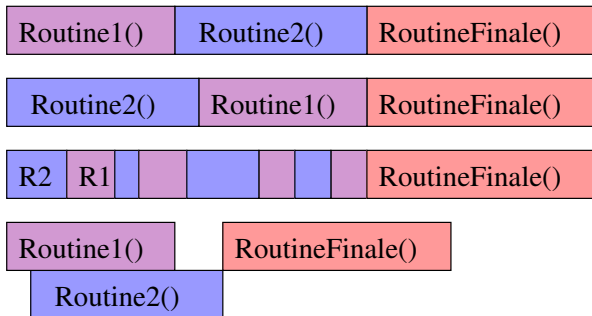
- ▶ Verrouillage simple (moniteurs) amène peu de concurrence
- ▶ Verrouillage fin augmente la complexité (concurrence pas facilement meilleure)

Design d'applications multi-threadées

Applications candidates

- ▶ Applis organisées en tâches indépendantes s'exécutant indépendamment
- ▶ Toutes routines pouvant s'exécuter en (pseudo-)parallèle sont candidates
- ▶ Interface interactive (↷ latence indésirable) avec des calculs ou du réseau

Dans l'exemple, routine1() et routine2() sont candidates



Code réentrant et threads-safeness

Code réentrant

- ▶ **Définition** : Peut être appelé récursivement ou depuis plusieurs «endroits»
- ▶ Ne pas maintenir d'état entre les appels
 - ▶ **Contre-exemple** : strtok, rand (strtok_r est réentrante)
- ▶ Ne pas renvoyer un pointeur vers une statique
 - ▶ **Contre-exemple** : ctime (ctime_r est réentrante)

Code thread-safe

- ▶ **Définition** : Fonctionne même si utilisé de manière concurrente
- ▶ Si le code n'est pas réentrant, il faut le protéger par verrous

Problème des dépendances

- ▶ **Votre code est thread-safe, mais vos bibliothèques le sont-elles ?**
- ▶ La libc est réentrante (sous linux modernes)
 - ▶ Exemple de errno : chaque thread a maintenant son propre errno
- ▶ Pour le reste, il faut vérifier (voire, supposer qu'il y a un problème)
- ▶ En cas de problème, il faut protéger les appels grâce à un verrou explicite

Patterns classiques avec les threads

Maitre/esclaves

- ▶ Un thread centralise le travail à faire et le distribue aux esclaves
- ▶ Pool d'esclaves statique ou dynamique
- ▶ Exemple : serveur web

Pipeline

- ▶ La tâche est découpée en diverses étapes successives
Chaque thread réalise une étape et passe son résultat au suivant
- ▶ Exemple : traitement multimédia (streaming)

Peer to peer

- ▶ Comme un maitre/esclaves, mais le maitre participe au travail

Sixième chapitre

Programmer avec les threads

- Introduction aux threads

 - Comparaison entre threads et processus

 - Avantages et inconvénients des threads

 - Design d'applications multi-threadées

- Modèles de threads

 - Threads utilisateur ou noyau, modèles M:1, 1:1 et M:N

 - Études de cas

- Programmer avec les Pthreads

 - Gestion des threads

 - Mutexes, sémaphores POSIX et variables de condition

- Conclusion

Implantation des threads : Modèle M:1

Tous les threads d'un processus mappés sur un seul thread noyau

Service implémenté dans une bibliothèque spécifique

▶ Gestion des threads au niveau utilisateur

▶ Avantages :

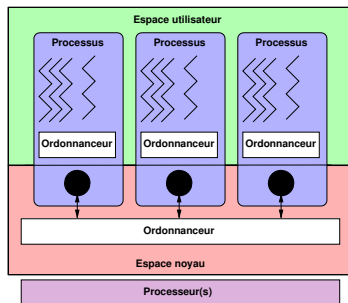
- ▶ Pas besoin de modifier le noyau
- ▶ Rapides pour créer un thread, et pour changer de contexte
- ▶ Portables entre OS

▶ Inconvénients :

- ▶ Ordonnement limité à celui d'un processus système
⇒ «Erreurs» d'ordonnement
- ▶ Appel bloquant dans un thread
⇒ blocage de tous
- ▶ Pas de parallélisme
(dommage pour les SMP)

⇒ Efficace, mais pas de concurrence

▶ Exemples : Fibres Windows, Java Green Threads, GNU pth (*portable thread*)



(D'après F. Silber)

Modèle 1:1

Chaque thread utilisateur mappé sur un thread noyau

Modification du noyau pour un support aux threads

- ▶ Gestion des threads au niveau système (LightWeight Process – LWP)

▶ Avantages

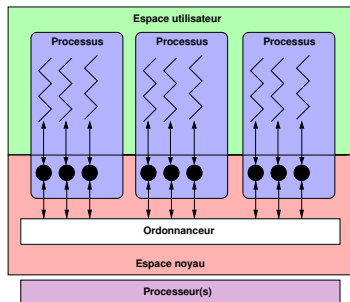
- ▶ Appel bloquant dans un thread
⇒ exécution d'un autre
- ▶ Parallélisme possible
- ▶ Ordonnancement du noyau plus approprié

▶ Inconvénients

- ▶ Besoin d'appels systèmes spécifiques (`clone()` pour la création sous linux)
- ▶ Commutation réalisée par le noyau
⇒ changements de contexte (coûteux)

⇒ Concurrence importante, mais moins efficace
(nombre total de threads souvent borné)

- ▶ Exemples : Windows 95/98/NT/2000, OS/2, Linux, Solaris 9+



(D'après F. Silber)

Modèle M:N

M threads utilisateur mappés sur N threads noyau ($M \geq N \geq 1$)

Services utilisateur basés sur des services noyau

▶ Coopération entre l'ordonnanceur noyau et un ordonnanceur utilisateur

▶ **Avantages** : le meilleur des deux mondes

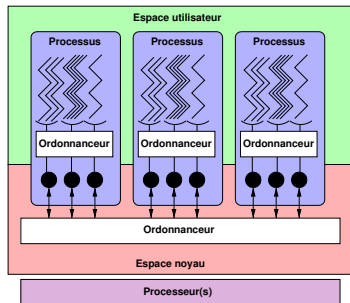
- ▶ Threads noyaux plus basiques et efficaces
- ▶ Threads utilisateurs plus flexibles
- ▶ Moins de changement de contexte
- ▶ Pas d'erreur d'ordonnancement

▶ **Inconvénients** :

- ▶ Extrêmement difficile à implémenter
- ▶ Un peu «usine à gaz» :
 - ▶ modèle théorique plus pur
 - ▶ implémentations complexes
 - ▶ efficacité parfois discutable

▶ Concurrence importante, bonne efficacité (?)

▶ **Exemples** : Solaris avant v9, IRIX, HP-UX



(D'après F. Silber)

Études de cas (1/3)

Pthreads

- ▶ `POSIX threads` : norme standardisé par IEEE POSIX 1003.1c (1995)
- ▶ Ensemble de types et fonctions C dont la sémantique est spécifiée
- ▶ Seulement une API : implémentation sous tous les UNIX (et même Windows)

Threads Solaris

- ▶ Modèle M:N
- ▶ Threads intermédiaires (LWP)

Threads Windows 2000

- ▶ Modèle 1:1 pour les WinThreads
- ▶ Modèle M:1 pour les fibres (l'OS ne voit pas les fibres)

Threads Java

- ▶ Extension de la classe `Thread` ; Implantation de l'interface `Runnable`
- ▶ Implémentation dépend de la JVM utilisée

Études de cas (2/3)

Threads sous linux

- ▶ Threads mappé sur des *tâches* (tasks)
- ▶ Appel système `clone()` pour dupliquer une tâche (`fork()` implémenté avec ça)

Plusieurs bibliothèques implémentant le standard Pthreads

- ▶ Depuis 1996 : **LinuxThreads**
 - ▶ Modèle 1:1, par Xavier Leroy (INRIA, créateur d'OCaml)
 - ▶ Pas complètement POSIX (gestion des signaux, synchronisation)
 - ▶ \approx 1000 threads au maximum
- ▶ **Next Generation POSIX Threads**
 - ▶ Modèle M:N, par IBM ; abandonné
 - ↪ NPTL avançait plus vite
 - ↪ M:N induisait une complexité trop importante
- ▶ Maintenant **Native POSIX Thread Library**
 - ▶ Modèle 1:1, par Ulrich Drepper (acteur principal `libc`, chez Red Hat)
 - ▶ Totalemment conforme à POSIX
 - ▶ Bénéficie des fonctionnalités du noyau Linux 2.6 (ordonnancement $O(1)$)
 - ▶ Création de 100 000 threads en 2 secondes (contre 15 minutes sans)

Études de cas (3/3)

Possibilités de quelques systèmes d'exploitations

	1 seul espace d'adressage	plusieurs espaces d'adressage
1 seul thread par espace d'adressage	MS/DOS Macintosh (OS9)	Unix traditionnels
plusieurs threads par espace d'adressage	Systèmes embarqués	Win/NT, Linux, Solaris HP-UP, OS/2, Mach, VMS

Sixième chapitre

Programmer avec les threads

- Introduction aux threads

 - Comparaison entre threads et processus

 - Avantages et inconvénients des threads

 - Design d'applications multi-threadées

- Modèles de threads

 - Threads utilisateur ou noyau, modèles M:1, 1:1 et M:N

 - Études de cas

- Programmer avec les Pthreads

 - Gestion des threads

 - Mutexes, sémaphores POSIX et variables de condition

- Conclusion

Généralités sur l'interface Pthreads

Trois grandes catégories de fonctions / types de données

Gestion des threads

- ▶ Créer des threads, les arrêter, contrôler leurs attributs, etc.

Synchronisation par mutex (**mutual exclusion**)

- ▶ Créer, détruire verrouiller, déverrouiller des mutex; Contrôler leurs attributs

Variables de condition :

- ▶ Communications entre threads partageant un mutex
- ▶ Les créer, les détruire, attendre dessus, les signaler; Contrôler leurs attributs

Préfixe d'identificateur	Groupe
pthread_	Threads eux-mêmes et diverses fonctions
pthread_attr_	Attributs des threads
pthread_mutex_	Mutexes
pthread_cond_	Variables de condition

...

...

L'interface Pthreads en pratique

- ▶ Types de données sont structures opaques, fonctions d'accès spécifiques
- ▶ L'interface compte 60 fonctions, nous ne verrons pas tout
- ▶ Il faut charger le fichier d'entête `pthread.h` dans les sources
- ▶ Il faut spécifier l'option `-pthread` à gcc

thread-ex1.c

```
#include <pthread.h>
void *hello( void *arg ) {
    int *id = (int*)arg;
    printf("%d: hello world \n", *id);
    pthread_exit(NULL);
}
int main (int argc, char *argv[ ]) {
    pthread_t thread[3];
    int id[3]={1,2,3};
    int i;

    for (i=0;i<3;i++) {
        printf("Crée thread %d\n",i);
        pthread_create(&thread[i], NULL,
                      hello, (void *)&id[i]);
    }
    pthread_exit(NULL);
}
```

```
$ gcc -pthread -o thread-ex1 thread-ex1.c
$ ./thread-exemple1
Crée thread 1
Crée thread 2
Crée thread 3
1 : hello world
2 : hello world
3 : hello world
$
```

Identification et création des threads

Identifier les threads

- ▶ **pthread_t** : équivalent du pid_t (c'est une structure opaque)
- ▶ **pthread_t pthread_self ()** : identité du thread courant
- ▶ **int pthread_equal (pthread_t, pthread_t)** : test d'égalité

Créer de nouveaux threads

- ▶ Le programme est démarré avec un seul thread, les autres sont créés à la main
- ▶ **int pthread_create(identité, attributs, fonction, argument);**
 - ▶ **identité** : [pthread_t*] identifieur unique du nouveau thread (*rempli par l'appel*)
 - ▶ **attributs** : Pour modifier les attributs du thread (NULL → attributs par défaut)
 - ▶ **fonction** : [void (*)(void *)] Fonction C à exécuter (le «main du thread»)
 - ▶ **argument** : argument à passer à la fonction. Doit être transtypé en void*
 - ▶ **retour** : 0 si succès, errno en cas de problème

Exercice : Comment savoir dans quel ordre vont démarrer les threads créés ?

On peut pas, ca dépend des fois (gare aux races conditions)

Exercice : Comment passer deux arguments à la fonction ?

en définissant une structure

Exemple FAUX de passage d'arguments

thread-faux1.c

```
#include <pthread.h>
void *hello( void *id ) {
    printf("%d: hello world \n", (char *) id);
    pthread_exit(NULL);
}

int main (int argc, char *argv[ ]) {
    pthread_t th[3];
    int i;

    for (i=0;i<3;i++) {
        printf("Crée thread %d\n",i);
        pthread_create(&th[i], NULL, hello, (void *)&i);
    }

    pthread_exit(NULL);
}
```

Exercice : Quel est le problème ?

On transforme `i` en globale inter-thread, et sa valeur peut donc être changée dans le thread lanceur avant le démarrage du thread utilisateur. C'est une belle condition de compétition.

Exemple de passage d'arguments complexes

```
#include <pthread.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#define NUM_THREADS 8

typedef struct data {
    int thread_id,sum;
    char *msg;
} data_t;

data_t data_array[NUM_THREADS];

void *PrintHello(void *arg) {
    data_t *mine = (data_t *)arg;

    sleep(1);
    printf("Thread %d: %s Sum=%d\n",
        mine->thread_id,
        mine->msg,
        mine->sum);
    pthread_exit(NULL);
}
```

```
int main(int argc, char *argv[ ]) {
    pthread_t threads[NUM_THREADS];
    int rc, t, sum=0;

    char *messages[NUM_THREADS] = {
        "EN: Hello World!", "FR: Bonjour, le monde!",
        "SP: Hola al mundo", "RU: Zdravstvyye, mir!",
        "DE: Guten Tag, Welt!", "Klingon: Nuq neh!",
        "JP: Sekai e konnichiwa!",
        "Latin: Orbis, te saluto!" };

    for(t=0;t<NUM_THREADS;t++) {
        sum = sum + t;
        thread_data_array[t].thread_id = t;
        thread_data_array[t].sum = sum;
        thread_data_array[t].message = messages[t];
        printf("Creating thread %d\n", t);
        rc = pthread_create(&threads[t], NULL,
            PrintHello,
            (void*)&thread_data_array[t]);

        if (rc) {
            printf("ERROR; _create() returned %d\n", rc);
            exit(-1);
        }
    }
    pthread_exit(NULL);
}
```


Terminaison des threads

Causes de terminaison des threads

- ▶ Le thread termine sa fonction initiale
- ▶ Le thread appelle la routine `pthread_exit()`
- ▶ Le thread est tué par un autre thread appelant `pthread_cancel()`
- ▶ Tout le processus se termine à cause d'un `exit`, `exec` ou `return` du `main()`

Terminer le thread courant

- ▶ `void pthread_exit(void *retval);`
 - ▶ `retval` : valeur de retour du thread (optionnel)
- ▶ Pour récupérer code de retour, un autre thread doit utiliser `pthread_join()`

Attendre la fin d'un thread

Joindre un thread

- ▶ `int pthread_join (pthread_t, void **)`
- ▶ Le thread A joint le thread B : A bloque jusqu'à la fin de B
- ▶ Utile pour la synchronisation (rendez-vous)
- ▶ Second argument reçoit un pointeur vers la valeur retour du `pthread_exit()`
- ▶ Similaire au `wait()` après `fork()`
(mais pas besoin d'être le créateur pour joindre un thread)

Détacher un thread

- ▶ `int pthread_detach (pthread_t)`
- ▶ Détacher un thread revient à dire que personne ne le joindra à sa fin
- ▶ Le système libère ses ressources au plus vite
- ▶ Évite les threads zombies quand on ne veut ni synchro ni code retour
- ▶ On ne peut pas ré-attacher un thread détaché

Attributs des threads

C'est le second argument du create

Les fonctions associées

- ▶ Création et destruction d'un objet à passer en argument à `_create` :
 - ▶ `int pthread_attr_init (pthread_attr_t *)`
 - ▶ `int pthread_attr_destroy (pthread_attr_t *)`
- ▶ Lecture : `int pthread_attr_getX (const pthread_attr_t *, T *)`
- ▶ Mise à jour : `int pthread_attr_setX (pthread_attr_t *, T)`

Attributs existants

- ▶ `detachstate` (int) : `PTHREAD_CREATE_[JOINABLE|DETACHED]`
- ▶ `schedpolicy` (int)
 - ▶ `SCHED_OTHER` : Ordonnancement classique
 - ▶ `SCHED_RR` : Round-Robin (chacun son tour)
 - ▶ `SCHED_FIFO` : Temps réel
- ▶ `schedparam` (int) : priorité d'ordonnancement
- ▶ `stackaddr` (void*) et `stacksize` (size_t) pour régler la pile
- ▶ `inheritsched`, `scope`

Exemple de gestion des threads

```
#include <pthread.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#define NUM_THREADS 3

void *travail(void *null) {
    int i;
    double result=0.0;
    for (i=0; i<1000000; i++)
        result = result + (double)random();
    printf("Resultat = %e\n",result);
    pthread_exit(NULL);
}

int main(int argc, char *argv[ ]) {
    pthread_t thread[NUM_THREADS];
    pthread_attr_t attr;
    int rc, t;
    /* Initialise et modifie l'attribut */
    pthread_attr_init(&attr);
    pthread_attr_setdetachstate(&attr,
                               PTHREAD_CREATE_JOINABLE);
```

```
for(t=0;t<NUM_THREADS;t++) {
    printf("Creating thread %d\n", t);
    if ((rc = pthread_create(&thread[t], &attr,
                            travail, NULL))) {
        printf("ERREUR de _create() : %d\n", rc);
        exit(-1);
    }
    /* Libère l'attribut */
    pthread_attr_destroy(&attr);
    /* Attend les autres */
    for(t=0;t<NUM_THREADS;t++) {
        if ((rc = pthread_join(thread[t],
                                /*pas de retour attendu*/NULL))) {
            printf("ERREUR de _join() : %d\n", rc);
            exit(-1);
        }
        printf("Rejoint thread %d. (ret=%d)\n",
              t, status);
    }
    pthread_exit(NULL);
}
```

Sixième chapitre

Programmer avec les threads

- Introduction aux threads

 - Comparaison entre threads et processus

 - Avantages et inconvénients des threads

 - Design d'applications multi-threadées

- Modèles de threads

 - Threads utilisateur ou noyau, modèles M:1, 1:1 et M:N

 - Études de cas

- Programmer avec les Pthreads

 - Gestion des threads

 - Mutexes, sémaphores POSIX et variables de condition

- Conclusion

Les mutex Pthreads

Interface de gestion

- ▶ Type de donnée : `pthread_mutex_t`
- ▶ Création :
 - ▶ statique : `pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;`
 - ▶ dynamique : `pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *, pthread_mutexattr_t *)`;
Premier argument : adresse de (pointeur vers) la variable à initialiser
- ▶ Destruction : `pthread_mutex_destroy(mutex)` (doit être déverrouillé)
- ▶ (pas d'attributs POSIX, mais il y en a dans certaines implémentations)

Interface d'usage

- ▶ `pthread_mutex_lock(mutex)` Bloque jusqu'à obtention du verrou
- ▶ `pthread_mutex_trylock(mutex)` Obtient le verrou ou renvoie EBUSY
- ▶ `pthread_mutex_unlock(mutex)` Libère le verrou

Usage des mutex

Les mutex sont un «gentlemen's agreement»

Thread 1

```
Lock  
A = 2  
Unlock
```

Thread 2

```
Lock  
A = A+1  
Unlock
```

Thread 3

```
A = A*B
```

- ▶ Thread 3 crée une condition de compétition même si les autres sont disciplinés (cf. les verrous consultatifs sur les fichiers)
- ▶ Pas d'équivalent des verrous impératifs sur la mémoire
- ▶ Pas de moniteurs dans PThreads (durs à implémenter en C)

Sémaphores POSIX

- ▶ On parle ici de l'interface POSIX, pas de celle IPC Système V
- ▶ `#include <semaphore.h>`
- ▶ Type : `sem_t`

Interface de gestion

- ▶ `int sem_init(sem_t *sem, int pshared, unsigned int valeur)`
pshared != 0 ⇒ sémaphore partagée entre plusieurs processus (pas sous linux)
- ▶ `int sem_destroy(sem_t * sem)` (personne ne doit être bloqué dessus)

Interface d'usage

- ▶ `int sem_wait(sem_t * sem)` réalise un P()
- ▶ `int sem_post(sem_t * sem)` réalise un V()
- ▶ `int sem_trywait(sem_t * sem)` P() ou renvoie EAGAIN pour éviter blocage
- ▶ `int sem_getvalue(sem_t * sem, int * sval)`

Variables de condition

Interface de gestion

- ▶ Type de donnée : `pthread_cond_t`
- ▶ Création :
 - ▶ statique : `pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER ;`
 - ▶ dynamique : `int pthread_cond_init(pthread_cond_t *, pthread_condattr_t *)`
- ▶ Destruction : `int pthread_cond_destroy(pthread_cond_t *)`
- ▶ Il n'y a pas d'attributs POSIX (ni linux) pour les conditions

Rappel du principe des conditions

- ▶ Cf. conditions Java (`wait()` et `notifyAll()`)
- ▶ Autre mécanisme de synchronisation.
 - ▶ `mutex` : solution pratique pour l'exclusion mutuelle
 - ▶ `sémaphore` : solution pratique pour les cohortes
 - ▶ `condition` : solution pratique pour les rendez-vous
 - ▶ `compare-and-swap` : solution pour la synchronisation non-bloquante

Exemple d'usage des conditions

Thread principal

- (1) Déclare et initialise une globale requérant une synchronisation (ex : compteur)
- (1) Déclare et initialise une variable de condition et un mutex associé
- (1) Crée deux threads (A et B) pour faire le travail

Thread A

- (2) Travaille jusqu'au rendez-vous (point où B doit remplir une condition, *compteur* > 0 par ex)
- (2) Verrouille mutex et consulte variable
- (2) Attend la condition de B
ça libère le mutex (pour B) et gèle A
- (4) Au signal, réveil
mutex automagiquement repris
- (4) Déverrouille explicitement

Thread B

- (2) Fait des choses
- (3) Verrouille le mutex
- (3) Modifie la globale attendue par A
- (3) Si la condition est atteinte, signale A
- (3) Déverrouille le mutex

Thread principal : (5) Rejoint les deux threads puis continue

Les conditions POSIX

Interface d'usage

- ▶ `pthread_cond_signal(pthread_cond_t *)` Débloque un éventuel thread bloqué
- ▶ `pthread_cond_wait(pthread_cond_t *, pthread_mutex_t *)` Bloque tant que la condition n'est pas réalisée
- ▶ `pthread_cond_timedwait(pthread_cond_t*, pthread_mutex_t*, struct timespec*)` Bloque au plus tard jusqu'à la date spécifiée
- ▶ `pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *)` Réveille tous les bloqués (sont encore bloqués par mutex)

Pièges des conditions

- ▶ Risque d'interblocage ou de pas de blocage si protocole du mutex pas suivi
- ▶ Différence sémantique avec sémaphore :
 - ▶ Si `sem==0`, alors $V(sem) \Rightarrow sem := 1$
 - ▶ Signaler une condition que personne n'attend : noop (info perdue)

Résumé du sixième chapitre

- ▶ Définition de threads (vs. processus) : proc=espace d'adressage+meta-données OS ; thread=fil d'exécution
- ▶ Avantages et inconvénients : Ca va plus vite, mais c'est plus dangereux
- ▶ Schémas d'implémentations :
 - ▶ Modèle M:1 : M threads par processus (portable et rapide, pas parallèle)
 - ▶ Modèle 1:1 : Threads gérés par l'OS directement (plus dur à implémenter, plus efficace en pratique)
 - ▶ Modèle M:N : Gestion conjointe (modèle théorique meilleur, difficile à faire efficacement)
- ▶ Les fonctions principales de l'interface POSIX :
 - ▶ `pthread_create` : crée un nouveau thread
 - ▶ `pthread_exit` : termine le thread courant
 - ▶ `pthread_join` : attend la fin du thread et récupère son errcode
 - ▶ `pthread_detach` : indique que personne ne rejoindra ce thread
 - ▶ `mutex_{lock,unlock,*}` : usage des mutex
 - ▶ `sem_{wait,post,*}` : usage des sémaphore
 - ▶ `cond_{wait,signal,*}` : usage des conditions