Programmation Système et Réseau

Multithreading : Thread POSIX

Equipe pédagogique

CY Tech

Bibliographie - Sitographie

- Les liens sur internet :
  - Initiation à la programmation multitâche en C avec Pthreads : https://franckh.developpez.com/tutoriels/posix/pthreads/
  - Utiliser Thread et MUTEX (API pthread) : https://ressourcesinformatiques.com/article.php?article=823
  - Multi-threading sous LINUX : http://pficheux.free.fr/articles/lmf/threads/
  - pthreads in C – a minimal working example
  - Manuel du programmeur Linux :
    - http://manpagesfr.free.fr/man/man3/pthread_mutex_init.3.html
    - http://man7.org/linux/man-pages/man3/pthread_join.3.html
    - https://man.developpez.com/man3/pthread_create/

Introduction

Il est possible d'implémenter des algorithmes parallèles avec ce qu'on a vu jusque là (IPC), mais c'est lourd :

- **fork** – appel système lourd :
  - les processus fils et le processus père sont des processus indépendants
  - chaque processus a son espace d'adressage
  - chaque processus a sa pile d'exécution
  - changement de contexte (context switch) lent/coûteux
- communication inter-processus généralement lente
- partage de données délicat

Solutions : les processus légers : « threads »

Processus légers : *threads*

- Un processus qui crée des *threads* ne crée pas d'autres processus, tout se passe dans le même espace d'adressage
  - un thread est une « partie » d'un processus
  - un processus est l'exécution d'un ensemble (>=1) de threads
- Chaque *thread* est associée à une pile d'exécution indépendante
- Différence entre un ensemble de *threads* et un ensemble de processus :
  - les *threads* partagent pratiquement tout :
    - ✔ les variables globales, les variables statiques locales, les descripteurs de fichiers ouverts, le PID, le PPID, les utilisateurs propriétaires, les handlers de signaux, le répertoire courant, le masque de fichiers, …)
  - ne partagent pas :
    - ✔ les identifiants des threads, la pile, le masque des signaux, errno...
  - ce partage implique la gestion par le programmeur de la concurrence d'accès à ces variables (c-a-d., la synchronisation n'est plus gérée au niveau du système, mais est laissée à l'utilisateur)

Threads: avantages et inconvénients

- Avantages et inconvénients par rapport à des processus communiquants avec les « anciens » mécanismes
  - partage de la mémoire : mécanisme rapide de communication inter-thread
  - plus léger : moins de données système à recopier
  - plus rapide : le context-switch (le changement de contexte) est plus facile
- Les inconvénients sont (uniquement) des « difficultés » de programmation:
  - les threads utilisent les mêmes copies des librairies
  - il faut gérer la synchronisation (mutex, sémaphores...)
- En cas de mauvaise synchronisation :
  - comportement « aléatoire » : bugs, segfaults, exploitations…
  - interblocage...

Créer un thread

Au départ, le processus est constitué d'un unique *thread* (**thread principal**) : celui qui exécute la fonction main :

- Création d'un processus : création d'un ***thread natif***
- Exécution du **main** dans ce *thread principal*
- Si terminaison du thread principal ⇒ terminaison des autres threads du processus

Créer un thread

Un *thread (POSIX)* concurrent est créé dynamiquement dans le processus auquel le thread appelant appartient grâce à la fonction suivante :

```
#include <pthread.h>

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

- Ses arguments sont suivantes :
  - **thread** – pointeur sur le thread créé – l'adresse mémoire où sera copié l'identifiant du nouveau thread
  - **attr** – les attributs du nouveau thread créé (ressources système, priorité, …)
    - ✔ Si attr est égal NULL, les attributs par défaut sont utilisé : le thread créé est joignable (non détaché) et utilise la politique d'ordonnancement normale (pas temps-réel)
  - **start_routine** – la fonction exécuté par le thread (la fonction d'entrée du thread)
  - **arg** – le première argument passé à la fonction **start_routine**

- Un **pthread** n'a pas de PID propre (ils partagent tous le même PID, celui du processus contenant les threads)
- L'identifiant d'un **pthread** est un objet du **pthread_t** : la norme ne dit pas ce qu'il y a dans **pthread_t** (*objet opaque*).

Créer un thread

Un *thread (POSIX)* concurrent est créé dynamiquement dans le processus auquel le thread appelant appartient grâce à la fonction suivante :

```
#include <pthread.h>

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

- En cas de réussite, pthread_create() renvoie 0 ; en cas d'erreur, elle renvoie un numéro d'erreur, et le contenu de *thread est indéfini
- Erreurs :
  - **EAGAIN** - ressources insuffisantes pour créer un nouveau thread, ou une limite sur le nombre de threads imposée par le système a été atteinte. Ce dernier cas peut arriver de deux façons :
    - la limite souple RLIMIT_NPROC (changée par setrlimit(2)), qui limite le nombre de processus pour un identifiant d'utilisateur réel, a été atteinte ;
    - ou alors la limite imposée par le noyau sur le nombre total de threads, /proc/sys/kernel/threads-max, a été atteinte.
  - **EINVAL** - Paramètres invalides dans attr.
  - **EPERM** - Permissions insuffisantes pour définir la politique d'ordonnancement et les paramètres spécifiés dans attr.
  - page man (https://man.developpez.com/man3/pthread_create/)

Terminaison et retour d'un pthread

- Similairement à un processus, un thread renvoie un code retour : un pointeur
- Similairement à un fils qui devient zombi, le code retour du thread est gardée en mémoire jusqu'à ce qu'un autre thread le « rejoigne »
- Il n'y a pas de notion de *père/fils* :
  - n'importe quel thread peut joindre n'importe quel thread
  - si plusieurs attentes du même thread : comportement indéfini
- Achèvement d'un thread :
  - Quand **start_routine** termine, le thread se termine
  - Un thread peut également terminer avec **pthread_exit()**
- Terminaison d'un processus (mono ou multi-thread) :
  - Le thread qui exécute la routine **main** est spécial, sa terminaison termine le processus, même si d'autres threads sont encore en exécution
  - l'appel **exit()** dans n'importe quel thread termine le processus (i.e. tous les threads)
  - lorsqu'un signal provoquant la terminaison du processus est reçu

Primitives liées aux threads

- void **pthread_exit(**int ***status)** : termine le thread appelant avec une valeur de retour égale à **status** ; qui peut être consulté par un autre thread en utilisant **pthread_join()**
- int **pthread_kill(**pthread_t **thread,** int **sig)** : permet d'envoyer un signal à un thread (concept Unix, pas les signaux des moniteurs)
- int **pthread_join(**pthread_t **thread,** void ****retval)** : suspend le thread appelant jusqu'à terminaison du **thread** désigné (soit après avoir été annulé, soit terminé en appelant **pthread_exit()**); retval – un pointeur sur une variable (contenant un pointeur), où le code de retour sera copié
- pthread_t **pthread_self(**void**)** : retourne l'identificateur du thread
- int **pthread_detach(**pthread_t **thread)** : place un thread en cours d'exécution dans l'état détaché sauf s'il un autre thread a déjà joint ce thread :
  - Cela garantie que les ressources mémoire consommées par thread seront immédiatement libérées lorsque l'exécution de thread s'achèvera
  - Cela empêche les autres threads de se synchroniser sur la mort de thread en utilisant pthread_joint()
  - Si on ne veut pas avoir à gérer la fin d'un thread, on peut le « détacher »

Un exemple d'utilisation des threads

```
...
void *my_thread(void * arg){
  int i;
  for (i = 0 ; i < 5 ; i++) {
          printf ("Thread %s: %d\n", (char*)arg, i);
          sleep (1); //essayer de commenter cette ligne
   }
  pthread_exit (0);
}


int main (int ac, char **av){
  pthread_t th1, th2;
  void *ret;
  if (pthread_create (&th1, NULL, my_thread, "1") < 0) {
          fprintf (stderr, "pthread_create error for thread 1\n");
          exit (1);
  }
  if (pthread_create (&th2, NULL, my_thread, "2") < 0) {
          fprintf (stderr, "pthread_create error for thread 2\n");
          exit (1);
  }
  (void)pthread_join (th1, &ret);
  (void)pthread_join (th2, &ret);
}
```

La fonction **pthread_create** permet de créer le thread et de l'associer à la fonction **my_thread**. On notera que le paramètre **void *arg** est passé au thread lors de sa création. Après création des deux threads, le programme principal attend la fin des threads en utilisant la fonction **pthread_join**.

Après compilation de ce programme avec option **-lpthread**, il donne à l'exécution:

./thread_ex1
Thread 1: 0
Thread 2: 0
Thread 1: 1
Thread 2: 1
Thread 1: 2
Thread 2: 2
Thread 1: 3
Thread 2: 3
Thread 1: 4
Thread 2: 4

Commenter la fonction **sleep()**, et essayer plusieurs fois, ...

Primitives de manipulation de l'argument *attr*

- **pthread_attr_t** – objet (opaque) spécifiant les attributs d'un thread.
- int **pthread_attr_init(**pthread_attr_t ***attr)** : initialise l'objet d'attributs de thread pointé par **attr** avec des valeurs d'attributs par défaut.
  - Après cet appel, les attributs individuels de cet objet peuvent être modifiés en utilisant diverses fonctions, et l'objet peut alors être utilisé dans un ou plusieurs appels de pthread_create() pour créer des threads.
- int **pthread_attr_destroy**(pthread_attr_t ***attr**) : quand un objet d'attributs de thread n'est plus nécessaire, il devrait être détruit en appelant cette fonction.

- int **pthread_attr_setdetachstate**(pthread_attr_t ***attr**, int **detachstate**) : définit l'attribut d'état de détachement de l'objet d'attributs de thread auquel **attr** fait référence à la valeur indiquée par detachstate.
  - Cet attribut d'état de détachement détermine si un thread créé en utilisant l'objet d'attributs de thread attr sera dans un état joignable ou détaché. Les valeurs suivantes peuvent être spécifiées dans detachstate :
  - **PTHREAD_CREATE_DETACHED** : Les threads créés avec attr seront dans un état détaché.
  - **PTHREAD_CREATE_JOINABLE** : Les threads créés avec attr seront dans un état joignable.
- int **pthread_attr_getdetachstate**(pthread_attr_t ***attr**, int ***detachstate**) : envoie, dans le tampon pointé par detachstate, l'attribut contenant l'état de détachement de l'objet d'attributs de thread attr. [man : https://man.developpez.com/man3/pthread_create/]

Un exemple de manipulation de l'argument *attr*

```
...
pthread_attr_t attr;
pthread_attr_init(&attr); //initialisation par défaut
pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_DETACHED);
pthread_create(&tid, &attr, start_func, arg);
...
```

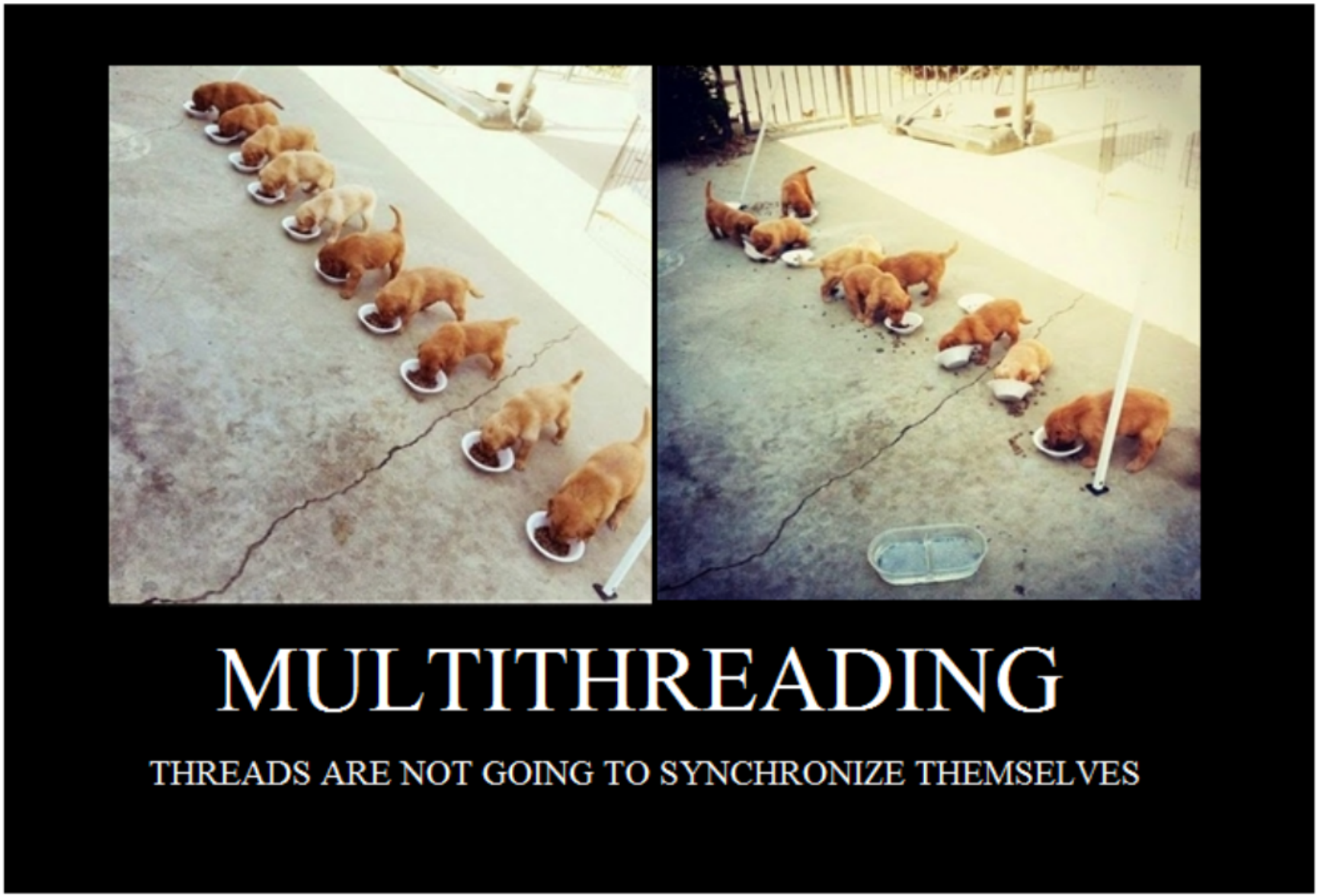
Accès concurrent

Les threads partagent les données des processus.

- Le partage de mémoire est généralement voulu et avantageux :
  - cela évite de gaspiller de la mémoire

- L'important est de bien savoir gérer l'accès concurrent à la mémoire.
- Trois mécanismes de synchronisation :
  - mutex : exclusion mutuelle (verrous)
  - sémaphores : introduit lors de la 5-ème révision du standard
  - les « signaux »

Accès concurrent



Accès concurrent

Comment synchroniser un système multi-tâches ?

Comment gérer l'accès à la mémoire partagée ?

Accès concurrent

Thread A

- A1 - print(" toto ")

Thread B

- B1 - print(" 42 ")

Qu'affiche le programme ?

Accès concurrent

Thread A

- A1 - print(" toto ")

Thread B

- B1 - print(" 42 ")

Qu'affiche le programme ?

toto 42 ?

42 toto ?

To4to 2 ?

Accès concurrent

Thread A

- A1 - print(" toto ")

Thread B

- B1 - print(" 42 ")

Qu'affiche le programme ?

toto 42 ?

42 toto ?

To4to 2 ?

Sérialisation : A doit s'exécuter avant B !!

Accès concurrent

Thread A

- A1 - x += 1

Thread B

- B1 - x += 1

Sachant que initialement x = 0, quelle est sa valeur à la fin de l'exécution ?

Accès concurrent

Thread A

- A1 - x += 1

Thread B

- B1 - x += 1

Sachant que initialement x = 0, quelle est sa valeur à la fin de l'exécution ?

2 ?

1 ?

Exclusion mutuelle : l'évènement A et B ne doivent pas s'exécuter en même temps (section critique).

Accès concurrent

Deux tâches ne peuvent pas être en même temps dans une section critique (exclusion mutuelle).

Aucune hypothèse ne doit être faite sur les vitesses relatives des tâches et sur le nombre des processeurs.

Aucune tâche suspendue ne doit bloquer les autres tâches (deadlock).

Aucune tâche ne doit attendre trop longtemps (famine).

MUTEX : création/initialisation

Un mutex est un objet d'exclusion mutuelle (**MUT**ual **EX**clusion), et est très pratique pour protéger des données partagées de modifications concurrentes et pour implémenter des sections critiques.

- Un mutex peut être dans deux états :
  - déverrouillé (pris par aucun thread) ou
  - verrouillé (appartenant à un thread).
- Un mutex ne peut être pris que par un seul thread à la fois. Un thread qui tente de verrouiller un mutex déjà verrouillé est suspendu jusqu'à ce que le mutex soit déverrouillé.
- int **pthread_mutex_init**(pthread_mutex_t ***mutex**, const pthread_mutexattr_t ***mutexattr**) - allocation mémoire et initialisation dynamique. Cette primitive initialise le mutex pointé par **mutex** selon les attributs de mutex spécifié par **mutexattr**.
  - Si **mutexattr** vaut **NULL**, les paramètres par défaut sont utilisés.
  - Les variables de type **pthread_mutex_t** peuvent aussi être initialisées de manière statique, en utilisant les constantes **PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER** (pour les mutex « rapides »), **PTHREAD_RECURSIVE_MUTEX_INITIALIZER_NP** (pour les mutex « récursifs »), et **PTHREAD_ERRORCHECK_MUTEX_INITIALIZER_NP** (pour les mutex à « vérification d'erreur »)
- int **pthread_mutexattr_init**(pthread_mutexattr_t ***attr**) : initialise l'objet attributs de mutex **attr** et le remplit avec les valeurs par défaut
- int **pthread_mutex_destroy**(pthread_mutex_t ***mutex**) : détruit un mutex, libérant les ressources qu'il détient. Le mutex doit être déverrouillé.

Verrouillage/Déverrouillage d'un mutex

- Verrouillage :

  int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mutex) : verrouille le mutex.

  - Si le **mutex** est déverrouillé, il devient verrouillé et est possédé par le thread appelant et **pthread_mutex_lock()** rend la main immédiatement.
  - Si le **mutex** est déjà verrouillé par un autre thread, **pthread_mutex_lock()** suspend le thread appelant jusqu'à ce que le mutex soit déverrouillé.

- Déverrouillage :

  int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mutex) : déverrouille le mutex.

- Remarque : Seul le thread qui a effectué l'opération de verrouillage, peut effectuer l'opération de déverrouillage.

Portée du mutex

- Portée locale :

  portée limitée au processus (défaut)

- Portée globale :

  permet de synchroniser des threads appartenant à plusieurs processus. Requiert que le mutex soit alloué dans une zone de mémoire partagée.

Un exemple d'utilisation mutex

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <pthread.h>

static pthread_mutex_t my_mutex;
static int tab[5];

int main (int argc, char **argv){
  pthread_t th1, th2;
  void *ret;
  pthread_mutex_init(&my_mutex, NULL);//initialise le mutex par défaut
  if (pthread_create(&th1, NULL, write_tab_process, NULL) < 0) {
          fprintf (stderr, "pthread_create error for thread 1\n");
          exit (1);
  }
  if (pthread_create(&th2, NULL, read_tab_process, NULL) < 0) {
          fprintf (stderr, "pthread_create error for thread 2\n");
          exit (1);
  }
  (void)pthread_join (th1, &ret);
  (void)pthread_join (th2, &ret);
}
...
```

Un exemple d'utilisation mutex (suite)

```
...
void *read_tab_process(void *arg)
{
  int i;
  pthread_mutex_lock(&my_mutex);
  for (i=0; i!=5; i++)
          printf("read_process, tab[%d] vaut  %d\n", i, tab[i]);
  pthread_mutex_unlock(&my_mutex);
  pthread_exit (0);
}

void *write_tab_process(void *arg)
{
  int i;
  pthread_mutex_lock(&my_mutex);
  for (i=0; i!=5; i++){
          tab[i] = 2*i;
          printf("write_process, tab[%d] vaut  %d\n", i, tab[i]);
          sleep(1);//ralentit le thread d'écriture
   }
  pthread_mutex_unlock(&my_mutex);
  pthread_exit (0);
}
```

```
gcc -o thread2 thread2.c -lpthread
./thread2

write_process, tab[0] vaut 0
write_process, tab[1] vaut 2
write_process, tab[2] vaut 4
write_process, tab[3] vaut 6
write_process, tab[4] vaut 8

read_process, tab[0] vaut 0
read_process, tab[1] vaut 2
read_process, tab[2] vaut 4
read_process, tab[3] vaut 6
read_process, tab[4] vaut 8
```

Les sémaphores

- valeur (généralement un entier)
  - incremente() ~ signal() ~ V()
  - decremente() ~ wait() ~ P()

- Inventé par Dijkstra.
- Les opérations V et P sont atomiques.
- Quand la valeur du sémaphore est inférieure ou égale à 0, le thread est bloqué.
- Les threads bloqués attendent dans une file (attente passive).

Les sémaphores

- Cas particulier du sémaphore de taille 1 : Sémaphore binaire
- Assimilable à un Verrou (mutex).

- Attention :
- Avec un mutex, seul le thread qui prend le verrou peut le relâcher.
- Le mutex implémente des sécurités en cas de suppression du thread.

Les sémaphores

- En langage C :
  - <sys/sem.h> : (System V) géré au niveau du kernel, mais très lent
  - <semaphore.h> : (POSIX) possède moins de fonctionnalités, mais est plus rapide et plus utilisé.

Les sémaphores

int sem_init (sem_t *sem , int pshared , unsignedint value) ;

- sem : adresse du sémaphore
- pshared : 0 non partagé sinon partagé avec les threads des autres processus
- value : valeur initiale

Les sémaphores

```
#include <semaphore.h>
sem_t mutex ;
if (sem_init(&mutex , 0 , 1 ) != 0 ) {
// E r r o r : i n i t i a l i z a t i o n f a i l e d
}
sem_wait(&mutex ) ;
....
sem_post(&mutex ) ;
```

Voir : https://sites.uclouvain.be/SyllabusC/notes/Theorie/Threads/coordination.html