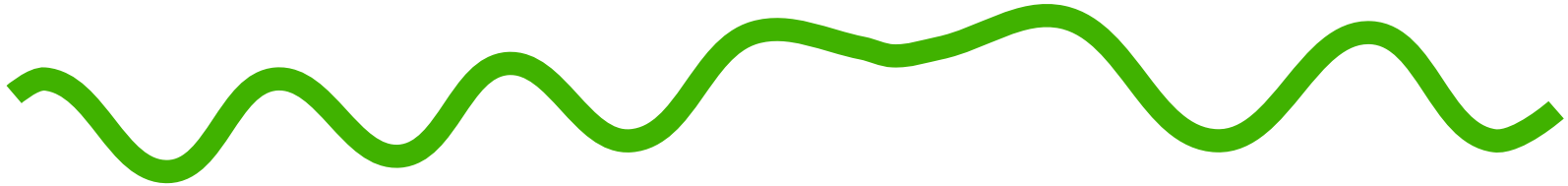


Programmation des systèmes

Threads ou processus légers

Philippe MARQUET

Philippe.Marquet@lifl.fr

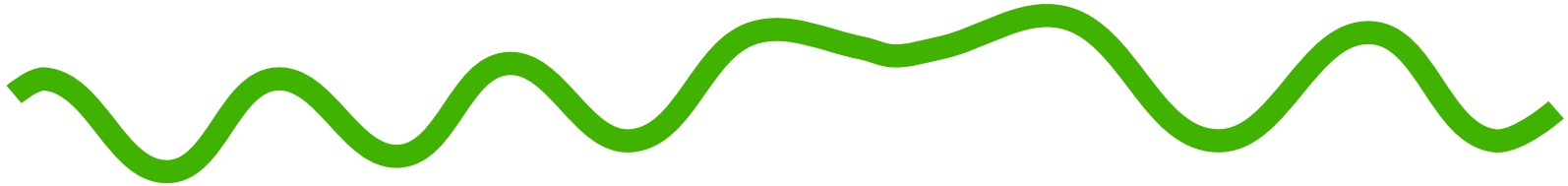
Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille

Université des sciences et technologies de Lille

Licence d'informatique de Lille

avril 2005

révision de février 2012

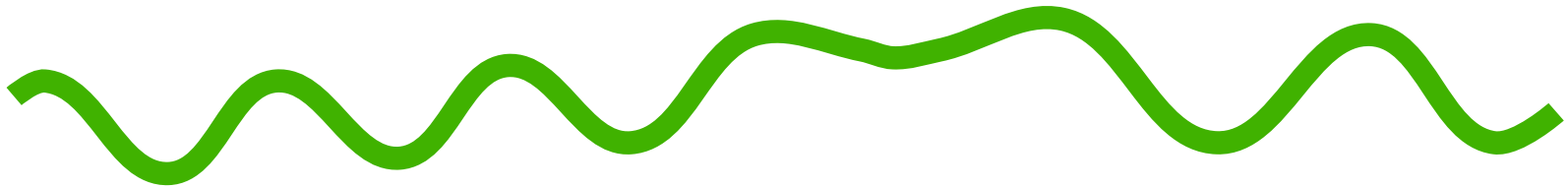


- Ce cours est diffusé selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation Commerciale – Partage dans les Mêmes Conditions, 3.0 France
  `creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/fr/`
- La dernière version de ce cours est accessible à
  `www.lifl.fr/~marquet/cnl/pds/`
- `$Id: th.tex,v 1.17 2012/11/27 23:17:54 marquet Exp $`

Références & remerciements

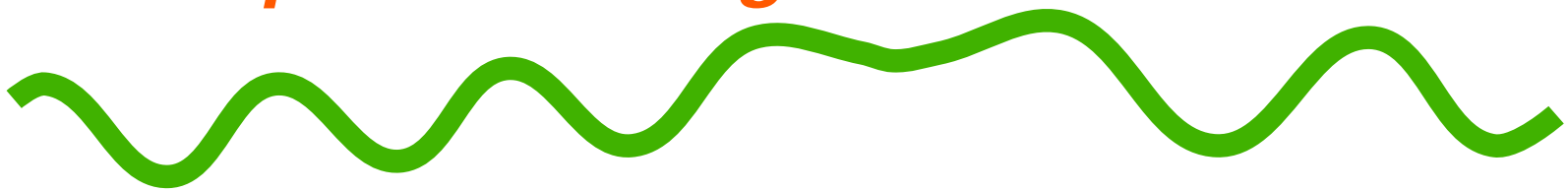
- *Unix, programmation et communication*
  Jean-Marie Rifflet et Jean-Baptiste Yunès
  Dunod, 2003
- *Programming with threads*
  Steve Kleiman, Devang Shah, Bart Smaalders
  SunSoft Press, Prentice Hall, 1996
  `http://www.sun.com/smi/ssoftpress/threads/`
- *Multithreaded Programming — Concepts and Practice*
  Bil Lewis
  1999, `http://www.lambdaCS.com/`
- *The Single Unix Specification*
  The Open Group
  `www.unix.org/single_unix_specification/`

Table des matières



Processus légers

Les processus légers

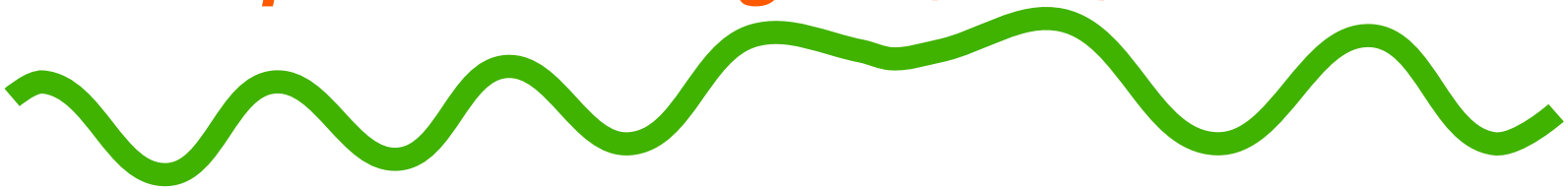


- *Threads* ou *processus légers*
- Initialement dans les systèmes d'exploitation
  - recouvrement des opérations d'I/O (serveurs multithreadés)
  - exploitation des architectures multiprocesseurs
- Thread =

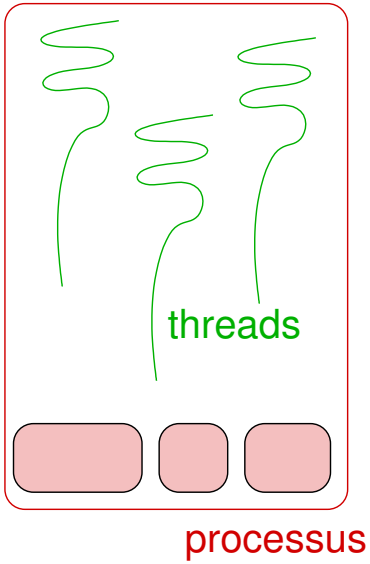
  séquence d'exécution du code d'un programme, au sein d'un processus
- Processus habituel : un seul thread
- Processus multithreadé : plusieurs flots d'exécution simultanés
- Les différents threads partagent les ressources systèmes
- Principe

  détacher les flots d'exécution des ressources systèmes

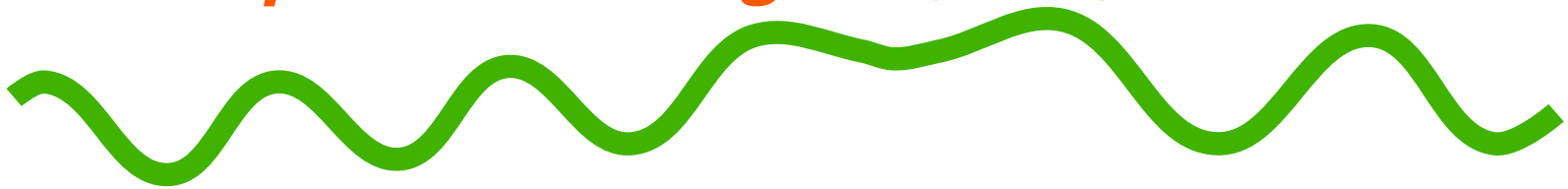
Les processus légers (cont'd)



- Un processus léger ne peut exister qu'au sein d'un processus lourd
- Les ressources d'un processus lourd sont partagées par tous les processus légers qu'il contient :
  - code
  - mémoire
  - fichiers
  - droits Unix
  - environnement de shell
  - répertoire de travail
- Un processus léger possède
  - sa propre pile d'exécution
  - identificateur de thread
  - pointeur d'instruction
- Un processus (Unix) peut contenir plusieurs centaines de threads

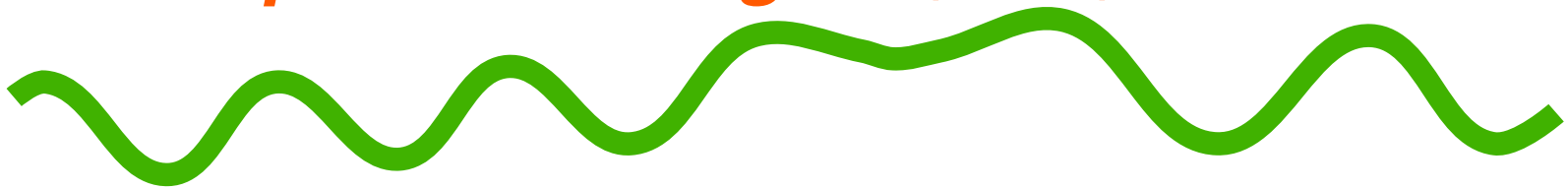


Les processus légers (cont'd)

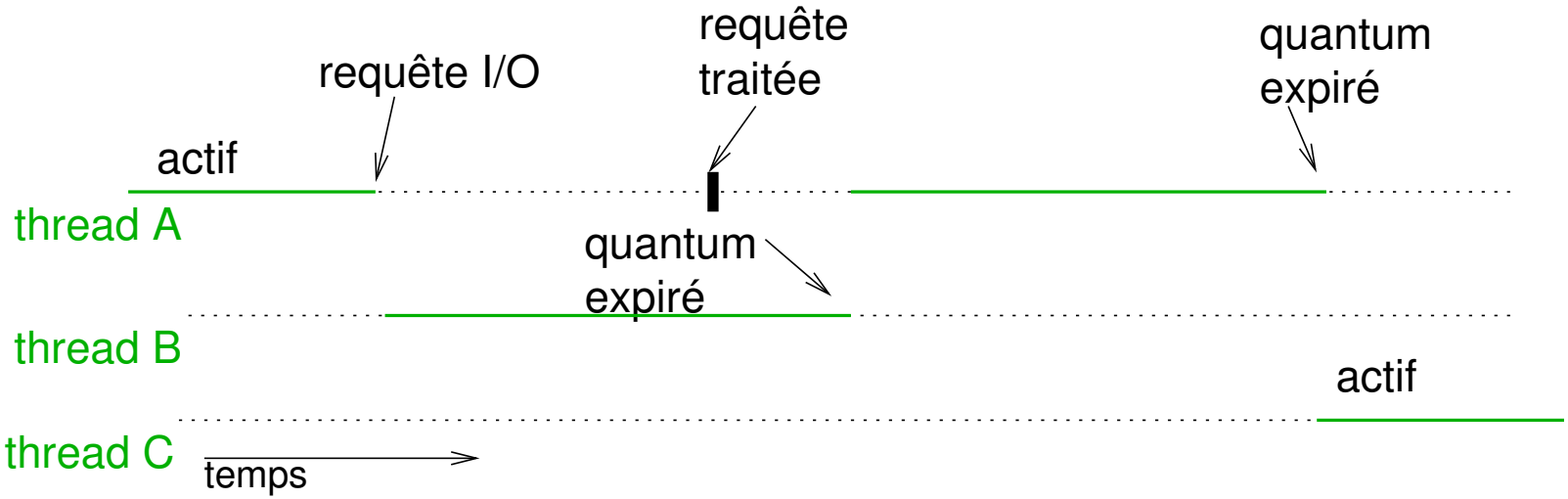


- Opérations relatives aux processus légers performantes
  - création
  - changement de contexte
  - synchronisation
  - ...
- Création d'un processus léger
  - un processus léger exécute du code
    $\rightarrow$ adresse d'une fonction (+ paramètres)
  - un processus léger possède une pile d'exécution
    $\rightarrow$ taille de la pile (valeur par défaut)
  - les processus légers se partagent le temps processeur alloué au processus
    $\rightarrow$ priorité, ordonnancement (valeurs par défaut)

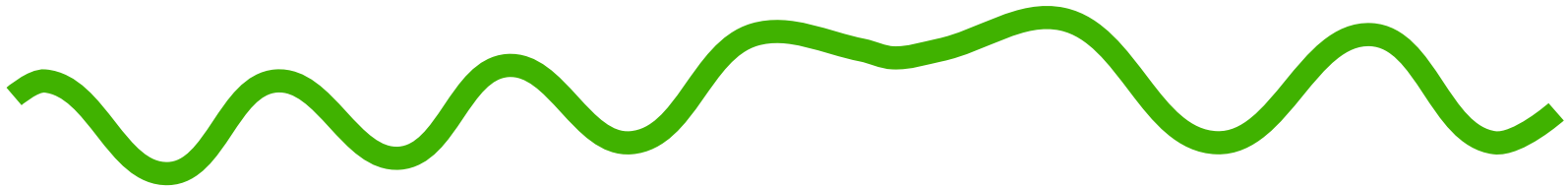
Les processus légers *(cont'd)*



- Exécution des processus légers au sein du processus
  - $\rightarrow$ ordonnancement au sein du processus
- Typiquement, un autre thread prend la main quand :
  - le thread courant se bloque (I/O), ou
  - le thread courant a épuisé le quantum de temps qui lui été alloué

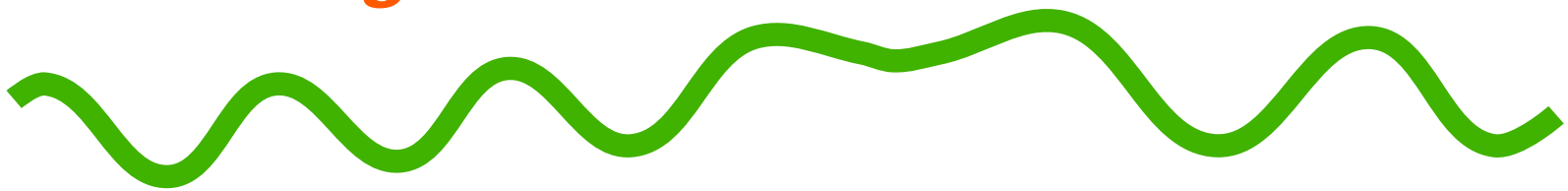


- Multiprocesseurs : possibilité de plusieurs threads actifs



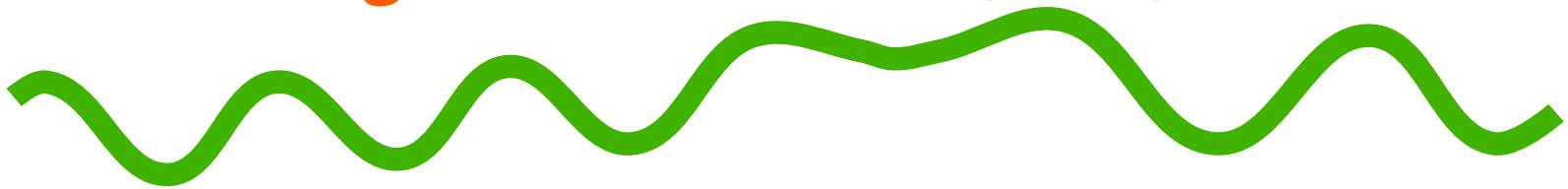
Critique des processus légers

Avantages des threads

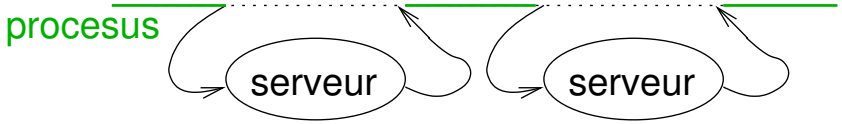


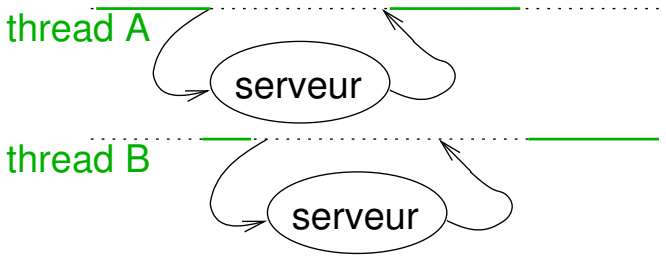
- Deux aspects :
  - systèmes d'exploitation
  - applications concurrentes
- Quelques exemples
  - débit
  - multiprocesseurs
  - réactivité (interface utilisateur)
  - réactivité d'un serveur
  - robustesse/fiabilité d'un serveur
  - structure d'un programme

Avantages des threads (cont'd)



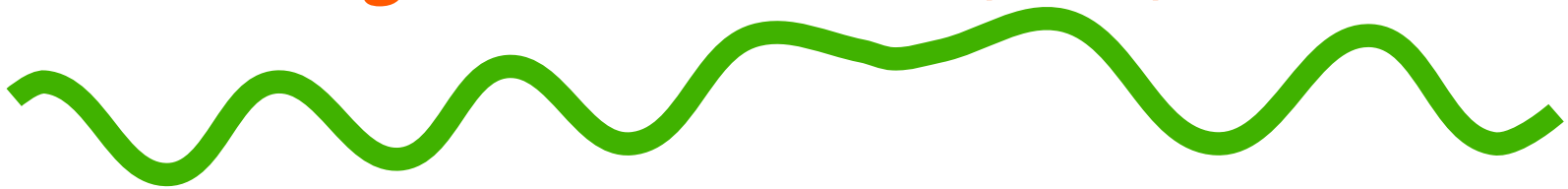
- Débit
  - un seul thread
    - attente à chaque requête au système
  - plusieurs threads
    - possible superposition d'exécution et d'attente de retour de requête
    - le thread qui a fait la requête attend
    - un autre thread peut poursuivre son exécution
  - exemple : un programme fait plusieurs requêtes





  - attentes parallèles

Avantages des threads (cont'd)

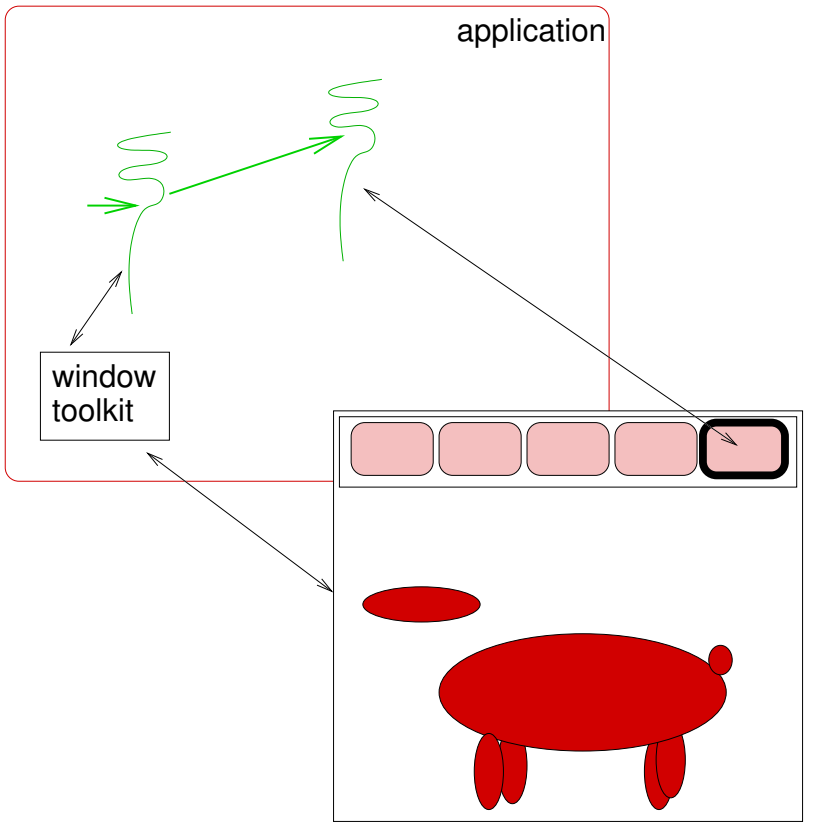


- Multiprocesseurs
  - machine multiprocesseurs
  - plusieurs threads au sein d'une application
    - utilisation effective du parallélisme
  - pas aussi simple !

Avantages des threads (cont'd)

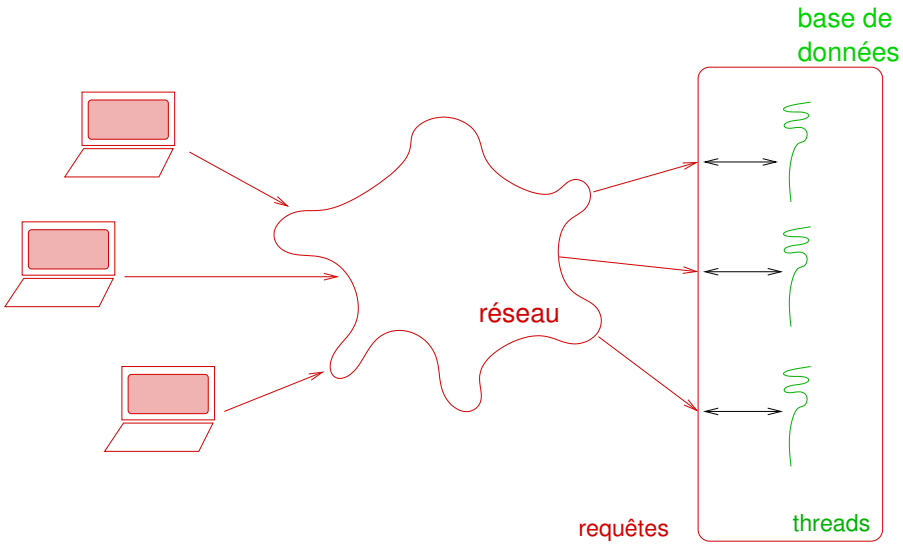
Réactivité d'interfaces utilisateurs

- une application avec une interface graphique
- « *wait cursor* » pour le traitement (lourd) de certaines opérations
- application multithreadée
  - un thread pour cette opération
  - le thread qui gère l'interface utilisateur reste actif
- exemple : « *autosaving* »
- priorité



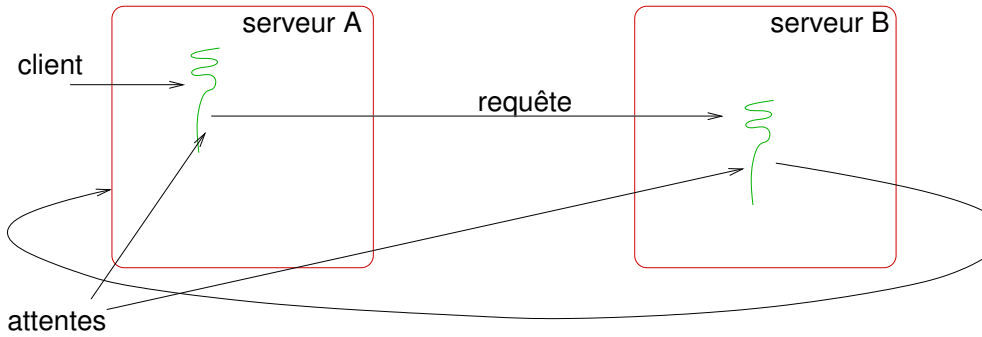
Avantages des threads (cont'd)

- Réactivité d'un serveur
  - un serveur dans une application client/serveur
  - possibilité de plusieurs requêtes simultanées depuis différents clients
  - un unique thread dans le serveur
    - une requête bloque le serveur
    - si une autre requête plus prioritaire ?
  - serveur multithreadé
    - une requête = un thread
    - priorités de requêtes : ordonnancement des threads

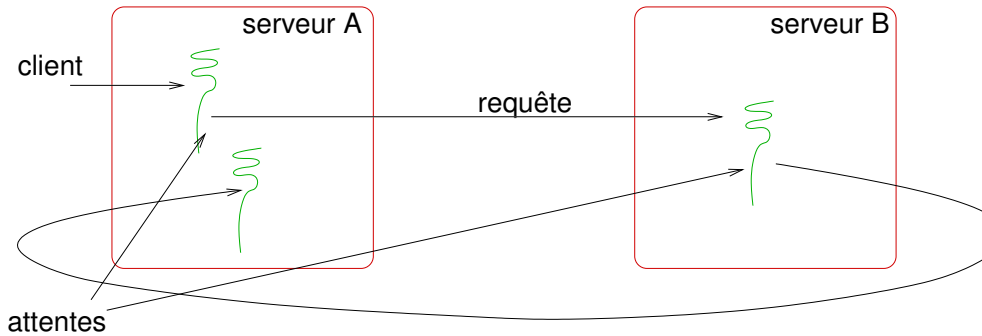


Avantages des threads (cont'd)

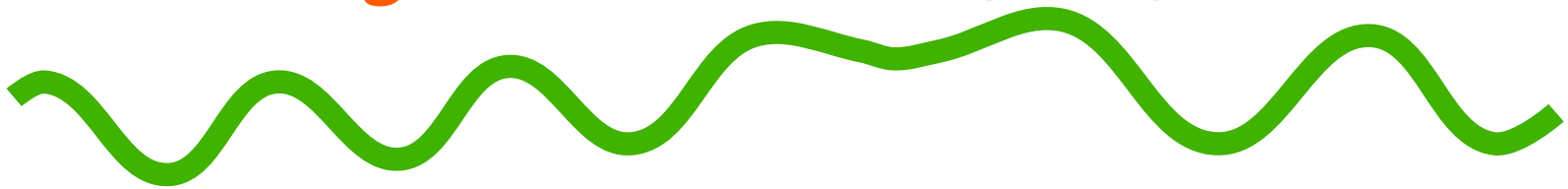
- Serveur sans dead-lock
  - application client/serveur
  - serveur est aussi client
    - d'autres serveurs
    - de lui-même
  - exemple : serveur « base de données »
    - qui utilise un serveur de noms
    - qui utilise le serveur de BD !



- solution : serveur multithreadé



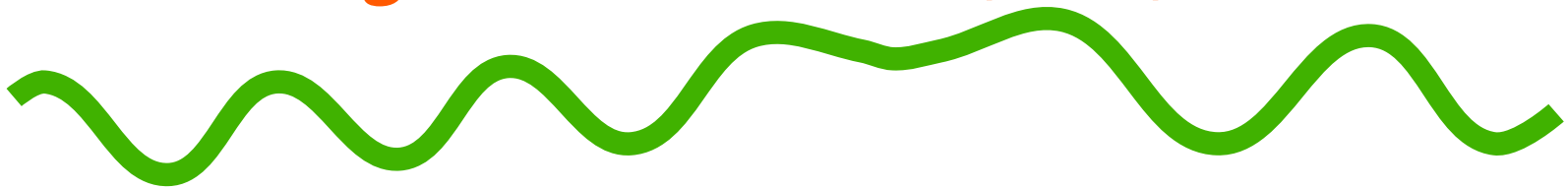
Avantages des threads (cont'd)



- Structure de programmes
  - exemple : une feuille de calcul
    - nouveau calcul des cellules à chaque modification
    - continue de gérer l'interface utilisateur
  - code mono-thread

```
for (;;) {
    while (nouvelle_maj_necessaire()
           && ! entree_utilisateur_disponible()) {
        recalculer_une_formule();
    }
    cmd = get_entree_utilisateur();
    traiter_entree_utilisateur(cmd);
}
```

Avantages des threads (cont'd)



- Structure de programmes
  - exemple : une feuille de calcul
    - nouveau calcul des cellules à chaque modification
    - continue de gérer l'interface utilisateur
  - code multithreadé : 2 threads indépendants = 2 codes indépendants
    - premier thread

```
for (;;) {
    cmd = get_entree_utilisateur()
    traiter_entree_utilisateur(cmd);
}
```

    - second thread

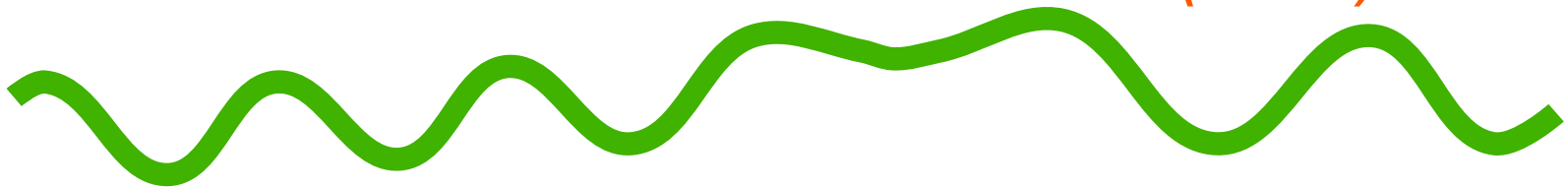
```
for (;;) {
    attendre_un_changement()
    for (toutes_les_formules)
        recalculer_une_formule();
}
```

  - expression plus naturelle !

Inconvénients des threads ?

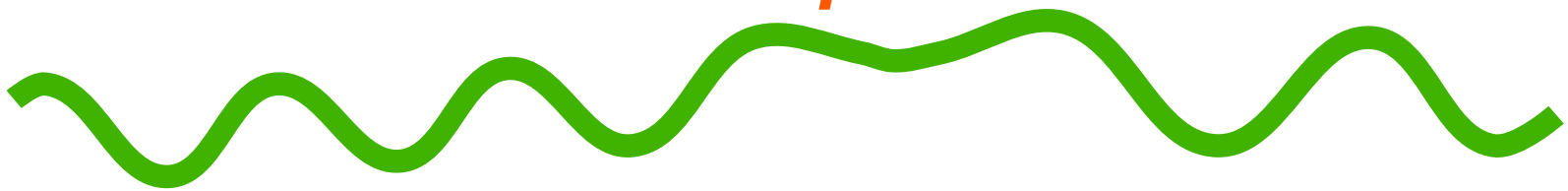
- Cas limites
- Contrôle de la concurrence
- Contraintes techniques
- Savoir faire

Inconvénients des threads ? (cont'd)



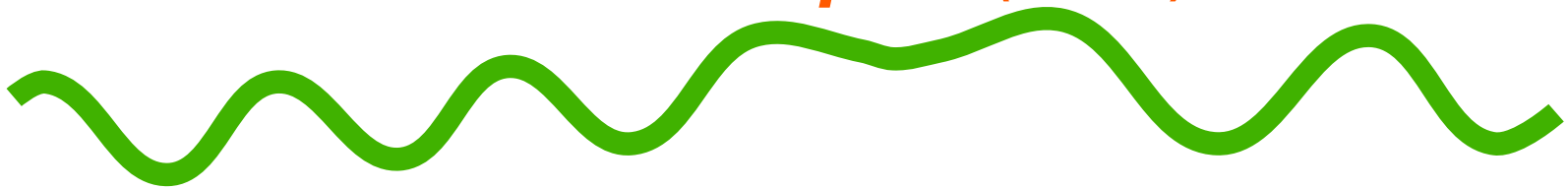
- Cas limites
  - application = un flot unique de calcul à accélérer sur un mono-processeur
  - chaque séquence qui pourrait s'exécuter en parallèle $\rightarrow$ un thread
- Contrôle de la concurrence
  - toute action ne peut être faite concurremment
  - voir le cours précédent !
  - il faut contrôler la concurrence : mécanismes ad hoc

Contraintes techniques

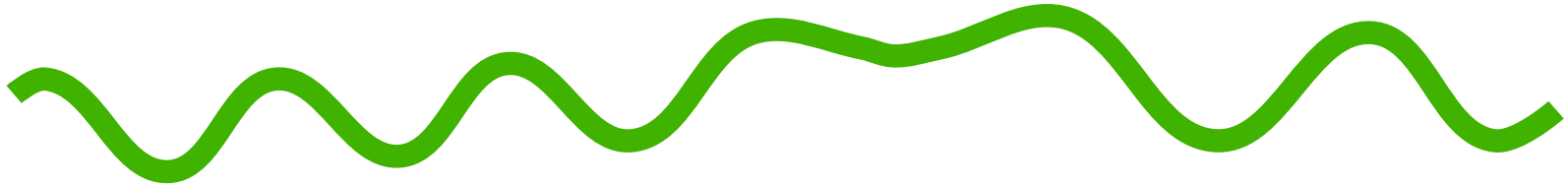


- Dimensionnement des piles d'exécution
  - processus légers : propre pile d'exécution
    - variables locales
    - pile d'exécution des fonctions appelées
  - appels récursifs profonds...
  - allouer systématiquement une « très grande pile »
    - coût mémoire
    - « très grande pile » ?
      - nombre d'appels récursifs ?
      - architecture cible
      - compilateur utilisé
  - stratégie essai/erreur
    - erreur ?
  - agrandir la pile d'exécution ?

Contraintes techniques (cont'd)

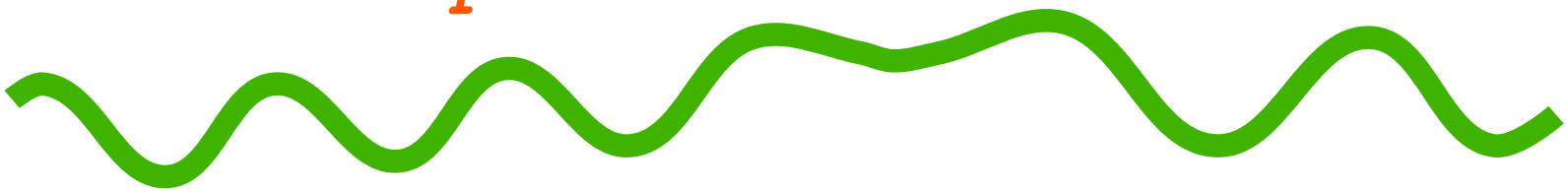


- Réentrance du code
  - threads d'un même processus
    - partage efficace de la mémoire
    - avantage utilisateur
  - problème pour les variables globales gérées par les bibliothèques (exemple : `malloc()`)
    - idée : contrôler la concurrence de l'accès à ces variables
    - quid ? si code source des bibliothèques non disponible ?
    - idée : contrôler la concurrence de l'accès à la bibliothèque
    - quid ? si appel à la bibliothèque depuis une autre bibliothèque ?



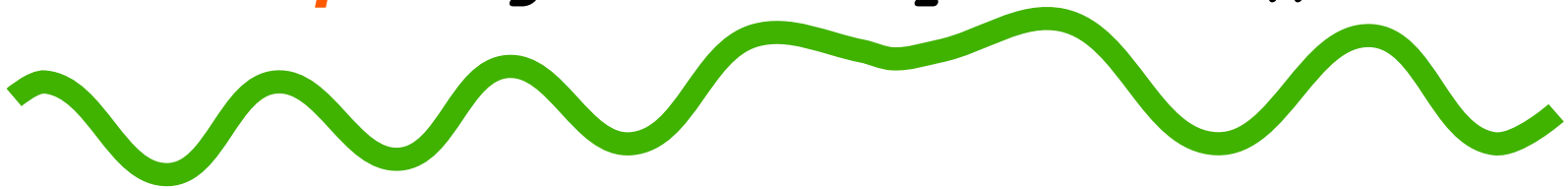
Interface `pthread`

Interface `pthread`



- `pthread` : threads POSIX
  - POSIX : IEEE Portable Operating System Interface, X as in UniX
  - Unix threads interface P1003.1c
  - implantions diverses (et différentes) fournissant cette même API
  - `#include <pthread.h>`
- Illustration de l'API sur un exemple :
  - applications affichant
  - des images compressées lues
  - depuis un ensemble de fichiers
- Idée :
  - décompresser l'image suivante
  - pendant visualisation de la courante

Exemple : `get_next_picture()`



- Fonction `get_next_picture()`
  - ouvre le fichier
  - alloue un buffer
  - décompresse l'image du fichier dans le buffer

```
void *
get_next_picture (void *arg)
{
    int fd;
    pic_buf_t *buf;
    fd = open((char*) arg, O_RDONLY);
    buf = malloc(...);
    while (nbytes = read(fd,...)) {
        /* decompress data into buf */
    }
    close(fd);
    return buf;
}
```

Exemple : `main()`

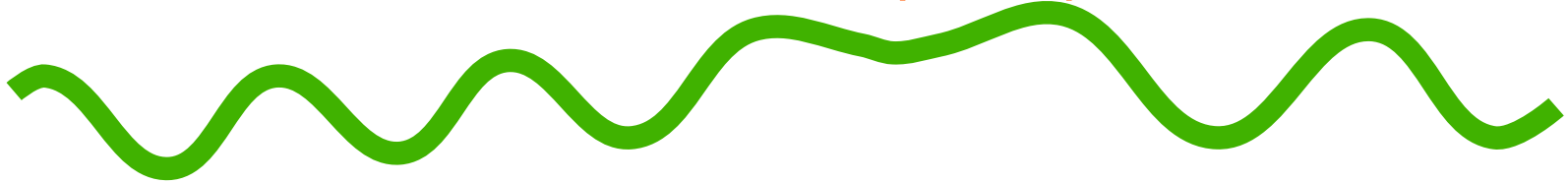
- Programme principal
  - appel de `get_next_picture()` pour lire la première image
  - affiche l'image et lance la lecture suivante
  - attend continuation de l'utilisateur

```
int main(int argc, char *argv[])
{
    pthread_t pic_thread;
    int fileno;
    pic_buf_t *buf;

    for (fileno=1 ; fileno<argc ; fileno++) {
        if (fileno==1) {            /* premiere lecture, sans thread */
            buf = get_next_picture((void*)argv[fileno]);
        } else {                /* attend la fin de la decompression */
            pthread_join(pic_thread), (void**)&buf);
        }
        if (fileno<argc-1)  /* lance un thread pour l'image suivante */
            pthread_create(&pic_thread, NULL, get_next_picture,
                           (void*) argv[fileno+1]);
        display_buf(buf);                          /* affiche l'image */
        free(buf);                                /* libere le buffer */
        if (getchar() == EOF)     /* attend un caractere utilisateur */
            break;
    }
}
```

Création d'un thread

- Créer un nouveau thread
  - `int pthread_create(`
    `pthread_t *threadid,`
    `const pthread_attr_t *attr,`
    `void *(*threadfunction)(void*),`
    `void *arg);`
  - qui exécute la fonction `threadfunction()` à un argument `arg`
  - (attributs du thread `attr`, défaut : `NULL`)
  - retourne un identifiant de thread `threadid`
  - retourne une valeur nulle ou erreur (`errno.h`)
    - évite les problèmes d'accès concurrents à `errno` !
- Limitations
  - au plus `PTHREAD_THREADS_MAX` (`limit.h`) threads
  - argument unique `void*` de la fonction
    - argument de taille inférieur à un pointeur $\Rightarrow$ coercition de type
    - plusieurs arguments $\Rightarrow$ structure...

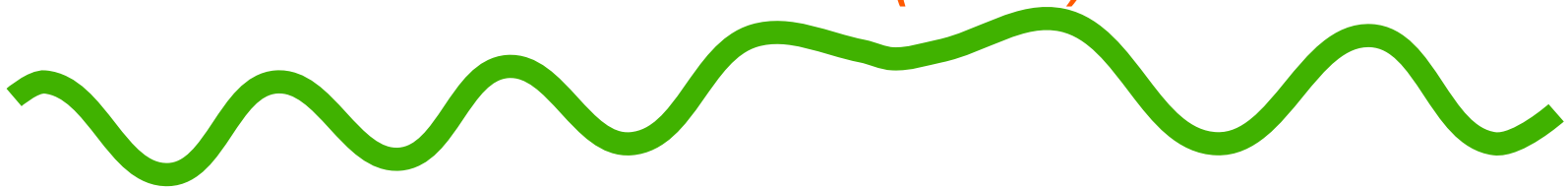
Création d'un thread *(cont'd)*



Bug !!

```
struct two_args_s {
    int arg1;
    int arg2;
};
void *needs_two_args(void *ap)
{
    struct two_args_s *argp = (struct two_args_s *)ap;
    int a1, a2;

    a1 = argp->arg1;
    a2 = argp->arg2;
    ...
}

pthread_t a(void)
{
    pthread_t t;
    struct two_args_s args;
    int error;

    args.arg1 = ...
    args.arg2 = ...
    error = pthread_create(&t, NULL,
                           needs_two_args, (void*)&args);
    if (error)
        /* traitement de l'erreur */
    return t;
}
```

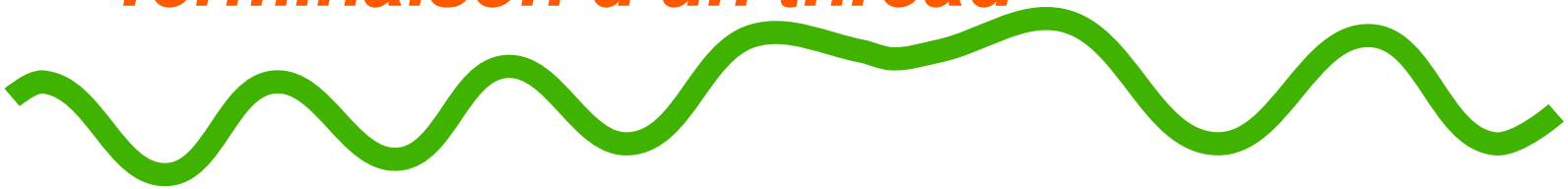
Création d'un thread *(cont'd)*



```
pthread_t a()
{
    pthread_t t;
    struct two_args_s *ap = malloc(sizeof(struct two_args_s));
    int error;

    ap->arg1 = ...
    ap->arg2 = ...
    error = pthread_create(&t, NULL,
                           needs_two_args, (void*)ap);
    if (error)
        /* traitement de l'erreur */
    return t;
}
```

- Libération de la mémoire dans `needs_two_args()`

Terminaison d'un thread



- Au retour de la fonction, le thread se termine normalement
  - valeur retournée par la fonction
    `void *(*threadfunction)(void*)`
- Se faire terminer un thread
  - par forcément dans la fonction « principale » du thread
  - `int pthread_exit(`
    `void *value_ptr);`
  - la valeur `value_ptr` est associée à l'identifiant du thread
  - consultable par un autre thread

Attente de la terminaison d'un thread

- Tel thread a-t-il terminé ?
  - `int pthread_join(`
    `pthread_t thread,`
    `void **value_ptr);`
  - récupère la valeur de terminaison du thread
  - si le thread a déjà terminé
  - sinon bloquant jusqu'à sa terminaison
- Une fois joint un thread n'a plus d'existence
  - tant que non joint est comptabilisé dans les `PTHREAD_THREADS_MAX`
- Attention à l'allocation de la valeur retournée
  - pas dans la pile du thread qui a terminé...

Identification d'un thread

- Qui suis-je ?
  - à la création d'un thread, thread id $\rightarrow$ père
  - mon propre identifiant ?

```
pthread_t pthread_self();
```

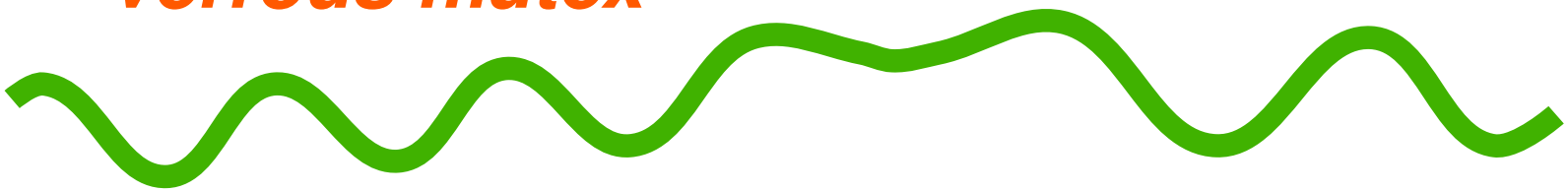
- Égalité
  - le type `pthread_t` : identificateur de thread

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

  - comparaison

```
int pthread_equal(
        pthread_t t1,
        pthread_t t2);
```

Verrous mutex



- Accès en exclusion mutuelle à une section critique
  - protection de la section critique par un mutex
  - utilisation

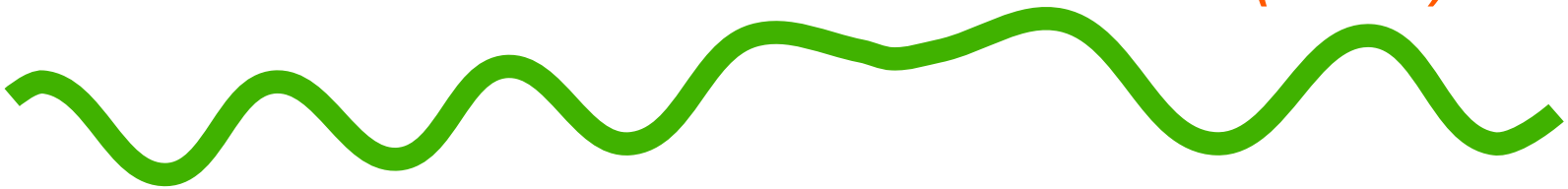
```
lock(mutex)
... /* section critique */
unlock(mutex)
```

- Interface `pthread`
  - `#include <pthread.h>`
    `pthread_mutex_t`
  - `pthread_mutex_init()`
    `pthread_mutex_destroy()`
  - `pthread_mutex_lock()`
    `pthread_mutex_unlock()`
    `pthread_mutex_trylock()`

Création/destruction de mutex

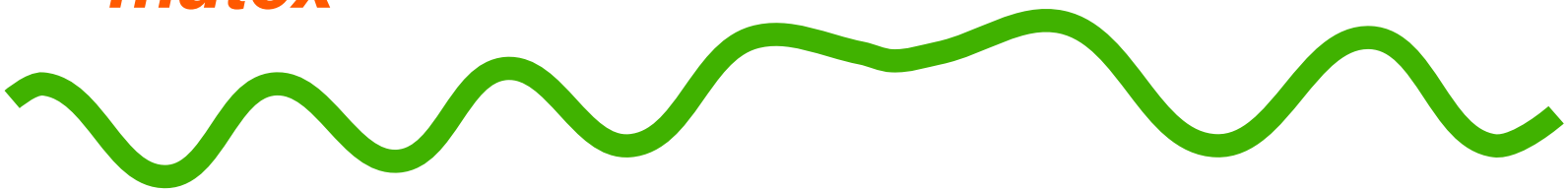
- Allocation
  - `pthread_mutex_t lock;`
  - ou
  - `pthread_mutex_t *mp;`
    `mp = malloc(sizeof(pthread_mutex_t));`
- Initialisation obligatoire
  - `pthread_mutex_t lock = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;`
  - ou
  - `int pthread_mutex_init(`
    `pthread_mutex_t *mp,`
    `const pthread_mutexattr_t *attr);`
  - valeur par défaut des attributs → `NULL`
- Destruction
  - `int pthread_mutex_destroy(`
    `pthread_mutex_t *mp);`

Création/destruction de mutex *(cont'd)*



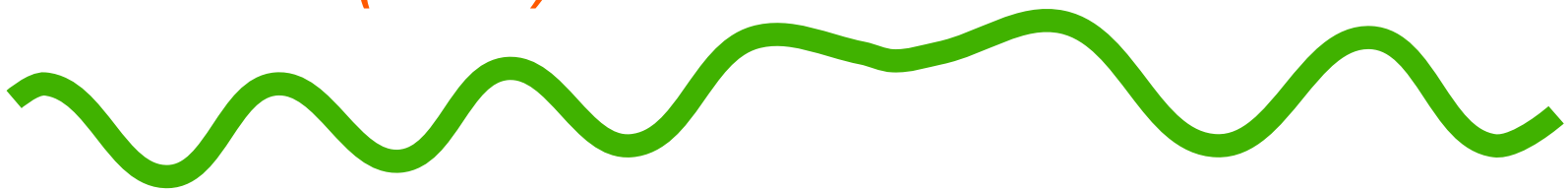
```
struct data_record_s {
    pthread_mutex_t data_lock;
    char data[128];
};

/* Create and initialize a new data record */
struct data_record_s *
new_record()
{
    struct_data_record_s *recp;

    recp = malloc(sizeof(struct data_record_s));
    pthread_mutex_init(&recp->data_lock, NULL);
    return(recp);
}

/* Delete a data record. The caller must ensure thart no threads are
   waiting to acquire this record's data_lock */
void
delete_record (struct data_record_s *recp)
{
    pthread_mutex_destroy(&recp->data_lock);
    free(recp);
}
```

Verrouillage/déverrouillage d'un mutex



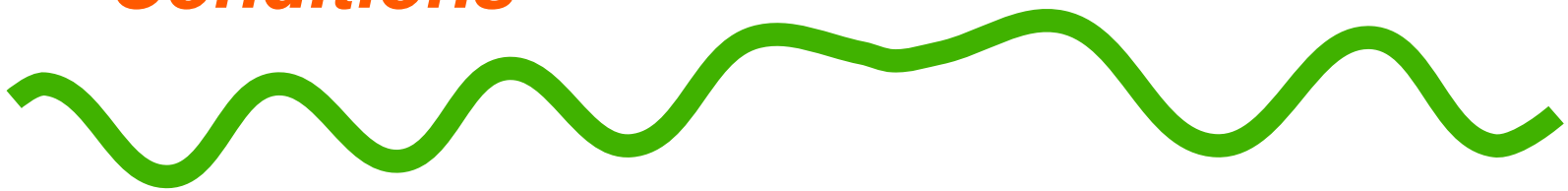
- Propriétaire du mutex
  - le thread qui réalise le verrouillage
- Verrouillage
  - `int pthread_mutex_lock(pthread_mutex_t *mp);`
  - bloquant
- Déverrouillage
  - `int pthread_mutex_unlock(pthread_mutex_t *mp);`
  - par le propriétaire uniquement
  - doit avoir été verrouillé
- Tentative de verrouillage
  - `int pthread_mutex_trylock(pthread_mutex_t *mp);`
  - succès si le mutex est libre (retourne 0), devient propriétaire
  - retour de `EBUSY` sinon

Verrouillage/déverrouillage d'un mutex (cont'd)



- Exemple : synchronisation des accès à un fichier
  - ne pas mélanger les chaînes affichées
  - ```
    void
    write_strings(char *strings[], int nstring)
    {
        int i;
        pthread_mutex_t file_lock=PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

        pthread_mutex_lock(&file_lock);
        for (i=0 ; i<nstring ; i++) {
            printf("%s\n", strings[i]);
        }
        pthread_mutex_unlock(&file_lock);
    }
    ```
  - bug : un verrou par appel !
  - ```
    void
    write_strings(char *strings[], int nstring)
    {
        int i;
        static pthread_mutex_t file_lock=PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
    ```

Conditions



- Mutex : séquentialisation des accès
- Attente d'un état
  - buffer non vide,
  - remplissage du buffer par un autre thread...

  $\rightarrow$ condition
- Condition :
  - utilisée avec un mutex
  - attente d'une condition, d'un état

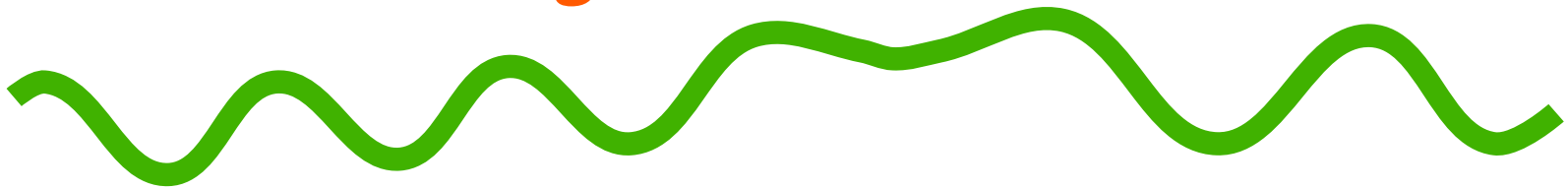
- Opérations de base
  - attendre, wait, sleep
  - signaler, signal, wakeup

- Interface `pthread`
  - `#include <pthread.h>`
    `pthread_cond_t`
  - `pthread_cond_init()`
    `pthread_cond_destroy()`
  - `pthread_cond_wait()`
    `pthread_cond_signal()`
    `pthread_cond_timedwait()`
    `pthread_cond_broadcast()`

Création/destruction de conditions

- Allocation
  - `pthread_cond_t cond;`
  - ou
  - `pthread_cond_t *cp;`
    `cp = malloc(sizeof(pthread_cond_t));`
- Initialisation obligatoire
  - `pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;`
  - ou
  - `int pthread_cond_init(`
    `pthread_cond_t *cp,`
    `const pthread_condattr_t *attr);`
  - valeur par défaut des attributs → `NULL`
- Destruction
  - `int pthread_cond_destroy(`
    `pthread_cond_t *cp);`

Attente et signal sur une condition

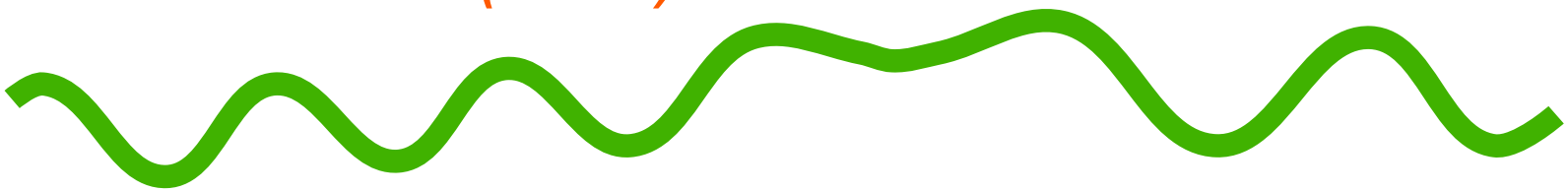


- Attente sur une condition
  - avoir vérifié à faux un prédicat
    - le tampon est plein...
  - s'endormir sur la condition en attente de la bascule du prédicat
  - un mutex associé au prédicat

```
int pthread_cond_wait(
        pthread_cond_t *cp,
        pthread_mutex_t *mp);
```

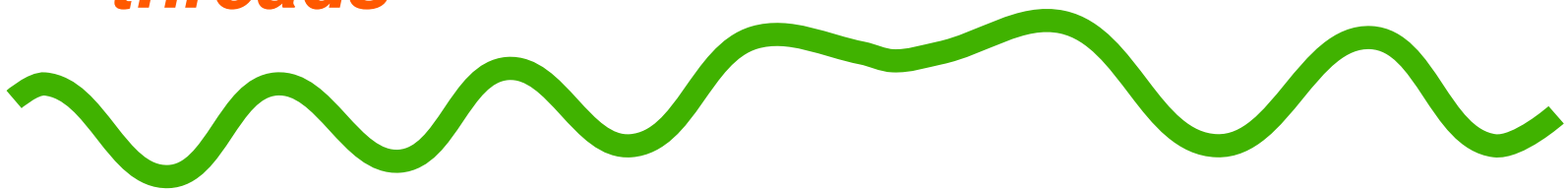
  - bloque le thread jusqu'à ce que la condition soit signalée
  - libère le mutex associé avant de bloquer le thread
    - seul le propriétaire du mutex peut appeler `pthread_cond_wait()`
  - verrouille le mutex avant de retourner suite à un signal sur la condition

Attente et signal sur une condition *(cont'd)*



- Réveiller un thread
  - `int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cp);`
  - réveille (au moins) un thread en attente sur la condition
    - une implémentation donnée peut réveiller plus de un thread bloqué
    - particulièrement sur multiprocesseurs
- Réveiller tous les threads
  - `int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cp);`
  - réveille tous les threads en attente sur la condition

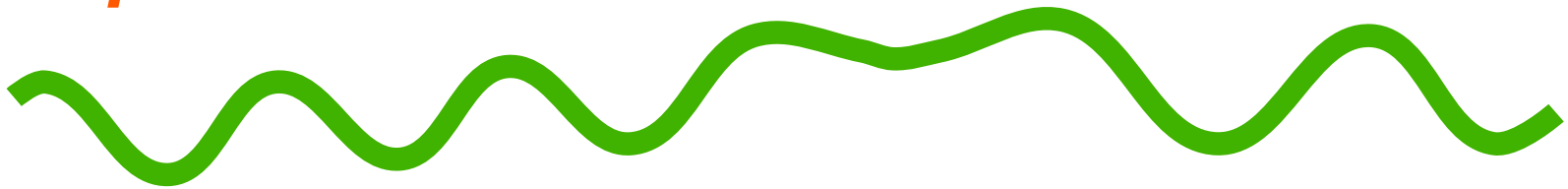
Signaler peut réveiller plusieurs threads



- Utilisation typique de l'attente : boucle sur la condition

```
pthread_mutex_lock(&mutex);

/* la condition ne peut plus changer une fois
 *  le verrou acquis
 *
 * boucle pour re-tester la condition
 * à la sortie du wait
 */
while (condition expression) {
    /* lâche le mutex lors du wait */
    pthread_cond_wait(&cond, &mutex);
    /* ici on a repris le verrou */
}
...

/* fait ce qui est nécessaire,
 * la condition étant vraie
 */

pthread_mutex_unlock(&mutex);
```

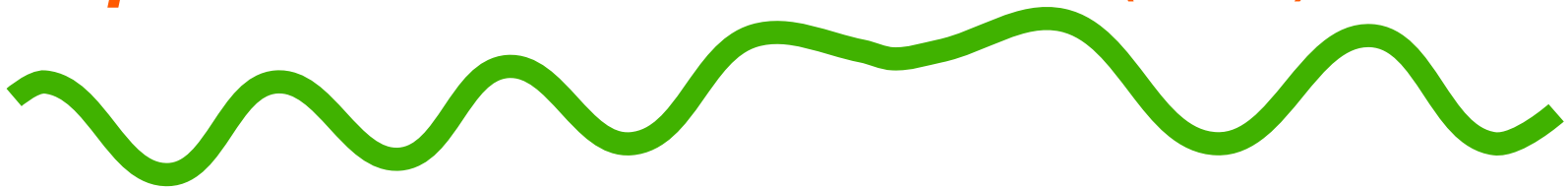
Exemple du producteur/consommateur



Structure de données

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


#define QSIZE 10                    /* number of pointers in the queue
typedef struct {
    pthread_mutex_t buf_lock;       /* lock the structure */
    int start_idx;                  /* start of valid data */
    int num_full;                   /* # of full locations */
    pthread_cond_t notfull;         /* full -> notfull condition */
    pthread_cond_t notempty;        /* empty -> notempty condition */
    void *data[QSIZE];              /* circular buffer of pointers */
} circ_buf_t;
```

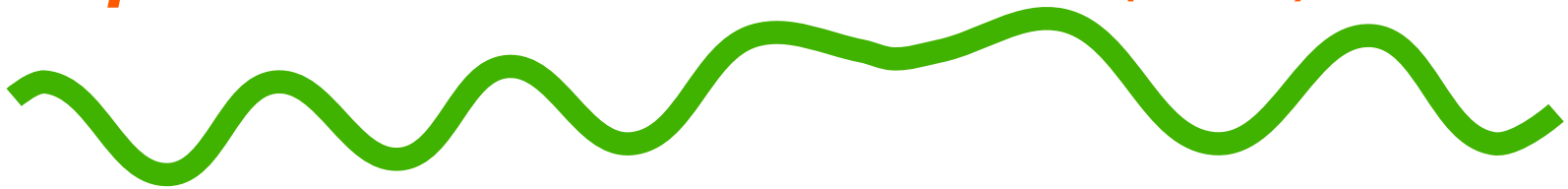
Exemple du producteur/consommateur *(cont'd)*



- Création d'un buffer

```
/* new_cb() creates and initializes a new circular buffer */
circ_buf_t *
new_cb()
{
    circ_buf_t *cbp;

    cbp = malloc(sizeof(circ_buf_t));
    if (cbp == NULL)
        return NULL;
    pthread_mutex_init(&cbp->buf_lock, NULL);
    pthread_cond_init(&cbp->notfull, NULL);
    pthread_cond_init(&cbp->notempty, NULL);
    cbp->start_idx = 0;
    cbp->num_full = 0 ;
    return(cbp);
}
```

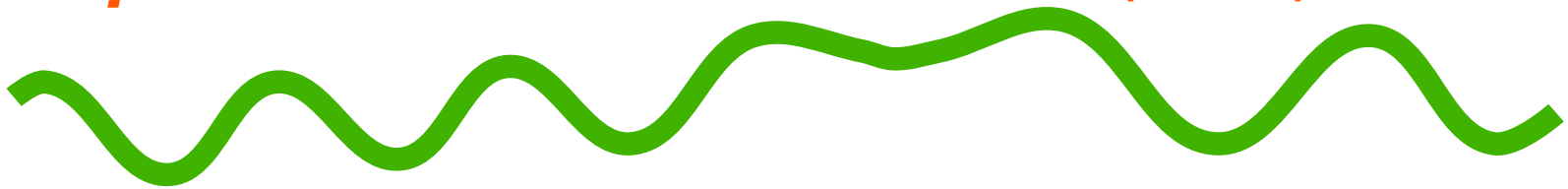
Exemple du producteur/consommateur *(cont'd)*



- Libération d'un buffer

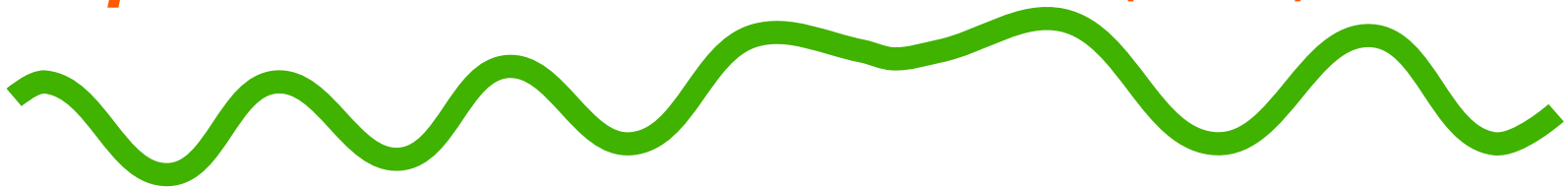
```
/* delete_cb() frees a circular buffer */
void
delete_cb(circ_buf_t *cbp)
{
    pthread_mutex_destroy(&cbp->buf_lock);
    pthread_cond_destroy(&cbp->notfull);
    pthread_cond_destroy(&cbp->notempty);
    free(cbp);
}
```

Exemple du producteur/consommateur *(cont'd)*



- Producteur
  - `si tampon_plein`
    `attendre(non_plein)`
    `remplir_tampon()`
    `signaler(non_vide)`
- Consommateur
  - `si tampon_vide`
    `attendre(non_vide)`
    `vider_tampon()`
    `signaler(non_plein)`

Exemple du producteur/consommateur *(cont'd)*



- Producteur

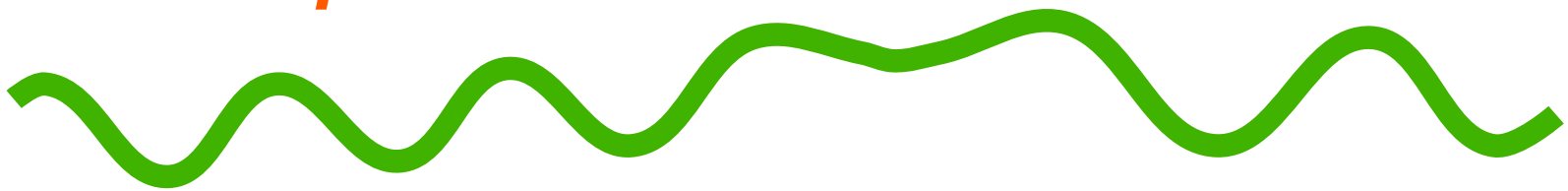
```
/* put_cb_data() puts new data on the queue.
   If the queue is full, it waits until there is room. */
void
put_cb_data(circ_buf_t *cbp, void *data)
{
    pthread_mutex_lock(&cbp->buf_lock);
    /* wait while the buffer is full */
    while (cbp->num_full == QSIZE)
        pthread_cond_wait(&cbp->notfull, &cbp->buf_lock);
    cbp->data[(cbp->start_idx + cbp->num_full) % QSIZE] = data;
    cbp->num_full += 1;
    /* let a waiting reader know there's data */
    pthread_cond_signal(&cbp->notempty);
    pthread_mutex_unlock(&cbp->buf_lock);
}
```

Exemple du producteur/consommateur (cont'd)

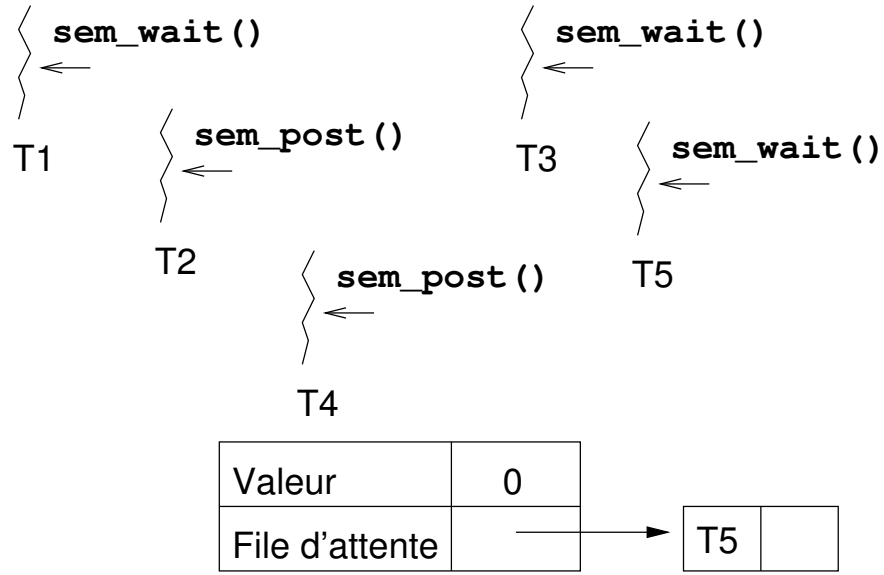
Consommateur

```
/* get_cb_data() get the oldest data in the circular buffer.
   If there is non, it waits until new data appears. */
void *
get_cb_data(circ_buf_t *cbp)
{
    void *data;

    pthread_mutex_lock(&cbp->buf_lock);
    /* wait while there's nothing in the buffer */
    while (cbp->num_full == 0)
        pthread_cond_wait(&cbp->notempty, &cbp->buf_lock);
    data = cbp->data[cbp->start_idx];
    cbp->start_idx = (cbp->start_idx + 1) % QSIZE;
    cbp->num_full -= 1;
    /* let a waiting writer know there's room */
    pthread_cond_signal(&cbp->notfull);
    pthread_mutex_unlock(&cbp->buf_lock);
    return data;
}
```

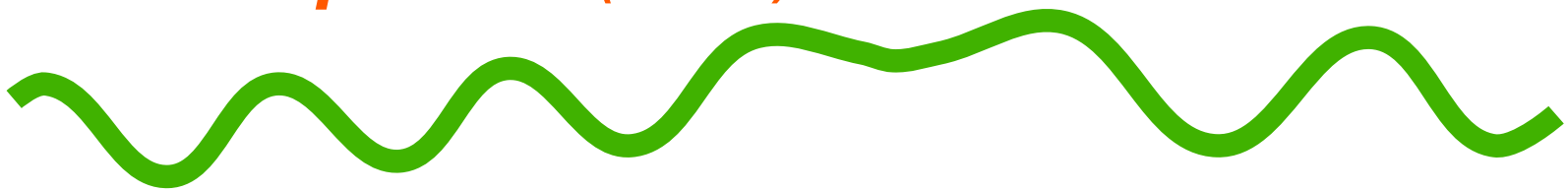
Sémaphores



- Synchronisation POSIX :
  - déjà vu : mutex, conditions, `pthread_exit()`/`pthread_join()`
  - existe aussi : sémaphores (à compteur)
- Sémaphore = une valeur et une file d'attente
  - `sem_wait()` bloquant si compteur $\leq$ 0
  - `sem_post()` incrémente le compteur
  - pas de notion de propriétaire d'un sémaphore



Sémaphores *(cont'd)*



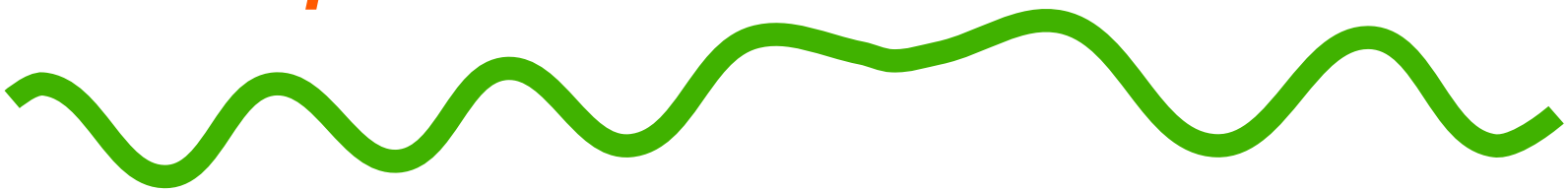
- Interface POSIX :
  - `#include <semaphore.h>`

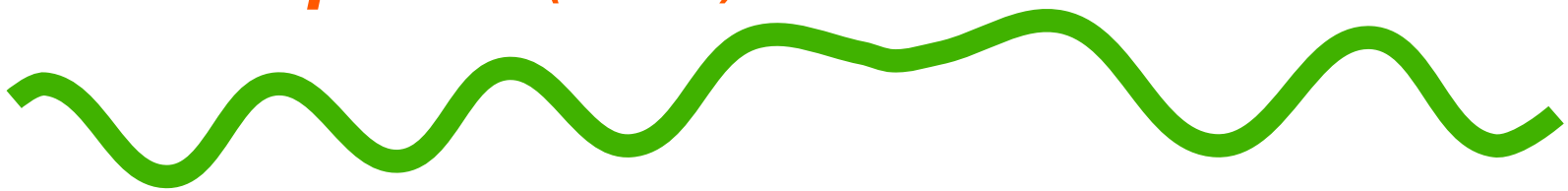
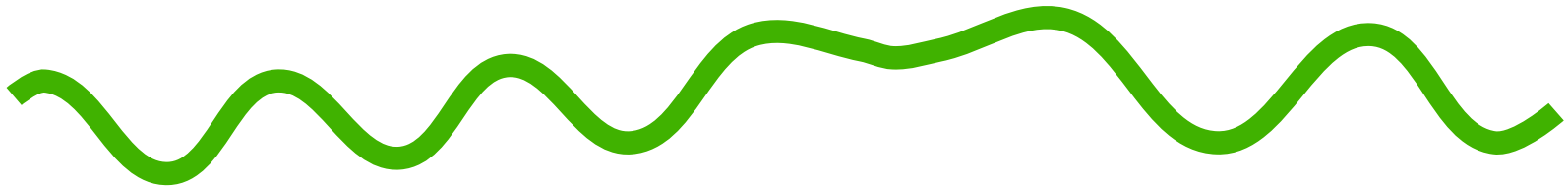
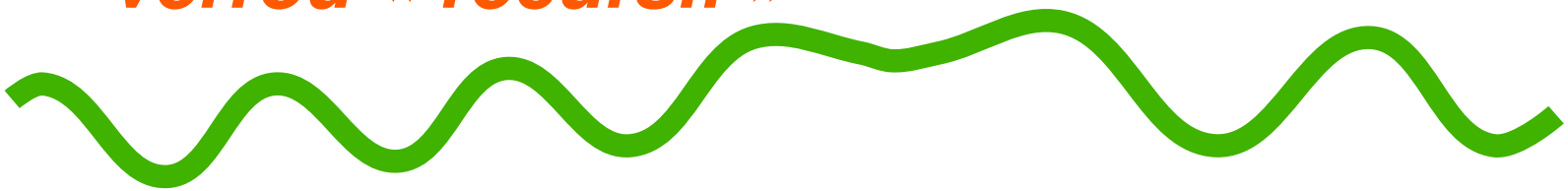
    `sem_t`
  - `sem_init();`

    `sem_destroy();`
  - `sem_wait();`

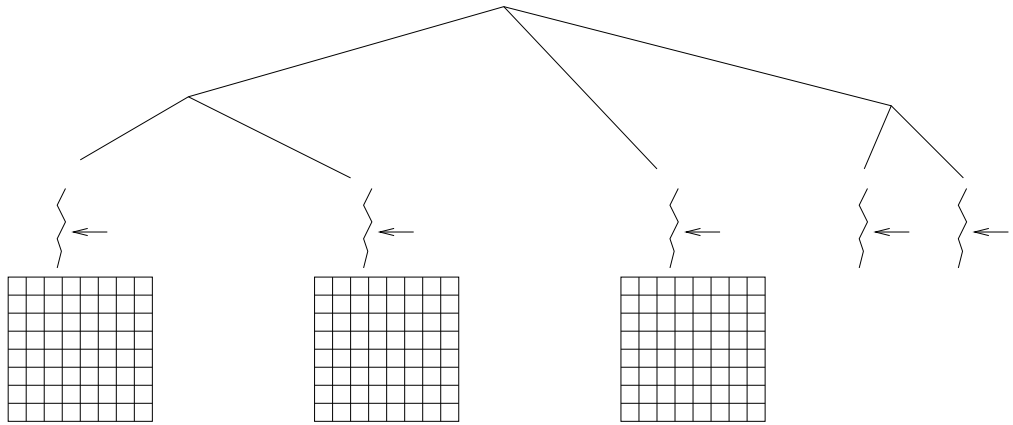
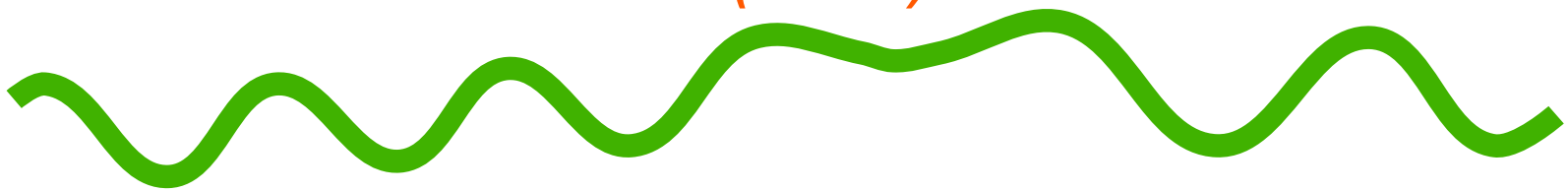
    `sem_post();`

    `sem_trywait();`

    `sem_getvalue();`
- Création/destruction de sémaphores :
  - ```
    int sem_init(
            sem_t *sem,
            int pshared,
            unsigned int value);
    int sem_destroy(
            sem_t * sem);
    ```
  - initialisation obligatoire
  - valeur initiale `value`
  - `pshared` : sémaphore local au processus (valeur 0) ou partagé avec d'autres processus
    ```

Attente et notification sur un sémaphore



- Notification d'un sémaphore
  - `int sem_post(sem_t *sem);`
  - incrémente le compteur de manière atomique
- Attente sur un sémaphore
  - `int sem_wait(sem_t *sem);`
  - bloque tant que compteur $\leq$ 0
  - décrémente alors le sémaphore de manière atomique
- Interruption possible du thread dans un `sem_wait()`
  - réception d'un signal, appel à `fork()`...
  - `sem_wait()` retourne -1, positionne `errno` à `EINTR`
  - Utilisation typique

```
while (sem_wait(&s) == -1)
    ; /* vraisemblablement rien */

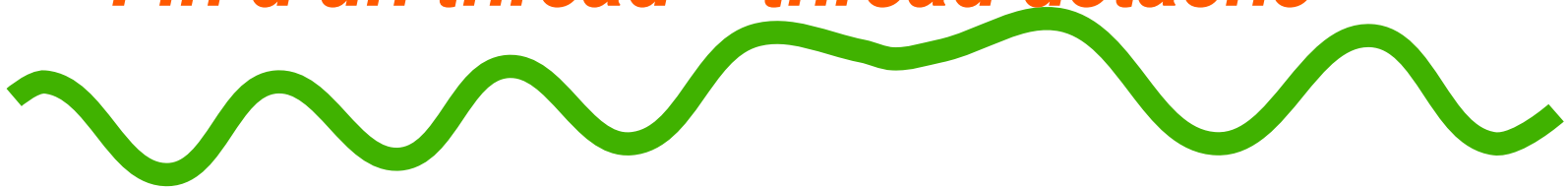
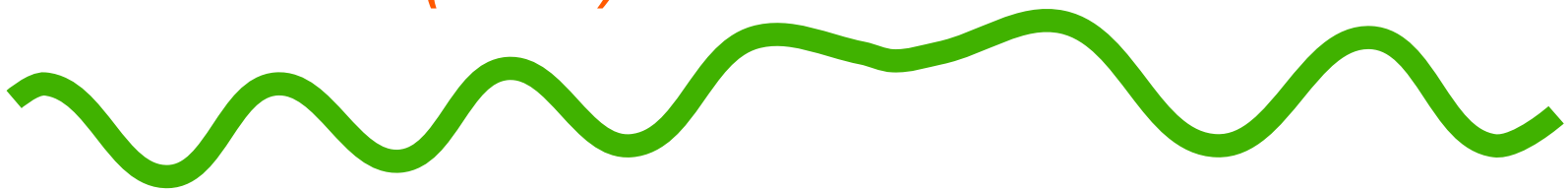
/* ici le semaphore est decremente */
```

Attente et notification sur un sémaphore *(cont'd)*



- Tentative de décrémentation
  - `int sem_trywait(`
    `sem_t *sem);`
  - variante non-bloquante de `sem_wait()`
  - compteur $>$ 0 : décrémente et retourne 0
  - compteur à zéro : retourne immédiatement -1 avec l'erreur `EAGAIN`
- Valeur d'un sémaphore
  - `int sem_getvalue(`
    `sem_t *sem,`
    `int *sval);`
  - retourne dans `sval` la valeur du compteur
  - rarement utile : c'est toujours *l'ancienne* valeur !



Programmer avec les threads

Granularité des données

- La synchronisation sur des données suppose des données indépendantes
  - un changement sur une donnée n'affecte pas d'autres données
  - ce n'est pas toujours le cas !
  - les processeurs actuels ne savent pas adresser moins qu'un mot
    - 32 ou 64 bits par exemple
- Ne pas utiliser deux parties d'un même mot :

```
char array [8] ;          /* Bad ! */
/* Thread 1 */                          /* Thread 2 */
array[0]++ ;                            array[1]++ ;
```

- Normalement les variables sont alignées sur des mots :

```
char a, b ;               /* Devrait etre OK */
/* Thread 1 */                          /* Thread 2 */
a++ ;                                   b++ ;
```

Verrou « récursif »



- N'a de récursif que la terminologie habituelle
- Une fonction verrouille un mutex
  - appelle une autre fonction qui verrouille aussi le mutex
  - situation « naturelle » : les deux fonctions accèdent une même variable...
- Mutex POSIX : deadlock !
  - il existe des mutex récursifs (Java, option POSIX...)
  - on peut les construire au dessus des verrous POSIX (cf TD...)
  - il existe des options POSIX pour obtenir des verrous récursifs
- Utilisation de mutex récursifs ?
  - pas toujours nécessaire
  - restructurer le code

Verrou « récursif » (cont'd)

- Exemple restructuration du code de la fonction `foo()`

```
data_t data ;
mutex_t m ;

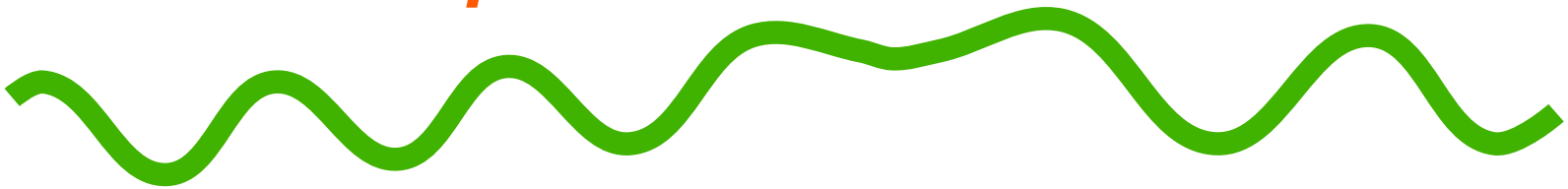
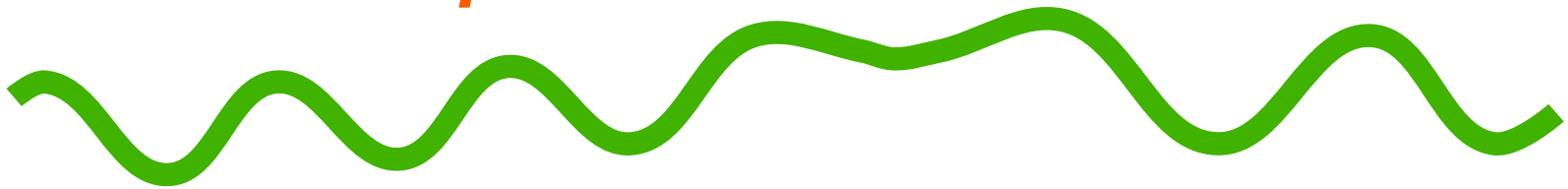
foo()
{
  lock(&m) ;
  ... data ...
  foo() ;
  ... data ...
  unlock(&m) ;
}
```

```
bar()
{
  lock(&m) ;
  ... data ...
  unlock(&m) ;
  bar() ;
  lock(&m) ;
  ... data ...
  unlock(&m) ;
}
```

```
gee()
{
  lock(&m) ;
  gee'() ;
  unlock(&m) ;
}

gee'()
{
  ... data ...
  gee'() ;
  ... data ...
}
```

- `bar()` peut-être invalide : un autre thread prend la main avant l'appel récursif
- `bar()` coûteux
- `gee()`/`gee'()` la solution ?

Race conditions

- Exécution concurrente en français ?
  - le résultat du programme dépend de l'ordonnancement des flots d'exécution
- Peut être un bug de conception du programme !

```
/* Thread 1 */
mutex_lock(&m);
v = v-1;
mutex_unlock(&m);
```

```
/* Thread 2 */
mutex_lock(&m);
v = v*2;
mutex_unlock(&m);
```

- Pas nécessairement un bug
  - plusieurs résultats corrects du programme



Race conditions *(cont'd)*



- La plupart des « race conditions » sont à l'origine de deadlocks !

```
/* Thread 1 */                    /* Thread 2 */
mutex_lock(&m1);
mutex_lock(&m2);

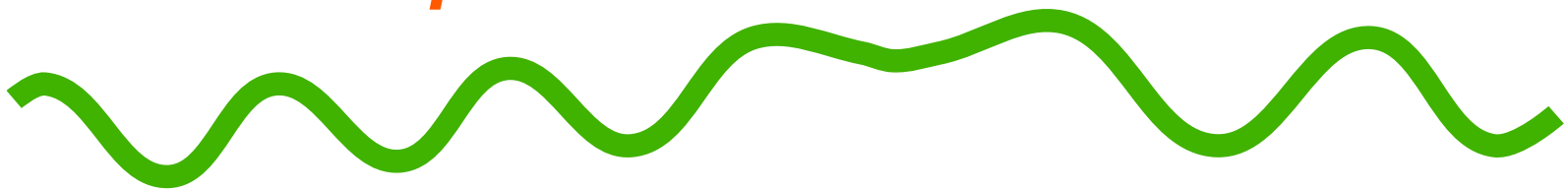
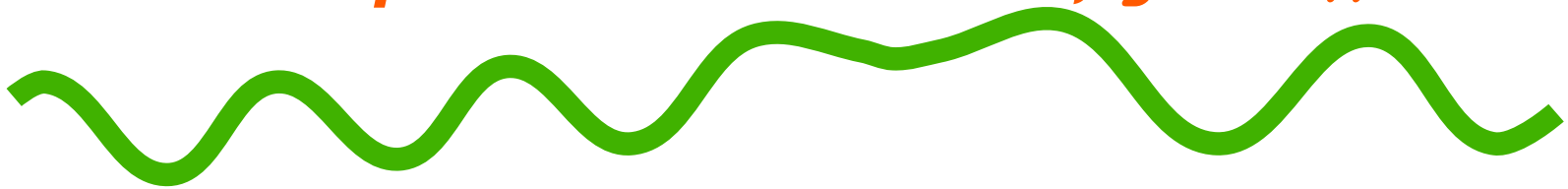
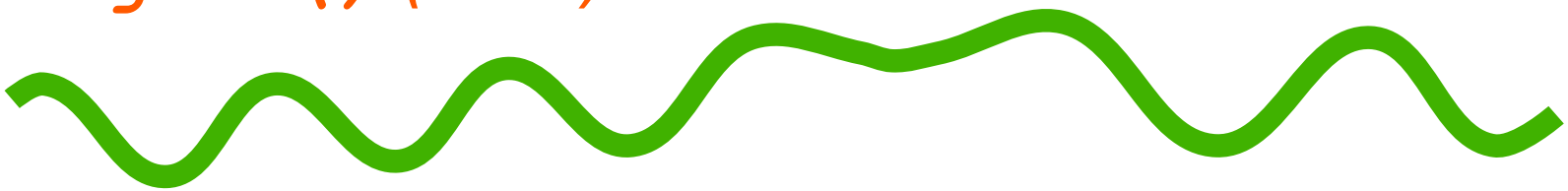
                                   mutex_lock(&m2);
                                   mutex_lock(&m1);
```

Le code va fonctionner 5 000 000 de fois ; puis...

```
/* Thread 1 */                    /* Thread 2 */
mutex_lock(&m1);

                                   mutex_lock(&m2);
mutex_lock(&m2);

                                   mutex_lock(&m1);
```

Recouvrir un deadlock

- Le problème : un thread attend sur un verrou qu'un autre thread ne lâchera jamais
  - (programme erroné)
  - erreur sur le thread...
- Recouvrir le deadlock : corriger, à l'exécution, cette situation

- Ne pas le faire ! Corriger le programme !
- Il ne suffit pas de lâcher le verrou !

Fin d'un thread – thread détaché



```
void pthread_exit(
        void *retval);
```

- Termine le thread courant
  - `retval` est la valeur retournée par le thread
  - elle pourra être consultée par un autre thread par un `pthread_join()`
  - suppose que le thread est en mode « *joinable* »
  - l'appel `pthread_join()` n'est qu'une autre manière de synchroniser des threads
  - on confond l'attente sur la fin du thread avec l'attente sur le résultat de ce thread
- Explicitement attendre sur le résultat que doit produire ce thread

Fin d'un thread – thread détaché (cont'd)



- Lancer les threads en mode *détaché* par défaut :

```
pthread_attr_t attr;
pthread_attr_init(&attr);
pthread_attr_setdetachstate(&attr, PTHREAD_CREATE_DETACHED);

pthread_create(&tid, &attr, func, arg);
```

- Passer un thread en mode détaché :

```
int pthread_detach(pthread_t t);
```

Debug d'un programme multithreadé

- Sources d'erreurs dans les programmes multithreadés :
  - passage en paramètre à un nouveau thread d'un pointeur dans la pile de l'appelant
  - accès à la mémoire globale sans protection (mutex...)
  - création de deadlock : deux threads tentent d'acquérir deux ressources dans un ordre différent
  - tentative de ré-acquérir un verrou déjà détenu
  - utilisation des signaux Unix et de threads
  - création de threads qui (par défaut !) ne sont pas détachés (doivent être réclamés par un `pthread_join()`)
  - prudence insuffisante lors de l'utilisation de cast (`(void *)`) pour les paramètres et retours des threads (`pthread_create()`)

Bibliothèques « MT-safe »



- Triple exigence :
  1. bibliothèque efficace
  2. bibliothèque MT-safe
  3. bibliothèque conforme à la sémantique et à l'API Unix

  Deux parmi les trois : ok...

Bibliothèque non MT-safe ou changement d'API ?

- Bibliothèque non MT-safe :
  - ```
    void
    print_time(time_t time)
    {
        char *s;
        s = ctime(time);
        printf("%s", s);
    }
    ```
- Version MT-safe de bibliothèque
  - ```
    void
    print_time(time_t time)
    {
        char s[SIZE];
        ctime_r(time, s);
        printf("%s", s);
    }
    ```
- Deux fonctions POSIX !
  - on trouve dans la `libc` :
    ```
    char *
    ctime(time_t time)
    {
        static char s[SIZE];
        ...
        return(s);
    }
    ```
  - changement de l'API !
    ```
    char *
    ctime_r(time_t time, char *s)
    {
        ...
        return(s);
    }
    ```

Contrôle des accès à une bibliothèque non MT-safe



```
void
print_time(time_t time)
{
    char *s, str [SIZE];
    static pthread_mutex_t m;

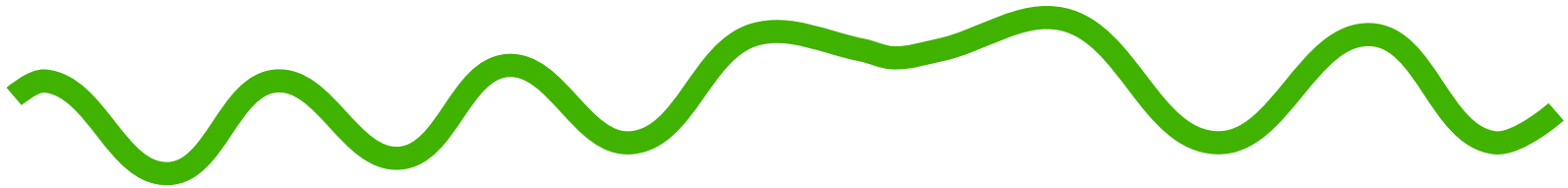
    pthread_mutex_lock(&m);
    s = ctime(time);
    strcpy(str, s) ;
    pthread_mutex_unlock(&m);

    printf("%s", str);
}
```

- Quid des appels à la bibliothèque depuis une autre bibliothèque ?

Bibliothèque MT-safe avec une autre sémantique



- Version MT-safe change la sémantique
  - par exemple `pread()` et `pwrite()` comparées à `read()` et `write()`
- Fonction originelle `read()`
  - `ssize_t read(int fd, void *buf, size_t count);`
  - lit `count` octets dans le fichier associé au descripteur `fd` et les range dans `buf`
  - lit ces octets à partir de la position courante dans le fichier
  - effet de bord : incrémente la position courante de `count` : non thread-safe !
- Nouvelle fonction `pread()`
  - `ssize_t pread(int fd, void *buf, size_t nbyte, off_t offset);`
  - identique à `read()`
  - mais : lit à partir de la position `offset` sans changer la position courante dans le fichier

Autres problèmes : `errno`, `getc()`



- La variable `errno`
  - positionnée par les appels systèmes (et quelques bibliothèques) pour préciser une erreur
  - cette valeur est significative quand un appel système a retourné une erreur (normalement -1)
- Ancienne implémentation : une variable globale
- On veut une valeur d'erreur locale à chaque thread
  - c'est pour ce genre d'exigence qu'a été introduit le TSD
  - *Thread Specific Data*
- Alternative
  - retour de la valeur `errno` par l'appel système
  - c'est le choix fait pour les fonctions de gestion des thread...

Autres problèmes : `errno`, `getc()` (cont'd)



- Fonction `getc()` de lecture d'un caractère
  - ```
    #include <stdio.h>
    int getc(FILE *fp);
    ```
  - macro définie dans `stdio.h`.
  - retourne le caractère suivant du flux `fp`
  - effet de bord : avance la position courante dans `fp`
  - il existe des versions thread-safe de `getc()`
  - pas de versions « async-cancel-safe »
  - problème si le thread est interrompu pendant le `getc()`
    ```

Thread et autres mécanismes POSIX

- Processus légers et processus
  - appel de `fork()`
  - appel de `exec()`
- Processus légers et signaux
  - signaux synchrones de fautes
    - instruction illégale `SIGILL`, violation mémoire `SIGSEGV`, etc.
    - identification possible du thread fautif
    - délivrance du signal au thread fautif
  - signaux asynchrones
    - délivré au processus
    - traitant de signal exécuté par un des threads...
  - explicitement envoyer un signal à un thread

```
#include <signal.h>

int pthread_kill(pthead_t thread, int sig);
```

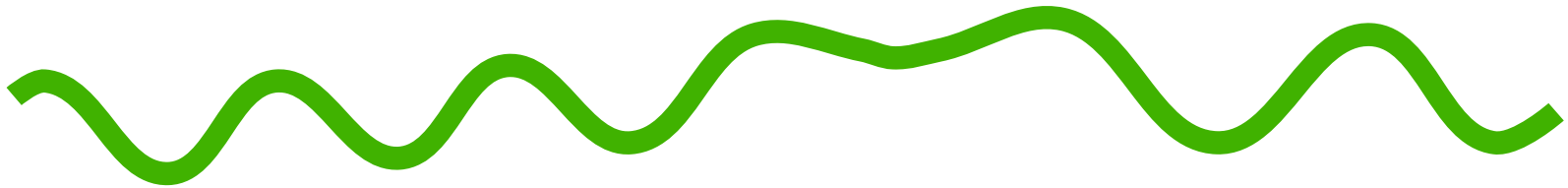


Implantations des threads

Deux niveaux de threads

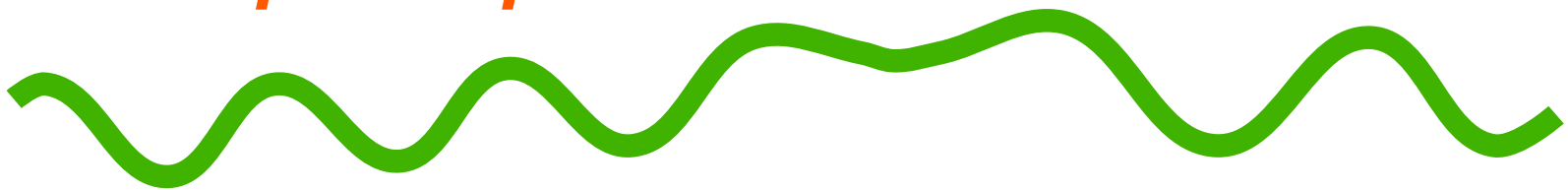
- Deux grands types d'implantations de threads
  1. threads utilisateurs
  2. threads noyaux
- Threads utilisateurs
  - bibliothèque de threads
  - le système ne connaît que les processus
  - légèreté des traitements : pas d'appels système systématique
  - limitations : plusieurs processeurs pour un même processus ?
- Threads noyaux
  - appels systèmes
  - le système gère lui-même les threads

Cf. cours de système en master



Ce qui n'a pas été vu

Ce qui n'a pas été vu



- Thread Specific Data
- Cancellation
- Threads et... Java

  Threads et... Windows NT
- Threads en environnement distribué
- Threads communiquants (« *talking threads* »)