

Programmation Concurrente, Réactive et Répartie

Cours N°2

Emmanuel Chailloux

Master d'Informatique
Université Pierre et Marie Curie

année 2017-2018

Rappel du cours 1

- ▶ parallélisme : perte du déterminisme
 - ▶ Modèles de parallélisme
 - ▶ mémoire partagée :
synchronisation explicite/communication implicite
 - ▶ mémoire répartie :
synchronisation implicite/communication explicite
- ⇒ dualité des deux modèles

Cours 2 : Threads équitables

1. Généralités : coopération vs préemption
2. Api Fairthreads en C
 - ▶ Scheduler et threads
 - ▶ Implantation
 - ▶ Evénements
 - ▶ Automates

Fair Threads

- ▶ Frédéric Boussinot
- ▶ projet MIMOSA EMP-CMA / Inria Sophia Antipolis sur la programmation réactive :
<http://www-sop.inria.fr/mimosa/rp>
- ▶ Fair Threads :
<http://www-sop.inria.fr/mimosa/rp/FairThreads/>

Modèle coopératif et préemptif

- ▶ ordonnanceur (*scheduler*) : serveur de synchronisation
- ▶ 2 types de threads
 - ▶ threads liés à un ordonnanceur (modèle coopératif)
 - ▶ threads non liés (modèle préemptif)

Caractéristiques

- ▶ multiprocesseurs : schedulers et threads non liés;
- ▶ déterministe : si tous les threads sont liés à un seul scheduler;
- ▶ I/O bloquantes : implantées par threads non liés;

- ▶ *instant* : partagé par tous les threads d'un scheduler;
synchronisation automatique à la fin de chaque instant
- ▶ *événement* : diffusion instantanée à tous les threads liés à un même scheduler;
permet la synchronisation et la communication
- ▶ *automate* : pour les petits threads de courte vie;
implantation légère

Schedulers

- ▶ serveur de synchronisation (instants)
- ▶ serveur de communication (événements)
- ▶ serveur d'exécution (automates)

Ordonnancement coopératif

Durant un instant :

- ▶ exécution de chaque thread jusqu'au prochain point de coopération :

Un thread rend la main au scheduler à un point de coopération :

- ▶ explicite : fonction cooperate
- ▶ implicite : attente d'un événement
- ▶ pas de priorité entre threads d'un même scheduler

Ordonnancement préemptif

- ▶ modèle à mémoire partagée
- ▶ perte du déterminisme
- ▶ mutuelle exclusion (Mutex)
- ▶ attente sur condition (Condition)

prochain cours : Thread en OCaml et en Java

Automates

petit thread ne nécessitant pas une pile propre
contient une liste d'états (code séquentiel)

- ▶ s'exécute dans le thread du scheduler
- ▶ effectue un changement d'état en un instant
- ▶ passage d'un état à un autre :
 - ▶ explicite : saut à un état particulier
 - ▶ implicite : passage à l'état suivant
- ▶ fin de l'automate, à la fin du dernier état
- ▶ peut communiquer par événement (état particulier)

Evénements

- ▶ création et diffusion d'un événement à tous les threads
- ▶ attente d'un événement à un instant ou au plus sur n instants
- ▶ association d'une valeur à un événement pour un instant et récupération de celle-ci
- ▶ sélection sur un tableau d'événements

Implantation des Fair Threads

- ▶ en C :

<http://www-sop.inria.fr/mimosa/rp/FairThreads/FTC/index.html>

- ▶ en Java :

<http://www-sop.inria.fr/mimosa/rp/FairThreads/FTJava/index.html>

- ▶ en Scheme :

[http:](http://www-sop.inria.fr/mimosa/fp/Bigloo/doc/bigloo-8.html)

[//www-sop.inria.fr/mimosa/fp/Bigloo/doc/bigloo-8.html](http://www-sop.inria.fr/mimosa/fp/Bigloo/doc/bigloo-8.html)

- ▶ en OCaml (prototype 1) :

http://www.algo-prog.info/hirondml/files/ocaml_fthreads.tar.gz

et sa documentation <http://www.algo-prog.info/hirondml/doc/fthread/html/Fthread.html>

Bibliothèque C : scheduler

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

- ▶ type `ft_scheduler_t`

- ▶ création : `ft_scheduler_t ft_scheduler_create (void)`

retourne NULL si échec de la création

- ▶ démarrage :

```
int ft_scheduler_start (ft_scheduler_t sched)
```

code retour 0 ou un code d'erreur \neq 0 (`BAD_CREATE`)

Bibliothèque C : scheduler (suite)

Contrôle des threads :

- ▶ `int ft_scheduler_stop (ft_thread_t th)`
force l'arrêt du thread `th`
- ▶ `int ft_scheduler_suspend (ft_thread_t th)`
suspend l'exécution du thread `th` au prochain instant
- ▶ `int ft_scheduler_resume (ft_thread_t th)`
reprend l'exécution du thread `th` au prochain instant

La suspension est prioritaire à la reprise.

Bibliothèque C : thread (1)

▶ type `ft_thread_t`

```
▶  
1 ft_thread_t ft_thread_create (  
2     ft_scheduler_t sched,  
3     void (*runnable)(void*),  
4     void (*cleanup)(void*),  
5     void *args  
6 )
```

où

- ▶ `sched` : scheduler
- ▶ `runnable` : fonction de calcul du thread
- ▶ `cleanup` : fonction de nettoyage
- ▶ `args` : argument des 2 fonctions

Bibliothèque C : thread (2)

Fin d'un thread :

- ▶ fin du calcul de la fonction associée
- ▶ appel à `void ft_exit (void)`
- ▶ appel à `int ft_scheduler_stop (ft_thread_t th)`

Quand un thread termine la fonction `cleanup` est appelée à l'instant suivant

Attente de fin d'un thread :

- ▶ `int ft_thread_join (ft_thread_t th)`
attente de la fin du thread `th`
- ▶ `int ft_thread_join_n (ft_thread_t th, int n)`
attente sur au plus n instants

Coopération

- ▶ `int ft_thread_cooperate (void)`
retourne le contrôle au scheduler
- ▶ `int ft_thread_cooperate_n (int n)`
redonne le contrôle pour n instants

Equivalent à :

```
1 for (i=0;i<k;i++) ft_thread_cooperate ();
```

Un premier exemple : Hello World (1)

```
1  #include "pthread.h"
2  #include "stdio.h"
3
4  void h (void *id) {
5      while (1) {
6          fprintf (stderr,"Hello ");
7          ft_thread_cooperate ();
8      }
9  }
10
11 void w (void *id) {
12     while (1) {
13         fprintf (stderr,"World!\n");
14         ft_thread_cooperate ();
15     }
16 }
```

Un premier exemple : Hello World (2)

```
1
2 int main(void) {
3
4     ft_scheduler_t sched = ft_scheduler_create ();
5     ft_thread_create (sched,h,NULL,NULL);
6     ft_thread_create (sched,w,NULL,NULL);
7     ft_scheduler_start (sched);
8
9     ft_exit ();
10    return 0;
11 }
```

Le même en non-déterministe

```
1  int main (void) {
2
3     ft_scheduler_t sched1 = ft_scheduler_create ();
4     ft_scheduler_t sched2 = ft_scheduler_create ();
5
6     ft_thread_create (sched1,h,NULL,NULL);
7     ft_thread_create (sched2,w,NULL,NULL);
8
9     ft_scheduler_start (sched1);
10    ft_scheduler_start (sched2);
11
12    ft_exit ();
13    return 0;
14 }
```

Liaison des threads

- ▶ `int ft_thread_unlink (void);`
délié le thread de son scheduler
- ▶ `int ft_thread_link (ft_scheduler_t sched);`
relie un thread auprès du scheduler sched

permet de changer de scheduler.

Lecture non bloquante (1)

```
1 gcc -Wall -O3 -D_REENTRANT -I ../include -L../lib \  
2 nbread.c -lfthread -lpthread
```

```
1 #include "fthread.h"  
2 #include <stdio.h>  
3 #include <unistd.h>  
4 #include <stdlib.h>  
5  
6 /*****  
7 ssize_t ft_thread_read (int fd, void *buf, size_t count) {  
8  
9     ft_scheduler_t sched = ft_thread_scheduler ();  
10    ssize_t res;  
11  
12    ft_thread_unlink ();  
13    res = read (fd, buf, count);  
14    ft_thread_link (sched);  
15    return res;  
16 }
```

Lecture non bloquante (2)

```
1
2  /*****
3  void reading_behav (void* args) {
4      int max = (int)args;
5      char *buf = (char*)malloc (max+1);
6      ssize_t res;
7      fprintf (stderr,"enter %d characters:\n",max);
8
9      res = ft_thread_read (0,buf,max);
10
11     if (-1 == res) fprintf (stderr,"error\n");
12     buf[res] = 0;
13     fprintf (stderr,"read %d: <%s>\n",res,buf);
14     exit (0);
15 }
```

Lecture non bloquante (3)

```
1 int main (void) {
2     ft_scheduler_t sched = ft_scheduler_create ();
3     ft_thread_create (sched,reading_behav,NULL,(void*)5);
4     ft_scheduler_start (sched);
5     ft_exit();
6     return 0;
7 }
```


Implantation

- ▶ Utilise les threads POSIX (man pthread)
- ▶ environ 1800 lignes de C

Implantation (suite)

```
1  struct ft_scheduler_t {
2      ft_thread_t          self;
3      thread_list_t       thread_table;
4      thread_list_t       to_run;
5      thread_list_t       to_stop;
6      thread_list_t       to_suspend;
7      thread_list_t       to_resume;
8      thread_list_t       to_unlink;
9      broadcast_list_t     to_broadcast;
10     pthread_mutex_t      sleeping;
11     pthread_cond_t       awake;
12     ft_environment_t     environment;
13     int                  well_created;
14 };
```

Implantation (suite)

```
1  struct ft_thread_t {
2      pthread_t          pthread;
3      int                well_created;
4      pthread_mutex_t    lock;
5      pthread_cond_t     token;
6      int                has_token;
7
8      ft_executable_t    cleanup;
9      ft_executable_t    run;
10     void                *args;
11
12     ft_scheduler_t      scheduler;
13     ...};
```

Implantation (suite)

```
1  static void _fire_all_threads (ft_scheduler_t sched) {
2
3      FOR_ALL_THREADS
4      if (_is_fireable (thread)){
5          if (!_is_automaton (thread)) {
6              _transmit_token (sched->self,thread);
7          } else {
8              _run_as_automaton (thread);
9          }
10     }
11     END_FOR_ALL
12 }
```

Evénements

- ▶ type `ft_event_t`

- ▶ création :

```
ft_event_t ft_event_create (ft_scheduler_t sched);
```

A l'instant courant :

- ▶ génération : `int ft_thread_generate (ft_event_t evt);`
engendre l'événement `evt` pour l'instant courant; il aura disparu à l'instant suivant

- ▶ `int ft_thread_generate_value (ft_event_t evt,
 void *val);`

associe une valeur `val` à la génération de l'événement

Evénements (suite)

A l'instant suivant

- ▶ `int ft_scheduler_broadcast (ft_event_t evt);`
l'événement `evt` sera engendré au prochain instant
- ▶ `int ft_scheduler_broadcast_value (ft_event_t evt,`
`void *val);`
`val` est associée à `evt`

Attente d'un événement

- ▶ attente

- ▶ `int ft_thread_await (ft_event_t evt);`
suspend l'exécution du thread jusqu'à la génération d'evt
- ▶ `int ft_thread_await_n (ft_event_t evt,int n);`
l'attente dure au plus n instants.

- ▶ récupération d'une valeur :

- ▶ `ft_thread_get_value(ft_event e,
int num,
void **result)`

récupère la i -ième valeur associée à l'événement e :

- ▶ si elle existe, la valeur est rangée dans `result`, l'appel termine immédiatement
- ▶ sinon, la fonction retourne NULL à l'instant suivant

Attente sur tableau d'événements

permet l'attente sur plusieurs événements.

Le tableau d'événements `array` et le tableau `mask` sont de longueur *len*.

- ▶ `int ft_thread_select(int len,
 ft_event_t *array,
 int *mask)`

suspend l'exécution du thread jusqu'à la génération d'au moins un événement du tableau `array`; le tableau `mask` indique quels sont les événements engendrés.

- ▶ `int ft_thread_select_n (int len,ft_event_t *array,
 int *mask,int timeout);`

Attente au plus *timeout* instants

Exemple avec événements (1)

```
1  #include "ftthread.h"
2  #include <stdio.h>
3  #include <unistd.h>
4
5  ft_event_t e1, e2;
6
7  void behav1 (void *args) {
8
9      ft_thread_generate (e1);
10     fprintf (stdout, "broadcast e1\n");
11
12     fprintf (stdout, "wait e2\n");
13     ft_thread_await (e2);
14     fprintf (stdout, "receive e2\n");
15
16     fprintf (stdout, "end of behav1\n");
17 }
```

Exemple avec événements (2)

```
1
2 void behav2 (void *args) {
3
4     fprintf (stdout, "wait e1\n");
5     ft_thread_await (e1);
6     fprintf (stdout, "receive e1\n");
7
8     ft_thread_generate (e2);
9     fprintf (stdout, "broadcast e2\n");
10
11     fprintf (stdout, "end of behav2\n");
12 }
```

Exemple avec événements (3)

```
1  int main(void) {
2
3      int c, *cell = &c;
4      ft_thread_t th1, th2;
5      ft_scheduler_t sched = ft_scheduler_create ();
6
7      e1 = ft_event_create (sched);
8      e2 = ft_event_create (sched);
9
10     th1 = ft_thread_create (sched,behav1,NULL,NULL);
11     th2 = ft_thread_create (sched,behav2,NULL,NULL);
12
13     ft_scheduler_start (sched);
14
15     pthread_join (ft_pthread (th1),(void*)&cell);
16     pthread_join (ft_pthread (th2),(void*)&cell);
17     fprintf (stdout,"exit\n");
18     exit (0);
19 }
```

Exemple avec événements (4)

```
1  /*
2  broadcast e1
3  wait e2
4  wait e1
5  receive e1
6  broadcast e2
7  end of behav2
8  receive e2
9  end of behav1
10 exit
11 */
```

Tableau d'événements (1)

```
1  #include "pthread.h"
2  #include "stdio.h"
3
4  /* use of select to await 2 events */
5
6  ft_event_t  a,b;
7
8  void awaiter (void *args) {
9
10     ft_event_t events [2] = {a,b};
11     int         result [2] = {0,0};
12
13     ft_thread_select (2,events,result);
14     fprintf (stdout, "result: [%d,%d] ",result[0],result[1]);
15     if (result[0] == 0 || result[1] == 0) {
16         ft_thread_await (result[0]==0 ? events[0] : events[1]);
17     }
18
19     fprintf (stdout, "both received! ");
20     ft_thread_cooperate ();
21     fprintf (stdout, "exit!\n");
22     exit (0);
23 }
```

Tableau d'événements (2)

```
1
2 void trace_instant (void *args)
3 {
4     int i = 1;
5     while (1) {
6         fprintf (stdout, "\ninstant %d: ",i);
7         i++;
8         ft_thread_cooperate ();
9     }
10 }
```

Tableau d'événements (3)

```
1
2 void agenerator (void *args)
3 {
4     ft_thread_cooperate_n (3);
5     fprintf (stdout, "event a generated! ");
6     ft_thread_generate (a);
7 }
8
9 void bgenerator (void *args)
10 {
11     ft_thread_cooperate_n (3);
12     fprintf (stdout, "event b generated! ");
13     ft_thread_generate (b);
14 }
```

Tableau d'événements (4)

```
1
2 int main (void)
3 {
4     ft_scheduler_t sched = ft_scheduler_create ();
5
6     a = ft_event_create (sched);
7     b = ft_event_create (sched);
8     ft_thread_create (sched,trace_instant,NULL,NULL);
9
10    ft_thread_create (sched,agenerator,NULL,NULL);
11    ft_thread_create (sched,awaiter,NULL,NULL);
12    ft_thread_create (sched,bgenerator,NULL,NULL);
13
14    ft_scheduler_start (sched);
15
16    ft_exit ();
17    return 0;
18 }
```


Tableau d'événements (5)

```
1
2 /* result
3
4 instant 1:
5 instant 2:
6 instant 3:
7 instant 4: event a generated! result: [1,0] event b generated! both received!
8 instant 5: exit!
9 end result */
```

Automates

Ensemble de macros permettant de décrire les états d'un automate et les attentes sur événements.

Création :

```
1 ft_thread_t ft_automaton_create (ft_scheduler_t sched,  
2                               ft_automaton_t automaton,  
3                               ft_executable_t cleanup,  
4                               void *args)
```

attente sur événement avec automate (1)

```
1  #include "fthread.h"
2  #include <stdio.h>
3
4  /* simultaneous events */
5
6  ft_event_t event1,event2;
7
8  DEFINE_AUTOMATON (autom)
9  {
10     BEGIN_AUTOMATON
11         STATE_AWAIT (0,event1);
12         STATE_AWAIT (1,event2)
13         {
14             fprintf (stdout, "both events are received! ");
15         }
16     END_AUTOMATON
17 }
```

attente sur événement avec automate (2)

```
1  /*****  
2  void generator (void *args)  
3  {  
4      ft_thread_cooperate_n (4);  
5      fprintf (stdout, "event1 generated! ");  
6      ft_thread_generate (event1);  
7  
8      ft_thread_cooperate_n (4);  
9      fprintf (stdout, "event1 and event2 are generated! ");  
10     ft_thread_generate (event1);  
11     ft_thread_generate (event2);  
12  
13     ft_thread_cooperate ();  
14     fprintf (stdout, "exit\n");  
15     exit (0);  
16 }
```

attente sur événement avec automate (3)

```
1 void traceInstants (void *args)
2 {
3     int i = 0;
4     for (i=0;i<10;i++) {
5         fprintf(stdout,"\\n>>>>>>>>>>>>> instant %d: ",i);
6         ft_thread_cooperate ();
7     }
8     fprintf (stdout, "\\exit!\\n");
9     exit (0);
10 }
```

attente sur événement avec automate (4)

```
1  int main ()
2  {
3      ft_scheduler_t sched = ft_scheduler_create ();
4
5      event1 = ft_event_create (sched);
6      event2 = ft_event_create (sched);
7
8      ft_thread_create (sched,traceInstants,NULL,NULL);
9
10     if (NULL == ft_automaton_create (sched,autom,NULL,NULL)) {
11         fprintf (stdout, "cannot create automaton!!!\n");
12     }
13     ft_thread_create (sched,generator,NULL,NULL);
14
15     ft_scheduler_start (sched);
16
17     ft_exit ();
18     return 0;
19 }
```

attente sur événement avec automate (5)

```
1
2 /* result
3
4 >>>>>>>>> instant 0:
5 >>>>>>>>> instant 1:
6 >>>>>>>>> instant 2:
7 >>>>>>>>> instant 3:
8 >>>>>>>>> instant 4: event1 generated!
9 >>>>>>>>> instant 5:
10 >>>>>>>>> instant 6:
11 >>>>>>>>> instant 7:
12 >>>>>>>>> instant 8: event1 and event2 are generated! both events are ↔
    received!
13 >>>>>>>>> instant 9: exit
14 end result */
```

API FT pour OCaml

- ▶ TER puis projet migration de threads
 - ▶ HironML :
<http://www-apr.lip6.fr/~chaillou/Public/Dev/HironML/>
 - ▶ sémantique différente sur :
 - ▶ l'envoi/réception d'événements
 - ▶ pas de préemptif (sauf thread Caml)
 - ▶ mais bibliothèque spéciale pour les I/O
- ▶ Master STL :
 - ▶ HironML 2: respect de la sémantique des FT

Une implémentation pour OCaml

- ▶ Première implémentation : Une surcouche des threads OCaml
 - ▶ Un scheduler est un jeton
 - ▶ Synchronisation à base de conditions
 - ▶ Détachement de fair thread « facile »
- ▶ Les problèmes
 - ▶ Implémentation simple mais peu efficace
 - ▶ Surcouche des threads OCaml pour l'implémentation des threads détachés

les threads détachés sont surtout utilisés pour des IO bloquantes

Idée : une séparation des tâches

- ▶ Une librairie pour effectuer des actions bloquantes
- ▶ Simuler la concurrence des schedulers
- ▶ Nouvelle donne
 - ▶ La réactivité d'un scheduler n'est plus assurée, mais on peut mesurer les schedulers « trop lents » facilement par une trace
 - ▶ On perd la couche POSIX

C'est l'implémentation actuelle.

FT : Exemple1

```
1  let sched=Fthread.create_scheduler();;
2
3  let rec fth x=
4    Printf.printf "je suis le ft %d\n" x;
5    Fthread.cooperate();
6    fth x
7  ;;
8
9  Fthread.create sched fth 1;
10 Fthread.create sched fth 2;
11 Fthread.start_scheduler sched;
12 Fthread.exit();;
13
14 (* affichage de fth 1 | fth2 ----> *)
15 (* je suis le ft 1
16    je suis le ft 2
17    je suis le ft 1
18    ... *)
```

FT : Compilation exemple 1

sur ari-31-312-01

```
1 $ ocamlpt -c -I ../lib exfthread.ml
2 $ ocamlpt -I ../lib unix.cmxa fthread.cmxa \
3     exfthread.cmx -o exfthread.exe
4 $ ./exfthread.exe
5 je suis le ft 1
6 je suis le ft 2
7 je suis le ft 1
8 je suis le ft 2
9 je suis le ft 1
10 je suis le ft 2
11 ...
```

où ../lib correspond à :

/users/Enseignants/chaillou/install/migrate-0.3/lib

FT : Exemple 2 (1)

```
1  let table1=Fthread.create_scheduler();;
2  let table2=Fthread.create_scheduler();;
3  let finale=Fthread.create_scheduler();;
4
5  let nbr_vainqueur=ref 0;;
6  let finale_commencee=ref false;;
7  let passe=Fthread.create_event();;
8  ...
9  for i=1 to 4 do
10     Fthread.create table1 joueur (i,[1;0;2;4;0;3]);
11     Fthread.create table2 joueur ((i+5),[2;1;0;4;3])
12 done;
13
14 Fthread.create table1 joueur (5,[1;2;8;4;4;3;2;8]);
15 Fthread.create table2 joueur (10,[1;8;3;3;2;8]);
16 Fthread.start_scheduler table1;
17 Fthread.start_scheduler table2;
18 Fthread.exit();;
```

FT : Exemple 2 (2)

```
1 let rec joueur (id,cartes)=
2   match cartes with
3     c :: rc ->
4       if c=0 then (... Fthread.awaitn 1 passe; joueur (id,rc))
5       else if c>7 then (... incr nbr_vainqueur; Fthread.link_to finale;
6                           joueur (id, rc))
7       else (... Fthread.cooperate(); joueur (id,rc))
8 | _ -> (... if !nbr_vainqueur = 2 then (
9         nbr_vainqueur:=0; Fthread.start_scheduler finale)
```

Bibliographie

- ▶ Boussinot, F. – Java Fair Threads – Inria research report, RR-4139, 2001.
- ▶ Boussinot, F. – FairThreads: mixing cooperative and preemptive threads in C – Inria research report, RR-5039, December, 2003.
- ▶ Serrano, M. et Boussinot, F. et Serpette, B. – Scheme Fair Threads – 6th sigplan International Conference on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP), Verona, Italy, Aug, 2004, pp. 203–214.
- ▶ Chailloux, E. et Ravet, V. et Verlaguet, J. — HironDML: Fair Threads Migrations for Objective Caml — Parallel Processing Letters, volume=18-1, 2008.

Autres implantations de threads coopératifs

- ▶ Lwt (Ocsigen)
 - ▶ Vouillon. J. — Lwt: a cooperative thread library - ML Workshop, 2008.
 - ▶ Documentation et téléchargement : <http://ocsigen.org/lwt/>
- ▶ Async (JaneStreet)
 - ▶ à télécharger :
<http://www.janestreet.com/ocaml/async-107.01.tar.gz>

Lwt : LightWeight cooperative Threads for OCaml

- ▶ Bibliothèque de threads coopératifs
 - ▶ pas d'ordonnanceur préemptif
 - ▶ les threads s'exécutent sans interruption jusqu'à l'appel d'une fonction laissant la main (`yield`) ou des entrées/sorties implantées pour cela
- ▶ basée sur un modèle modèle fonctionnel
- ▶ offrant un style de programmation monadique*
- ▶ réalisée initialement pour exprimer la concurrence en Ocsgen
- ▶ mais aussi utilisé dans d'autres projets (Hack, ...)

* : dans les langages fonctionnels à évaluation retardée (non stricts) ou lors d'écriture de programmes concurrents, il n'y a pas de garantie quant à l'ordre d'évaluation des sous-expressions. On peut alors recourir à un style de programmation appelé monadique, qui impose une certaine séquentialité. Ce style repose sur des entités abstraites appelées **monades**, qui forment un outil très général pour combiner des calculs dans un langage typé.

Lwt : LightWeight cooperative Threads for OCaml

Un thread en Lwt est une valeur de type `'a Lwt.t` qui produira un résultat de type `'a`.

A l'initialisation un thread est dans l'état `sleeping` c'est-à-dire que le résultat n'est pas encore connu, ensuite il change d'état vers l'un des 2 états terminaux suivants : `returned` ou `failed`.

```
1 type 'a state = | Return of 'a | Fail of exn | Sleep
```

La fonction suivante inspecte l'état :

```
1 # Lwt.state ;;  
2 - : 'a Lwt.t -> 'a Lwt.state = <fun>+
```

Lwt : lancement et entrées/sorties

- ▶ `Lwt_main.run` : 'a Lwt.t -> 'a

Plusieurs modules : `Lwt`, `Lwt_main`, `Lwt_io`, `Lwt_unix`, ...

- ▶ `Lwt_io.write` :
`Lwt_io.output_channel` -> string -> unit Lwt.t
- ▶ `Lwt_io.read_char` : `Lwt_io.input_channel` -> char Lwt.t
- ▶ `Lwt_io.pipe` :
unit -> `Lwt_io.input_channel` * `Lwt_io.output_channel`
- ▶ `Lwt_io.printl` : string -> unit Lwt.t
- ▶ `Lwt_unix.sleep` : float -> unit Lwt.t

Lwt : style monadique

Une monade est la donnée d'un type paramétré (ici 'a Lwt.t), qui représente des calculs produisant des valeurs de type t, et de deux opérations, return et bind, dont le type éclaire leur rôle :

- ▶ `Lwt.return`: 'a -> 'a Lwt.t
- ▶ `Lwt.bind` : 'a Lwt.t -> ('a -> 'b Lwt.t) -> 'b Lwt.t

La fonction `return` initialise un calcul, et l'opération `bind(e)(f)` va extraire la valeur calculée par `e` et l'envoyer à la fonction `f`.

Pour former une monade, ces deux opérations doivent satisfaire les trois propriétés suivantes :

$$\text{bind}(\text{return}(x)) f = f(x)$$

$$\text{bind}(m)(\text{return}) = m$$

$$\text{bind}(\text{bind}(m)(f))(g) = \text{bind}(m)(\text{fun } x \rightarrow \text{bind}(f(x))(g))$$

Exemples au toplevel

```
1 # #use "topfind";;
2 # #require "lwt.simple-top";;
```

enchaînement :

```
1 # let p () =
2     let t = Lwt_io.read_line Lwt_io.stdin in
3     Lwt.bind t (fun s -> Lwt.return (String.uppercase s));;
4 val p : unit -> string Lwt.t = <fun>
5 # Lwt_main.run (p ());;
6 hohoho
7 - : string = "HOHOHO"
```

lancer en // aec notation >>= pour bind :

```
1 let (>>=) = Lwt.bind ;;
2 let rec f () = print_endline "Ping" ;
3     (Lwt_unix.sleep 4.) >>= f ;;
4 let rec g () = print_endline "Pong" ;
5     (Lwt_unix.sleep 3.) >>= g ;;
6 f () ; g() ;;
7 Ping
8 Pong
9 ...
```

Lwt :synchronisation et multiplexage

- ▶ `Lwt.join` : `unit Lwt.t list -> unit Lwt.t` :
attente qu'une liste de threads aient terminé ; si un des threads échoue, `join` échoue avec la même exception que le premier qui échoue
- ▶ `Lwt.choose` : `'a Lwt.t list -> 'a Lwt.t` qui retourne le premier thread qui termine
- ▶ `Lwt.pick` : `'a Lwt.t list -> 'a Lwt.t`
arrêt des autres threads dès qu'un a terminé

Exemples (2)

multiplexage :

```
1 let l = [ Lwt.return 0 ; Lwt.return 42 ; Lwt.return 56 ] ;;
2 val l : int Lwt.t list = [<abstr>; <abstr>; <abstr>]
3 # Lwt_main.run (Lwt.choose l);;
4 - : int = 0
5 # List.map (Lwt.state) l ;;
6 - : int Lwt.state list = [Lwt.Return 0; Lwt.Return 42; Lwt.Return 56]
```

map :

```
1 let rec map f l = match l with
2 | [] -> Lwt.return []
3 | v :: r ->
4   let t = f v in
5   let rt = map f r in
6   t >>= fun v' ->
7     rt >>= fun l' ->
8     Lwt.return (v' :: l') ;;
9 val map : ('a -> 'b Lwt.t) -> 'a list -> 'b list Lwt.t = <fun>
```

Lwt : résumé

- ▶ bibliothèque riche mais c'est le modèle bind/return qui importe
- ▶ syntaxe concise : `>>=`, ...
- ▶ versions non bloquantes (IO, Unix, ...)
- ▶ attente d'événements spécifiques
`wait`, `wakeup`
- ▶ possibilité de se détacher pour reprendre un mode préemptif
`Lwt_preemptive.detach`