Computational effects

Outline

Programmation Fonctionnelle non pure

Même si OCaml est un langage fonctionnel, nous avons souvent utilisé dans les exemples passés des caracteristiques qui sortent d'une programmation fonctionnelle pure. C'est le cas de :

- exceptions,
- operations d'entrée/sortie,
- références,
- continuations explicites.

Nous allons les étudier dans cette partie

Outline

Typage et domaine de définition

type inféré $\neq$ domaine de définition

- Le typage est une approximation
- Exemples : division entière, tête de liste vide
- provient souvent d'un filtrage non exhaustif

Typage et domaine de définition

type inféré $\neq$ domaine de définition

- Le typage est une approximation
- Exemples : division entière, tête de liste vide
- provient souvent d'un filtrage non exhaustif

Que faire ?

- utiliser une valeur spéciale

```
# asin 2.;;
- : float = nan                    (* not-a-number IEEE standard *)
```

Typage et domaine de définition

type inféré $\neq$ domaine de définition

- Le typage est une approximation
- Exemples : division entière, tête de liste vide
- provient souvent d'un filtrage non exhaustif

Que faire ?

- utiliser une valeur spéciale

```
# asin 2.;;
- : float = nan                    (* not-a-number IEEE standard *)
```

- effectuer une rupture de calcul jusqu'à un récupérateur

```
# 3/0;;
Exception: Division_by_zero.
```

Typage et domaine de définition

type inféré $\neq$ domaine de définition

- Le typage est une approximation
- Exemples : division entière, tête de liste vide
- provient souvent d'un filtrage non exhaustif

Que faire ?

- utiliser une valeur spéciale

```
# asin 2.;;
- : float = nan                    (* not-a-number IEEE standard *)
```

- effectuer une rupture de calcul jusqu'à un récupérateur

```
# 3/0;;
Exception: Division_by_zero.
```

exceptions

Syntaxe

```
exception E
```

ou

```
exception E of t;;
```

- une exception est une valeur de type `exn`
- le type `exn` est un type somme monomorphe *extensible*

```
# exception A_MOI;;
exception A_MOI

# A_MOI;;
- : exn = A_MOI

# exception Depth of int;;
exception Depth of int

# Depth 4;;
- : exn = Depth(4)

# exception Value of 'a ;;        (* monomorphe *)
Error: Unbound type parameter 'a
```

Déclaration et déclenchement d'une exception (1)

Déclenchement d'une exception

```
# raise;;
- : exn -> 'a = <fun>
```

- impossible à écrire (primitive)
- l'expression `raise` *E* n'a pas de contrainte de type

```
# raise A_MOI;;
Uncaught exception: A_MOI

# let x = 18;;
val x : int = 18

# if (x = 0) then raise A_MOI else x;; (* A_MOI used in int position *)
- : int = 18
```

Déclaration et déclenchement d'une exception (2)

Avec un paramètre

```
# exception Echec of string;;
exception Echec of string


# let declenche_echec s = raise (Echec s);;
val declenche_echec : string -> 'a = <fun>

# declenche_echec "argument invalide";;
Exception: Echec "argument invalide".


# failwith;;                          (* ≃ fun x -> raise (Failure x) *)
- : string -> 'a = <fun>
```

Déclaration et déclenchement d'une exception (3)

Filtrage de motifs incomplet : déclanchement "involontaire"....

```
# let tete l = match l with t::q -> t;;
Warning: this pattern-matching is not exhaustive.
Here is an example of a value that is not matched:
[]
val tete : 'a list -> 'a = <fun>

# tete [1;2;3];;
- : int = 1

# tete [];;
Exception: Match_failure ("", 13, 35).
```

Déclaration et déclenchement d'une exception (3)

Filtrage de motifs incomplet : déclanchement "involontaire"....

```
# let tete l = match l with t::q -> t;;
Warning: this pattern-matching is not exhaustive.
Here is an example of a value that is not matched:
[]
val tete : 'a list -> 'a = <fun>

# tete [1;2;3];;
- : int = 1

# tete [];;
Exception: Match_failure ("", 13, 35).
```

.... ou volontaire afin d'interrompre une execution

```
# exception Found_zero;;
exception Found_zero

# let rec mult_aux l= match l with
    h::[] -> h
  | 0::t -> raise Found_zero
  | h::t -> h * mult_aux t;;
Warning: this pattern-matching ...
val mult_aux : int list -> int = <fun>
```

Récupération d'exceptions

Syntaxe :

`try` *expr* `with` *filtrage*

Le type des motifs du filtrage doit être exn.

```
# let mult_list l = match l with
  [] -> 0
| lo -> try mult_aux lo with Found_zero -> 0;;
val mult_list : int list -> int = <fun>

# mult_list [1;2;3;0;5;6];;
- : int = 0
```

Utilisation des exceptions

1. Gestion de situations exceptionnelles où le calcul ne peut pas se poursuivre → rupture du calcul
2. style de programmation (par example, rupture d'une boucle)

Attention au coût du `try` qui doit sauver le context courant
(à placer le plus exterieurement possible surtout s'il y a des boucles)

Exercice

Filtrage d'une liste

- filtrage des éléments d'une liste par un prédicat
- sans recopie inutile

On veut donc une function `filter` qui prend un predicat `p: 'a -> Bool` et une liste `lst` et dont l'implementation

1. Retourne immediatement `lst` si tous les élement de `lst` satisfont `p`
2. Si la liste est `h::t` et `h` satisfait `p`, elle retourne `h::(filter p t)`, et `(filter p t)` si `h` ne satisfait pas `p`

Utiliser les exceptions pour obtenir le comportement voulu

Une solution

```
# exception Identity;;
exception Identity

# let filter p l =
    let apply f x = try f x with Identity -> x in
    let rec fil l = match l with
      | [] -> raise Identity
      | h :: t -> if p h then      (* depuis la dernière application de *)
                    h :: fil t     (* apply tout element satisfait p    *)
                  else
                    apply fil t in (* on reccommence par un apply       *)
   apply fil l;;
val filter : ('a -> bool) -> 'a list -> 'a list = <fun>
```

La fonction `fil` fait une copie de la queue de la liste qui satisfait la propriété, mais cette copie est “garbage collectable” à la fin de l’appel de `filter`.

```
# let l1 = ....                (* liste avec un important memory footprint *)
# let l2 = filter p l1
```

si tout élément de `l1` satisfait `p` alors `l1` et `l2` dénoteront “physiquement" la même liste en mémoire (c’est équivalent à “`let l1 = l2`”). Plus en général `l1` et `l2` partageront en mémoire toute portion terminale de `l1` qui satisfait `p`.

Outline

Traits impératifs

Modèle plus proche de la couche physique

- Un bon condensé de programmation impérative :

```
x := x + 1
```

  - exécution d'une instruction (action) qui modifie l'état mémoire
  - passage à une nouvelle instruction dans le nouvel état mémoire
- modèle des langages Fortan, Pascal, C, Ada, . . .

Entrée/Sorties

- types : `in_channel` ou `out_channel`.

```
# open_in;;
- : string -> in_channel = <fun>

# open_out;;
- : string -> out_channel = <fun>

# close_in ;;
- : in_channel -> unit = <fun>

# close_out ;;
- : out_channel -> unit = <fun>
```

- exception : `End_of_file`
- canaux prédéfinis : `stdin`, `stdout` et `stderr`
- type `open_flag` pour les modes d'ouverture

Principales fonctions de I/O

```
input          :  in_channel → string → int → int → int (ch buf pos lgth
input_line     :  in_channel → string
output         :  out_channel → string → int → int → unit
output_string  :  out_channel → string → unit
read_line      :  unit → string
read_int       :  unit → int
print_string   :  string → unit
print_int      :  int → unit
print_newline  :  unit → unit
```

Example : “c’est plus/c’est moins”

```
# let rec cpcm n =
    let () = print_string "taper un nombre : " in
     let i = read_int ()
     in
       if i = n then
         let () = print_string "BRAVO" in
         let () = print_newline ()
         in print_newline ()
       else
         let () =
           if i < n then
             let () = print_string "C+"
             in print_newline ()
           else
             let () = print_string "C-"
             in print_newline ()
         in cpcm n ;;
val cpcm : int -> unit = <fun>
```

Example : “c’est plus/c’est moins”

```
# let rec cpcm n =
    let () = print_string "taper un nombre : " in
     let i = read_int ()
     in
       if i = n then
         let () = print_string "BRAVO" in
         let () = print_newline ()
         in print_newline ()
       else
         let () =
           if i < n then
             let () = print_string "C+"
             in print_newline ()
           else
             let () = print_string "C-"
             in print_newline ()
         in cpcm n ;;
val cpcm : int -> unit = <fun>

# cpcm 64;;
taper un nombre : 88
C-
taper un nombre : 44
C+
taper un nombre : 64
BRAVO
```

Valeurs physiquement modifiables

- valeurs structurées dont une partie peut être physiquement (en mémoire) modifiée ;
- vecteurs, enregistrements à champs modifiables, chaînes de caractères, références

Valeurs physiquement modifiables

- valeurs structurées dont une partie peut être physiquement (en mémoire) modifiée ;
- vecteurs, enregistrements à champs modifiables, chaînes de caractères, références

Attention

Nécessite de contrôler l'ordre du calcul (mais les I/O aussi)

Valeurs physiquement modifiables

- valeurs structurées dont une partie peut être physiquement (en mémoire) modifiée ;
- vecteurs, enregistrements à champs modifiables, chaînes de caractères, références

Attention

Nécessite de contrôler l'ordre du calcul (mais les I/O aussi)

Ça tombe bien : OCaml est *strict*

Une fonction est *stricte* si lorsqu'elle est appliquée à un argument qui ne termine pas, elle ne termine pas. Un langage est *strict* s'il ne peut définir que des fonctions strictes. Un langage avec "eager evaluation" (les variables ne sont liés qu'à des valeurs) est toujours strict.

Vecteurs

- regroupent un nombre connu d'éléments de même type
- création : `Array.create : int → 'a → 'a array`,
- longueur : `Array.length : 'a array→ int`
- accès : `e1.(e2)`
- modification : `e1.(e2)<-e3`

Vecteurs

- regroupent un nombre connu d'éléments de même type
- création : `Array.create : int → 'a → 'a array`,
- longueur : `Array.length : 'a array→ int`
- accès : `e1.(e2)`
- modification : `e1.(e2)<-e3`

```
# let v = Array.create 4 3.14;;
val v : float array = [|3.14; 3.14; 3.14; 3.14|]

# v.(1);;
- : float = 3.14

# v.(8);;
Exception: Invalid_argument "Array.get".

# v.(0) <- 100.;;
- : unit = ()

# v;;
- : float array = [|100.; 3.14; 3.14; 3.14|]
```

Vecteurs

Fonctions sur les vecteurs

- création matrice :
  - `Array.make_matrix : int → int → 'a → 'a array array`
- itérateurs :
  - `iter : ('a → unit) → 'a array → unit`
  - `map : ('a → 'b) → 'a array → 'b array`
  - `iteri : (int → 'a → unit) → 'a array → unit`
    (argument supplementaire = index de l'element dans l'array)
  - `mapi, fold_left, fold_right, . . .`

Enregistrements à champs mutables

Dans un enregistrement OCaml il est possible de specifier des champs qui sont modifiables.

- indication à la déclaration de type d'un champs est "mutable"
- accès au champ identique `e.f`
- modification similaire aux vecteurs `e1.f<-e2`

```
# type point = {mutable x : float; mutable y : float};;
type point = { mutable x: float; mutable y: float }

# let p = {x=1.; y=1.};;
val p : point = {x=1; y=1}

# p.x <- p.x +. 1.0;;
- : unit = ()

# p;;
- : point = {x=2; y=1}
```

Chaînes de caractères

- les chaînes sont des valeurs modifiables (fonction input)
- accès : `e1.[e2]`
- modification : `e1.[e2 ]<-e3`

```
# let s = "bonjour";;
val s : string = "bonjour"

# s.[3];;
- : char = 'j'

# s.[3]<-'t';;
- : unit = ()

# s;;
- : string = "bontour"
```

(N.B. Since Ocaml 4.02 this is no longer possible. This version introduces a new Bytes module for mutable strings while String becomes for data structures that cannot be modified in place)

Références

On prefere l'utilisation des records mutables, par lesquels ils sont desormais encodés

- type : `'a ref` (≡ `{mutable contents: 'a}`)
- read : `!e` (≡ `e.contents`)
- write : `e1:=e2` (≡ `e1.contents<-e2`)

```
# let incr x = x := !x + 1;;                    (* fonction prédefinie *)
val incr : int ref -> unit = <fun>

# let z = ref 3;;
val z : int ref = {contents=3}                  (* noter le mutable record *)

# incr z;;
- : unit = ()

# z;;
- : int ref = {contents=4}

# (ref 3) := 2;;
- : unit = ()
```

Structures de contrôle

- composition séquentielle : `e1; e2`
  il ne s'agit que de sucre syntaxique pour : `let _ = e1 in e2`
  le type de la séquence est le type de `e2`
  - `e1` doit être de type `unit`
  - Si `e1` n'est pas de type `unit` cela cause un Warning :

```
# 1;();;
Warning S: this expression should have type unit.
- : unit = ()
# ignore;;
- : 'a -> unit = <fun>
# ignore 1;();;
- : unit = ()
```

- conditionnelle : `if c then e` (où `e` est de type `unit`)
- itératives :
  - `while c do e done`
  - `for x=e1 [down]to e2 do e3 done`

La conditionnelle et les boucles sont des expressions de type `unit`

Exemple : somme de 2 vecteurs

```
#let somme a b =
  let al = Array.length a and bl = Array.length b in
  if al <> bl then failwith "somme"
  else if al = 0 then a
    else
      let c = Array.create al a.(0) in
         for i=0 to al-1 do
           c.(i) <- a.(i) + b.(i)
         done;
         c;;
val somme : int array -> int array -> int array = <fun>

# somme [|1; 2; 3|] [| 9; 10; 11|];;
- : int array = [|10; 12; 14|]
```

Style fonctionnel ou impératif ?

Utiliser le bon style selon les structures de données et leurs manipulations (par copie ou en place)

- impératif sur les matrices (en place)
- fonctionnel sur les arbres (par copie)

Mélanger les deux styles

- valeurs fonctionnelles modifiables
- implantation de l'évaluation retardée

Example 1 : Map

En style fonctionnel :

```
# let rec fmap f = function
  | [] -> []
  | h::t -> (f h)::(fmap f t);;
  val fmap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

En style imperatif :

```
 # let imap f l =
    let nl = ref l
    and nr = ref [] in
      while (!nl <> []) do
        nr := ( f (List.hd !nl)) :: (!nr);
        nl := List.tl !nl
      done;
      List.rev !nr;;
 val imap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

Example 1 : Map

En style fonctionnel :

```
# let rec fmap f = function
  | [] -> []
  | h::t -> (f h)::(fmap f t);;
  val fmap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

En style imperatif :

```
 # let imap f l =
    let nl = ref l
    and nr = ref [] in
      while (!nl <> []) do
        nr := ( f (List.hd !nl)) :: (!nr);
        nl := List.tl !nl
      done;
      List.rev !nr;;
 val imap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

Functional wins !

Example 1 : Map

En style fonctionnel :

```
# let rec fmap f = function
  | [] -> []
  | h::t -> (f h)::(fmap f t);;
  val fmap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

En style imperatif :

```
 # let imap f l =
    let nl = ref l
    and nr = ref [] in
      while (!nl <> []) do
        nr := ( f (List.hd !nl)) :: (!nr);
        nl := List.tl !nl
      done;
      List.rev !nr;;
 val imap : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list = <fun>
```

Functional wins !

Exercise : écrire `fmap` en style tail-recursive

Example 2 : Transposée de matrice

En style imperatif :

```
# let itrans m =
    let l = Array.length m in
      for i=0 to l-1 do
         for j=i to l-1 do
           let v = m.(i).(j) in
             m.(i).(j) <- m.(j).(i);
             m.(j).(i) <- v
         done
      done;;
val itrans : 'a array array -> unit = <fun>
```

En style fonctionnel :

```
# let rec ftransl  = function
    | []::_ -> []
    |    l  -> (List.map List.hd l) :: ftransl (List.map List.tl l);;
val ftransl : 'a list list -> 'a list list = <fun>
```

Example 2 : Transposée de matrice

En style imperatif :

```
# let itrans m =
    let l = Array.length m in
      for i=0 to l-1 do
         for j=i to l-1 do
           let v = m.(i).(j) in
             m.(i).(j) <- m.(j).(i);
             m.(j).(i) <- v
         done
      done;;
val itrans : 'a array array -> unit = <fun>
```

En style fonctionnel :

```
# let rec ftransl  = function
    | []::_ -> []
    |    l  -> (List.map List.hd l) :: ftransl (List.map List.tl l);;
val ftransl : 'a list list -> 'a list list = <fun>
```

Imperative wins !

Example 3 : Simulation d'évaluation paresseuse

Le calcul est gélé dans un thunk

```
# type 'a thunk = Exp of (unit -> 'a) | Val of 'a;;
type 'a thunk = Exp of (unit -> 'a) | Val of 'a

# type 'a delayed = {mutable thunk : 'a thunk};;
type 'a delayed = { mutable thunk : 'a thunk; }

# let delay f = { thunk = Exp f };;
val delay : (unit -> 'a) -> 'a delayed = <fun>

# let force e = match e.thunk with
          Val v -> v
      |  Exp f -> let v = f() in (e.thunk <- Val v ; v);;
val force : 'a delayed -> 'a = <fun>
```

Example 3 : Simulation d'évaluation paresseuse

Le calcul est gélé dans un thunk

```
# type 'a thunk = Exp of (unit -> 'a) | Val of 'a;;
type 'a thunk = Exp of (unit -> 'a) | Val of 'a

# type 'a delayed = {mutable thunk : 'a thunk};;
type 'a delayed = { mutable thunk : 'a thunk; }

# let delay f = { thunk = Exp f };;
val delay : (unit -> 'a) -> 'a delayed = <fun>

# let force e = match e.thunk with
          Val v -> v
      |  Exp f -> let v = f() in (e.thunk <- Val v ; v);;
val force : 'a delayed -> 'a = <fun>
```

- Pour retarder l'evaluation de `e` il faut écrire `delay(fun()-> e)` (qui a le type `t delayed` si `e` est de type `t`
- Pour forcer l'évaluation de `e` il faut écrire `force e` (où `e` est de type `t delayed`)
- Toute expression gélée ne sera évaluée qu'une seule fois.

Example d'évaluation paresseuse

```
# let test1 x = (print_string "pong" ;
                 print_newline();
                 x+x) in
  let arg = (print_string "ping";
             print_newline();
             6*8) in
  test1 arg;;
ping
pong
- : int = 96


# let test2 x = (print_string "pong" ;
                 print_newline();
                 force x + force x) in
  let arg = delay ( fun () -> print_string "ping";
                              print_newline();
                              6*8) in
  test2 arg;;
pong
ping
- : int = 96
```

Example d'évaluation paresseuse

```
# let test1 x = (print_string "pong" ;
                 print_newline();
                 x+x) in
  let arg = (print_string "ping";
             print_newline();
             6*8) in
  test1 arg;;
ping
pong
- : int = 96


# let test2 x = (print_string "pong" ;
                 print_newline();
                 force x + force x) in
  let arg = delay ( fun () -> print_string "ping";
                              print_newline();
                              6*8) in
  test2 arg;;
pong
ping
- : int = 96
```

Winning mix

Module Lazy

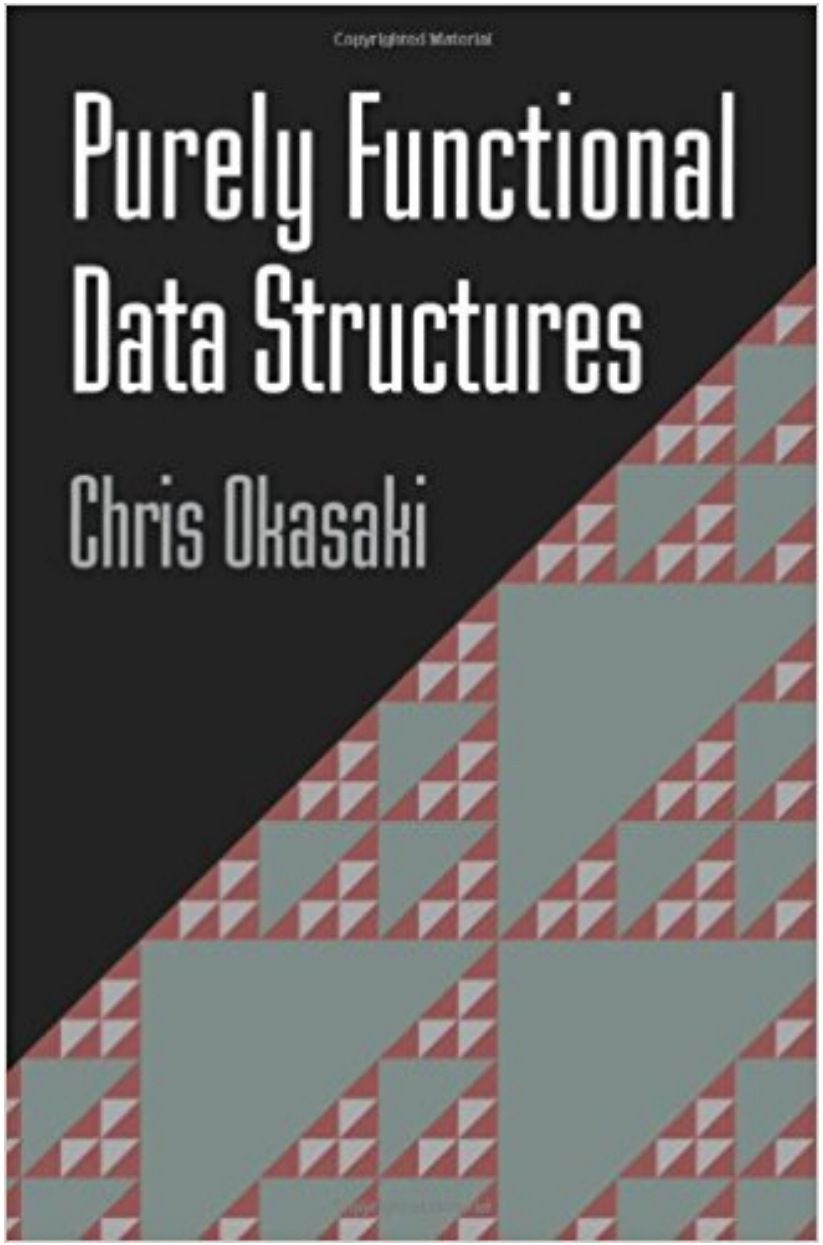
En Ocaml force et delay sont respectivement `Lazy.force` et `lazy` :

```
# let test2 x = ( print_string "pong" ;
                  print_newline();
                  Lazy.force x + Lazy.force x) in
  let arg = lazy( print_string "ping";
                  print_newline();
                  6*8) in
  test2 arg;;
pong
ping
- : int = 96
```

Problèmes

- Beaucoup moins éfficace qu'une implémentation native tel que Haskell
- Il n'a pas tous les avantages d'un langage non-strict (e.g. déforestation)
- Même s'il permet la définition de structures paresseuses, il n'a pas la même flexibilité qu'une implantation native.
  (e.g. `test2: int Lazy.t -> int` ... on ne peut pas lui passer un `int`).

Une bonne lecture



Outline

Opérateur `call/cc`

La fonction `call/cc` est un opérateur de contrôle qui capture la continuation courante et l'applique à son argument.

Opérateur `call/cc`

La fonction `call/cc` est un opérateur de contrôle qui capture la continuation courante et l'applique à son argument.
Obscur ?

Opérateur `call/cc`

La fonction `call/cc` est un opérateur de contrôle qui capture la continuation courante et l'applique à son argument.
Obscur ?
Nous allons l'expliquer en détail lors des transformations de programmes.
Pour l'instant il suffit de savoir qu'elle est implantée en OCaml mais comme dit son auteur (Xavier Leroy) :

> *This library implements the call/cc (call-with-current-continuation) control operator for Objective Caml. This is a very naive implementation : it works only in bytecode, and performance is terrible (call/cc copies the whole stack). It is intended for educational and experimental purposes. Use in production code is not advised.*