

Modèles de Programmation



Emmanuel Chailoux

PLAN

- ▶ Modules
 - ▶ modules simples
 - ▶ modules paramétrés
- ▶ Compilation séparée
- ▶ Ouverture et inclusion d'un module

Programmation modulaire

- ▶ découpage en *unités logiques* plus petites;

But: réalisation d'un module séparément des autres modules

Mise en œuvre: un module possède une *interface*, la vérification des interface est effectuée à l'assemblage des différents modules.

Intérêts:

- ▶ découpage logique;
- ▶ abstraction des données (spécification et réalisation);
- ▶ indépendance de l'implantation;
- ▶ réutilisation.

Compilation séparée

- ▶ découpage en *unités de compilation*, compilables séparément

programmation modulaire \neq compilation séparée

les 2 approches sont nécessaires:

- ▶ Pour cela la spécification d'un module doit être vérifiable par un compilateur :
 - ▶ on se limite à la vérification de types
 - ▶ l'interface sera spécification de modules
 - ▶ et contiendra l'information de typage et de compilation pour les autres modules

Langage de modules d'OCaml

2 parties:

- ▶ *structure* : pour la partie réalisation/implantation
- ▶ *signature* : pour la partie spécification/interface

Le langage de modules est indépendant du langage de base.

Parallèle entre: le langage de base (*valeur* : *type*)
et le langage de module (*structure* : *signature*)!!!

Modules simples

Implantation: d'un module est une suite de définitions

- ▶ de valeurs y compris fonctionnelles
- ▶ de types
- ▶ d'exceptions
- ▶ de sous-modules

Spécification: d'un module est une suite de déclarations et de spécifications de types.

Notation: une signature sera écrite en MAJUSCULE et une structure en Minuscule dont l'initiale est en majuscule.

Implantation d'un module Queue

```
1  module Queue =
2
3  struct
4
5    type 'a t = 'a list ref
6
7    let create() = ref []
8
9    let enq x q = q := !q@[x]
10
11   let deq q =
12     match !q with
13     | [] -> failwith "Empty"
14     | h::r -> q:=r; h
15
16   let length q = List.length !q
17
18 end ;;
```

Synthèse d'une signature

L'exemple précédent donne la signature suivante :

```
1  module Queue :
2  sig
3  type 'a t = 'a list ref
4  val create : unit -> 'a list ref
5  val enq : 'a -> 'a list ref -> unit
6  val deq : 'a list ref -> 'a
7  val length : 'a list ref -> int
8  end
```

Modules: déclarations encapsulées

modules simples (structures)



ensemble de définitions

leurs types (signatures)



ensemble de spécifications de types

```
1 module Example =                               (* signature inferee *)
2 struct                                         sig
3   type t = int                                 type t = int
4   module M =                                  module M :
5     struct                                    sig
6       let succ x = x+1                        val succ : int -> int
7     end                                        end
8   let two = M.succ(1)                          val two : int
9 end                                           end
```

Accès aux éléments d'un module (1)

L'accès à un élément d'un module se fait par la notation "point".

```
1 # Queue.enq;;  
2 - : 'a -> 'a list ref -> unit = <fun>
```

Y compris pour les champs d'enregistrements :

```
1 # module Toto = struct type t = {x:int; y:int} end;;  
2 module Toto : sig type t = { x: int; y: int } end  
3 # let u = {Toto.x=3; Toto.y=18};;  
4 val u : Toto.t = {Toto.x=3; Toto.y=18}
```

Ce qui peut être simplifié par l'**ouverture** du module :

```
1 # open Queue;  
2 # let q = Queue.create() in ( enq "Bob" q; q );;  
3 - : string list ref = {contents = ["Bob"]}
```

Accès aux éléments d'un module (2)

```
1 # Example.two ;;
2 - : int = 2
3
4 # Example.M.succ ;;
5 - : int -> int = <fun>
6
7 # Example.M.succ (Example.two) ;;
8 - : int = 3
```

Déclaration d'une signature

```
1 module type QUEUE =  
2   sig  
3     type 'a t = 'a list ref  
4     val create : unit -> 'a list ref  
5     val enq : 'a -> 'a list ref -> unit  
6     val deq : 'a list ref -> 'a  
7     val length : 'a list ref -> int  
8   end
```

Quand une signature est associée à une structure il y a vérification de la cohérence :

- ▶ les déclarations de la signature existent dans la structure
- ▶ et satisfont les spécifications de la signature.

```
1 Module Queue : QUEUE = struct ... end;;
```

signatures

La signature ABS n'exporte pas :

- ▶ la représentation du tye t,
- ▶ le module interne M.

```
1 module Example =                               module type ABS =
2 struct                                         sig
3   type t = int                                 type t
4   module M =
5     struct ... end
6   let two = M.succ(1)                          val two : t
7 end                                           end
```

Restriction par une signature

Le nouveau module `Abs` est une *vue restreinte* de `Example`: il montre les composants de l'interface `ABS`.

```
1 # module Abs = (Example : ABS);;
2
3 # Abs.two;;      (* t devient abstrait *)
4 - : Abs.t = <abstr>
5
6 # Abs.M.succ;;  (* M est caché *)
7 Unbound value Abs.M.succ
```

Syntaxe du langage de modules (1)

► valeur : module Nom [: SIGNATURE] =

```
1      struct
2          val ...
3          type ...
4          exception ...
5          module ...
6      end
```

► type : module type Nom =
 sig
 ...
 end

Syntaxe du langage de modules (2)

- ▶ abstraction (valeur fonctionnelle)

```
1   module Nom =  
2     functor ( Module : SIGNATURE ) ->  
3       struct ...  
4         end
```

- ▶ application

```
1   module Nom = Module(Structure)
```

Syntaxe du langage de modules (3)

- ▶ déclaration de modules récursifs

```
1 module rec Nom [ : SIGNATURE ] =  
2  
3   struct ... end  
4  
5 and Nom [ : SIGNATURE ] =  
6  
7   struct ... end  
8  
9   ...
```

Attention, limitation sur les dépendances croisées de calcul.

Communication entre modules

Utilisation: de déclarations d'autres modules

celle-ci peut être effectuée de 2 manières.

- ▶ **communication implicite:** en utilisant la notation “point” et en tenant compte de l'environnement global
- ▶ **communication explicite:** en utilisant des foncteurs (modules paramétrés par d'autres modules).

Communication implicite

```
1 module Element = struct type t = int end;;
```

```
1 module QueueV2 =  
2   struct  
3     type element = Element.t  
4  
5     type queue = element list ref  
6  
7     exception Empty  
8  
9     let create() = ((ref []) : queue)  
10  
11    let enq x (q:queue) = q:= !q@[x]  
12  
13    let deq (q:queue) =  
14      match !q with  
15        [] -> raise Empty  
16        | h::r -> q:=r; h  
17  end;;
```

Signature

```
1 # module type QUEUEV2 =
2   sig
3     type element = Element.t
4     and queue = element list ref
5     exception Empty
6     val create : unit -> queue
7     val enq : element -> queue -> unit
8     val deq : queue -> element
9   end;;
10
11 # module QueueV3 = (QueueV2 : QUEUEV2);;
12 module QueueV3 : QUEUEV2
13 # let q = QueueV3.create() in (QueueV3.enq 18 q; q);;
14 - : QueueV3.queue = {contents = [18]}
```

Paramétrisation et liens

modules paramétrés (foncteurs)



fonctions sur les modules

liens des modules



foncteurs appliqués

```
1 module FunEx = FunEx (↔  
  Example)  
2 functor (X : ABS) ->  
3   struct val p = X.two .. end
```

Communication explicite

```
1 module type ELEMENT = sig type t end;;
```

```
1 module QueueFunc = functor (Element : ELEMENT) ->
2   struct
3     type element = Element.t
4
5     type queue = element list ref
6
7     exception Empty
8
9     let create() = ((ref []) : queue)
10
11    let enq x (q:queue) = q:= !q@[x]
12
13    let deq (q:queue) =
14      match !q with
15      | [] -> raise Empty
16      | h::r -> q:=r; h
17  end;;
```

Application d'un foncteur

```
1 # module QueueV4 = QueueFunc(Element);;
2 module QueueV4 : sig ... end
3 # let q = QueueV4.create() in ( QueueV4.enq 44 q; q);;
4 - : QueueV4.queue = {contents = [44]}
```

```
1 # module NouvelElement =
2   struct   type t = float end;;
3 module NouvelElement : sig type t = float end
4 # module QueueV5 = QueueFunc(NouvelElement);;
5 module QueueV5 : sig ... end
6 # let q = QueueV5.create() in ( QueueV5.enq 12.2 q; q);;
7 - : QueueV5.queue = {contents = [12.2]}
```

Abstraction de types

Déclarations de types:

- ▶ concrètes (définition de type visible)
- ▶ abstraites (représentation du type masquée)

Intérêts de l'abstraction de types:

- ▶ indépendance de l'implantation
- ▶ limitation du polymorphisme

Exemple d'abstraction de types

2 Définitions pour les chaînes:

```
1 module type CHAINEGEN =
2   sig type t val create : string -> t end;;
3 module Chaine : CHAINEGEN = struct
4   type t = string
5   let create (s:string) = ((String.copy s):t) end;;
6 module Maj : CHAINEGEN = struct
7   type t = string
8   let create (s:string) = ((String.uppercase s):t) end;;
```

```
1 # let c1 = Chaine.create "salut";;
2 val c1 : Chaine.t = <abstr>
3 # let m1 = Maj.create("salut");;
4 val m1 : Maj.t = <abstr>
```

Suite de l'exemple

```
1 # c1 = m1;;
2 This expression has type Maj.t
3 but is here used with type Chaine.t
```

```
1 # module QueueChaine = QueueFunc(Chaine);;
2 # module QueueMaj = QueueFunc(Maj);;
```

```
1 # let q = QueueChaine.create() in
2   ( QueueChaine.enq (Chaine.create "Alicia") q; q );;
3 - : QueueChaine.queue = {contents = [<abstr>]}
4 # QueueChaine.enq (Maj.create "Bob") q;;
5 This expression has type Maj.t but is here used with type
6   QueueChaine.element = Chaine.t
```

Plus d'abstraction

On définit une signature qui abstrait le type element :

```
1 module type NQUEUE = sig
2   type element
3   type queue
4   exception Empty
5   val create : unit -> queue
6   val enq : element -> queue -> unit
7   val deq : queue -> element
8 end
```

Perte du partage

```
1 # module QueueFuncAbs =
2   ( QueueFunc :
3     functor (E : ELEMENT) -> (NQUEUE));;
4   module QueueFuncAbs : functor (E : ELEMENT) -> NQUEUE
5   # module QueueV8 = QueueFuncAbs(Element);;
6   ...
7   # let q = QueueV8.create();;
8   val q : QueueV8.queue = <abstr>
9   # QueueV8.enq 2 q;;
10  This expression has type int but is here used with type
11    QueueV8.element = QueueFuncAbs(Element).element
```

Le compilateur a une représentation abstraite du type element.

Types manifestes

Contraintes de partage: entre 2 types abstraits provenant de 2 modules

C'est le cas entre `QueueV8.element` et `Element.t`.

Pour cela on indiquera une contrainte de partage dans une signature :

signature **with type** $\tau_1 = \tau_2$

```
1 module QueueFuncAbs =
2   ( QueueFunc :
3     functor (E : ELEMENT) ->
4       (NQUEUE with type element = E.t));;
```

Exemple

```
1 # module QueueV9 = QueueFuncAbs(Chaine) ;;
2 module QueueV9 : ...
3 # let bob = Chaine.create "Bob" ;;
4 val bob : Chaine.t = <abstr>
5 # let q = QueueV9.create () ;;
6 val q : QueueV9.queue = <abstr>
7 # QueueV9.enq bob q ;;
8 - : unit = ()
```

Compilation séparée (1)

Unité de compilation: 2 *fichiers*

- ▶ 1 fichier d'interface (.mli) + 1 fichier d'implantation (.ml)

Sans précision:

```
1 module Nom = (  
2     struct  
3         contenu du fichier nom.ml  
4     end :  
5     sig  
6         contenu du fichier nom.mli  
7     end)
```

Compilation séparée (2)

correspondance: nom de module et nom de fichier

- ▶ module `Nom` correspond aux fichiers `nom.ml` et `nom.mli`
- ▶ environnement de typage : répertoires d'accès aux fichiers

Compilation séparée (3)

fichier interface: : queue.mli

```
1 type 'a t
2 exception Empty
3 val create : unit -> 'a t
4 val add : 'a -> 'a t -> unit
5 val push : 'a -> 'a t -> unit
6 val take : 'a t -> 'a
7 val pop : 'a t -> 'a
8 val peek : 'a t -> 'a
9 val top : 'a t -> 'a
10 val clear : 'a t -> unit
11 val copy : 'a t -> 'a t
12 val is_empty : 'a t -> bool
13 val length : 'a t -> int
14 val iter : ('a -> unit) -> 'a t -> unit
15 val fold : ('b -> 'a -> 'b) -> 'b -> 'a t -> 'b
16 val transfer : 'a t -> 'a t -> unit
```

Compilation séparée (4)

fichier implantation: : queue.ml

```
1  exception Empty
2
3  type 'a cell = { content: 'a; mutable next: 'a cell }
4  type 'a t = { mutable length: int; mutable tail: 'a cell }
5  let create () = { length = 0; tail = Obj.magic None }
6  let clear q = q.length <- 0; q.tail <- Obj.magic None
7  let add x q =
8      q.length <- q.length + 1;
9      if q.length = 1 then
10         let rec cell = { content = x; next = cell } in
11         q.tail <- cell
12     else
13         let tail = q.tail in
14         let head = tail.next in
15         let cell = { content = x; next = head } in
16         tail.next <- cell; q.tail <- cell
17
18  let push = add
19
20  let peek q =
21      if q.length = 0 then
22         raise Empty
23     !
```

Compilation séparée (5)

Compilation:

```
% ocamlc -c queue.mli  
% ocamlc -c queue.ml
```

Fichiers objet:

```
% ls queue.cm?  
queue.cmi          queue.cmo
```

Compilation séparée (6)

utilisation:

```
1 let q = Queue.create();;
2 let r = Queue.create();;
3
4 let main() =
5     Queue.add 3 q ; Queue.add 4 q ;
6     Queue.add "Ping" r; Queue.add "Pong" r;
7     print_int (Queue.take q); print_int (Queue.take q); ↵
8     print_string (Queue.take r); print_string (Queue.take r)↵
9     ; print_newline();;
10 main();;
```

compilation:

```
% ocamlc queue.cmo main.ml -o main.exe
```

Exécution:

```
% ./main.exe
```

```
34
```

```
PingPong
```

Ouverture d'un module

- ▶ global

Syntaxe: `open mod-name;;`

Racourci: de la notation "point"

Exemple:

```
1 # open QueueV9 ;;
2 # let q = create ();;
3 val q : QueueV9.queue = <abstr>
```

- ▶ local

Syntaxe: `let open mod-name in expr`

Inclusion d'un module

Syntaxe: `include mod-expr;;`

réexportation dans la structure courante des définitions de
mod-expr

Exemple:

```
1 module QueueV2B = struct
2   include QueueV2
3   let length (q : queue) = List.length !q
4 end;;
5
6 module QueueV2B :
7   sig
8     type element = Element.t
9     type queue = element list ref
10    exception Empty
11    val create : unit -> queue
12    val enq : element -> queue -> unit
13    val deq : queue -> element
14    val length : queue -> int
15  end
```

Différence entre open et include

- ▶ open crée des raccourcis des chemins des définitions d'une structure sans rien définir localement;
- ▶ include ajoute les définitions du module inclus dans les définitions du module courant

```
1 module QueueV2C = struct
2   open QueueV2
3   let create = create
4   let enq = enq
5   let deq = deq
6   let length (q : queue) = List.length !q
7 end;;
8
9 module QueueV2C :
10  sig
11    val create : unit -> QueueV2.queue
12    val enq : QueueV2.element -> QueueV2.queue -> unit
13    val deq : QueueV2.queue -> QueueV2.element
14    val length : QueueV2.queue -> int
15  end
```

Sous-modules

Définitions: de modules dans un module

Intérêts: organisation hiérarchique, visibilité des champs des modules extérieurs, nécessaire avec la compilation séparée

Exemple:

```
1 module M1 =  
2   struct type t1  
3     let f = ...  
4     module type SMT1 = sig type t2 = (t1,t1) ... end  
5     module SM2 : SMT1 = struct let g x = f(f x) ... end  
6   end;;
```

Accès:

```
1 M1.SM2.g;;
```

Modules locaux

Syntaxe: `let module mod-name = mod-expr in expr`

Intérêt: création dynamique (à l'exécution) de modules

Exemple: appliquer un foncteur sur une *structure* dont l'un des champs est un paramètre d'une fonction.

```
1 # let g (l : string list) =
2   let module Toto =
3     Set.Make(struct type t = string
4       let compare a b = if a.[0] < b.[0] then -1
5         else if a.[0] > b.[0] then 1 else 0 end)
6   in Toto.min_elt
7     (List.fold_right Toto.add l Toto.empty);;
8 val g : string list -> string = <fun>
```

Foncteurs de foncteurs

Plusieurs paramètres: à un module paramétré

Intérêts: paramétrage d'un module application par plusieurs modules, création de squelettes, y compris avec abstraction de types et contraintes de partage.

Exemple: jeu à 2 joueurs

```
1 module Jeu =
2   functor (Rep : REPRESENTATION) ->
3   functor (Aff : AFFICHAGE) ->
4   functor Alphabet : ALPHABETA -> struct ... end;;
5 module Main = Jeu (Stone_rep) (Stone_graph (Stone_rep))
6                   (Alphabet (Stone_rep)) ;;
7 Main.main() ;;
```