Cours de Programmation Avancée

L3 ENS Cachan

Giuseppe Castagna

CNRS

Outline of the course

- Module systems

  - 1. Introduction to modularity. - 2. ML simple modules. - 3. Functors. - 4. Advanced example.

- Classes vs. Modules

  - 5. Modularity in OOP. - 6. Mixin Composition - 7. Multiple dispatch - 8. OCaml Classes - 9. Haskell's Typeclasses - 10. Generics

- Computational effects.

  - 11. Exceptions. - 12. Imperative features. - 13. Continuations

- Program transformations.

  - 14. The fuss about purity - 15. A Refresher Course on Operational Semantics - 16. Closure conversion - 17. Defunctionalization - 18. Exception passing style - 19. State passing style - 20. Continuations, generators, and coroutines - 21. Continuation passing style

- Monadic Programming

  - 22. Invent your first monad - 23. More examples of monads - 24. Monads and their laws - 25. Program transformations and monads - 26. Monads as a general programming technique - 27. Monads and ML Functors

- Concurrency and Parallelism

  - 28. Concurrency - 29. Preemptive multi-threading - 30. Mutexes, Conditional Variables, Monitors - 31. Doing without mutual exclusion - 32. Cooperative multi-threading - 33. Channeled communication - 34. Software Transactional Memory

- Subtyping

  - 35. Simple Types - 36. Extensions: products, records, references - 37. A simple model of objects - 38. Parametric Types - 39. Recursive Types - 40. Semantic Subtyping - 41. Covariance and contravariance

- XML Programming

Le langage de référence pour le cours est OCaml, mais nous utiliserons aussi des extraits de code Haskell, Scala, Perl 6, C#, Java, Erlang, Pascal, Python, Basic, CDuce, Xslt, ... L'idée étant de mettre l'accent sur les concepts de la programmation plus que sur la programmation dans un langage particulier.

La note finale de l'examen est calculée de la manière suivante.

1/2 (Examen) + 1/3 max(Examen, Projet) + 1/6 Projet

Modules

Outline

1. Introduction à la Modularité
2. Modules (simples) en ML
3. Foncteurs
4. Un exemple un peu plus compliqué

Outline

1. Introduction à la Modularité
2. Modules (simples) en ML
3. Foncteurs
4. Un exemple un peu plus compliqué

Les modules sont partout !

- Toute construction complexe :
  - bâtiment,
  - voiture,
  - avion,
  - compilateur,...

  suppose une *modularisation*.
- Les raisons technologiques sont évidentes (organisation du travail, fiabilité,...)
- ... et les retombées économiques immédiates.

Généralités sur les modules

- On peut construire, tester, analyser… un module de façon *indépendante* d'autres modules.
- Un module a une *interface* qui décrit ses modalités d'interaction.
- Éventuellement, une *spécification* qui décrit son comportement.
- Une *implémentation*.

Un changement d'implémentation devrait être *"transparent"* à l'utilisateur (à un certain niveau d'abstraction !).

Aspects spécifiques des modules en programmation

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

Programmation à petite et grande échelle

- A petite échelle (Wirth 1975) :

  Programme = Algorithme + Structures de Données

- A grande échelle :

  Module = Programme + Interface + (Spécification)

Un problème ancien…

Le problème dans le contexte de la programmation a été identifié depuis longtemps. Par exemple :

> *DeRemer, Kron. Programming in the large versus programming in the small. IEEE Trans. on Soft. Eng., 1976.*
>
> *Parnas. On the criteria to be used in decomposing systems into modules. CACM, 1972.*

Un problème toujours d'actualité. . .

- Bibliothèques,
- "Modules" en C.
- Packages en Ada et Java.
- Modules en Modula et ML.
- Interfaces 'Web services'.

Un problème plus difficile : l'interopérabilité

Programmation modulaire On cherche à faire interagir des modules qui appartiennent au *même langage*.

Interopérabilité On cherche à faire interagir des modules de langages qui *diffèrent* dans :

- la représentation des données,
- le traitement des exceptions,
- l'organisation de la mémoire,
- ...

Petite histoire de la modularité et de l'abstraction

1. Développement par *raffinement* des *procédures* et des *données* (Dijkstra-Wirth, 70's).
2. Encapsulation d'algorithmes et de données (types de données *abstraits*).
3. *Modules* à la ML.

Raffinement procédurale

On raffine l'algorithme sans changer les structures de données. Un exemple :

But Imprimer les premiers 1000 nombres premiers.

Raffinement 1

1. Créer tableau 1000 nombres.
2. Remplir le tableau avec les premiers 1000 nombres premiers.
3. Imprimer le tableau.

Raffinement 2

1. *integer array p [1 :1000]*
2. *for i=1 to 1000 do p[k] := kth prime number*
3. ...

Remarques

- Il n'y a pas de garantie que le raffinement *simplifie* le problème.
- Dans notre cas, il faut une *vraie idée* pour arriver à une solution (crible d'Erathostène, notions sur la distribution des nombres premiers,...)
- Dans cet exemple, la notion de raffinement est 'informelle'. A partir d'un certain niveau de formalisation, le langage devrait *vérifier la cohérence* du raffinement.

Raffinement des données

En général pendant le développement on a besoin de raffiner les structures de données aussi. Exemple :

- Un programme qui gère les comptes bancaires.
- On peut créer un compte, déposer, retirer de l'argent, imprimer numéro et solde.
- Ces procédures supposent une représentation d'un compte comme une structure de donnée.
- Si maintenant on veut imprimer l'historique des transactions on aura besoin de modifier la représentation du compte.

Encapsulation d'algorithmes

Un premier example de structuration modulaire est venu avec les *procedures* en Pascal :

$$procedure\ exp\ (x : real, n : int) = \langle body \rangle$$

Interface

$exp : real * int \longrightarrow real$.

Implémentation

$\langle body \rangle$.

Utilisation (client)

$y := exp(3.4, 7)$.

Un changement du corps de la procédure est transparent au client.

Encapsulation de données et d'algorithmes

Exemple : queue de priorité.

Interface

type *pq* **with**

$$\begin{array}{ll} \textit{empty} & : \textit{pq} \\ \textit{insert} & : \textit{int} * \textit{pq} \rightarrow \textit{pq} \\ \textit{deletemax} & : \textit{pq} \rightarrow \textit{int} * \textit{pq} \end{array}$$

Implémentation

$$\begin{array}{ll} \textit{pq} & = \textit{List}(\textit{int}) \\ \textit{empty} & = [\,] \\ \textit{insert}(n, \ell) & = \textit{match}\ \ell \cdots \\ \textit{deletemax}(\ell) & = \textit{match}\ \ell \cdots \end{array}$$

Utilisation (client) Une procédure pour ordonner un tableau.

$$
\begin{array}{l}
\text{procedure } \mathit{sort}\ (n : \mathit{int}, A : \mathit{array}[1..n] \mathit{of\ int}) \\
\mathit{local\ s} : \mathit{pq}; \\
s := \mathit{empty}; \\
\mathit{for\ i} = 1\ \mathit{to\ n\ do\ s} := \mathit{insert}(A[i], s) \\
\mathit{for\ i} = 1\ \mathit{to\ n\ do\ } A[i] := \mathit{deletemax}(s)
\end{array}
$$

- La procédure est dans la portée lexicale de la déclaration de *pq*.
- L'interface est *visible* mais l'implémentation est *transparente*.
- Un changement de l'implémentation ne demande pas de modification du client.

Outline

1. Introduction à la Modularité
2. Modules (simples) en ML
3. Foncteurs
4. Un exemple un peu plus compliqué

Les modules en ML

Nous allons étudier le système de modules de ML.

- De loin le système de modules le plus sophistiqué et le plus étudié.
- La conception du système de modules est assez *indépendant* du langage de programmation. Le système de modules de ML a été appliqué aussi à d'autres langages.
- Une généralisation du concept de type de données abstrait.

Théorie (des types) encore en développement : compliquée et pas stable. Les détails présentés ici sont basés sur OCAML et en particulier sur le Chapitre 14 de `http://www.pps.jussieu.fr/Livres/ora/DA-OCAML`

Terminologie ML

- Structure (= Implémentation).
- SIGNATURE (= Interface).

$$\textit{Structure} : \textit{SIGNATURE} \quad \sim \quad \textit{Valeur} : \textit{TYPE}$$

Remarques

1. En ML on sépare *valeurs* et *types*. Or les structures contiennent des *types* et des *valeurs*, on ne peut donc pas les voir comme des valeurs.
2. Une *structure* (une *signature*) n'est pas une valeur (un type) de première classe.

Modules (simples)

Structure

Une suite de définitions de :

- valeurs (y compris fonctions)
- types
- exceptions
- sous-modules

SIGNATURE

Une suite déclarations de types, d'exceptions et de noms avec leur type/signature.

Convention

On utilise, `Machin` pour une structure et `MACHIN` pour une signature.

Exemple : Structure d’un module Queue

```
module Queue =
struct
  type 'a queue = 'a list ref
  let create() = ref []
  let enq x q = q:= !q@[x]          (* horrible si @ n'est pas lazy *)
  let deq q =
    match !q with
         [] -> failwith "Empty"
       | h::r -> q:=r; h
  let length q = List.length !q          (* utilisation module List *)
end ;;
```

La signature associée

La système synthétise automatiquement la signature suivante.

```
module Queue :
sig
  type 'a t = 'a list ref
  val create : unit -> 'a list ref
  val enq : 'a -> 'a list ref -> unit
  val deq : 'a list ref -> 'a
  val length : 'a list ref -> int
end
```

Dans la signature générée le type de données qui représente la queue est *visible* ainsi que l'ensemble des opérations définies avec les type le plus général.

Un autre exemple avec structures imbriquées

Valeur (structure)

```
module Example =
struct
  type t = int
  module M =
  struct
    let succ x = x+1
  end
  let two = M. succ(1);;
end;;
```

Type (signature)

```
module Example :
sig
  type t = int
  module M :
  sig
    val succ : int -> int
  end
  val two : int
end;;
```

Accès aux éléments d'un module par identificateur qualifié

- La notation 'point' :

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

- S'applique aussi aux champs d'enregistrements :

```
# module Toto = struct type t = {x:int; y:int} end;;
module Toto : sig type t = { x: int; y: int } end

# let u = {Toto.x=3; Toto.y=18};;
val u : Toto.t = {Toto.x=3; Toto.y=18}
```

Ouverture d’un module

- On peut ouvrir un module et donc accéder toutes les déclarations de la structure associée :

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

# Example.two;;
-: int = 2

# Example.M.succ;;
-: int -> int = <fun>

# Example.M.succ (Example.two);;
-: int = 3

(* une structure n’est pas une valeur *)
# Example.M;;
Error: Unbound constructor Example.M
```

L’ouverture d’un module peut cacher des déclarations locales.

Déclaration d’une signature

- On peut déclarer une *signature* comme suit :

```
module type QUEUE =
 sig
 type 'a queue = 'a list ref
 val create : unit -> 'a list ref
 val enq : 'a -> 'a list ref -> unit
 val deq : 'a list ref -> 'a
 val length : 'a list ref -> int
end;;
```

- En associant une structure à une signature le système vérifie que tous les éléments de la signature existent dans la structure. Par exemple :

```
module Queue : QUEUE = struct...end;;
```

- La structure peut contenir un élément avec un type *plus général* que celui spécifié dans la signature.
- Elle peut aussi contenir *d'avantage d'éléments* que ceux décrits dans la signature et dans un ordre différent.

```
module Example = struct
  type t = int
  module M = struct
   let succ x = x+1
  end
  let two = M.succ(1)
end ;;

module type ABS = sig
  type t
  val two : t
end;;
```

- Il s'agit d'un exemple de *sous-typage* (sur le signatures). On discutera ce concept plus tard dans le cours.

- En associant une structure à une signature on ne peut utiliser que les éléments déclarés dans la signature. Ici un type *t* dont on ignore la représentation et une valeur *two* de ce type.
- Le module Abs est une restriction du module Example.

```
# module Abs = (Example: ABS);; (* Nous cachon M    *)
module Abs : ABS

# Abs.two;;                     (* M est utilisable *)
- Abs.t = <abstr>               (* t est abstrait   *)

# Abs.M.succ(1)                 (* M est invisible  *)
Unbound value Abs.M.succ
```

Types concrets et types abstraits

On définit une signature LISTE.

```
# module type LISTE = sig
    type 'a t
    val creer : unit -> 'a t
    val inserer : 'a -> 'a t -> 'a t
  end;;
```

dont on propose deux *implémentations* :

```
# module Liste1 = struct
    type 'a t = 'a list
    let creer () = []
    let inserer x l = x::l
  end;;

module Liste1 : sig
  type 'a t = 'a list
  val creer : unit -> 'a list
  val inserer : 'a -> 'a list -> 'a list
end
```

```
# module Liste2 = struct
    type 'a t = 'a list
    let creer () = []
    let inserer x l = l (*bad*)
  end;;

module Liste2 : sig
  type 'a t = 'a list
  val creer : unit -> 'a list
  val inserer : 'a -> 'b -> 'b
end
```

La structure concrète des types est *visible* et on peut écrire :

```
# Liste1.creer();;
- : 'a list = []

# Liste2.inserer 3 (Liste1.creer ()) ;;
- : 'a list = []
```

Maintenant on *masque* Liste1 et Liste2 avec la signature LISTE :

```
# module Liste1 = (Liste1: LISTE);;
module Liste1 : LISTE

# module Liste2 = (Liste2: LISTE);;
module Liste2 : LISTE
```

Les types deviennent *abstraits* et donc *incomparables*.

```
# Liste1.creer();;
- : '_a Liste1.t = <abstr>

#  Liste2.inserer;;
- : 'a -> 'a Liste2.t -> 'a Liste2.t = <fun>

#  Liste2.inserer 3 (Liste1.creer ()) ;;
This expression has type 'a Liste1.t
but is here used with type int Liste2.t
```

Variables de types faibles

Une variable de type faible `'_a` est une variable qui ne peut pas être généralisée. Elle est instanciée par un type qui n'a pas encore pu être déterminé.

Elle apparait lorsque le compilateur Caml essaie de compiler une fonction ou une valeur qui est monomorphe, mais pour laquelle certains types n'ont pu être complètement inferés.
Elles disparait grâce au mécanisme d'inférence de types dès que suffisamment d'informations auront pu être rassemblées.

```
# let id x = x;;
val id : 'a -> 'a = <fun>

# let id2 = id id;;
val id2 : '_a -> '_a = <fun>

# let a = (id 1 , id "1");;
val a : int * string = (1, "1")

# let b = (id2 1 , id2 "1");;
Error: This expression has type string but an
       expression was expected of type int
```

Le problème vient de l'utilisation des références mutables :

```
# let r = ref []
val r : 'a list ref
# r := [3]; r
- : 'a list ref
# let l = List.map (function true -> 1 | false -> 2) !r
val l : int list = Segmentation fault
```

Solution in ML (Wright'95) : seulement les *valeurs* peuvent être polymorphes (i.e., pas les applications ni les créations de celles de mémoire).

```
# let r = ref [] ;;
val r : '_a list ref
# r := [3]; r ;;
- : int list ref
# let l = List.map (function true -> 1 | false -> 2) !r;;
Error: This expression has type int list
       but an expression was expected of type bool list
```

Révenons à l'example Queue

Une manière plus raisonnable de *déclarer la signature* de Queue

```
module type QUEUE = sig
 type 'a queue
 exception Empty
 val create : unit -> 'a queue
 val enq : 'a -> 'a queue -> unit
 val deq : 'a queue -> 'a
 val length : 'a queue -> int
end;;
```

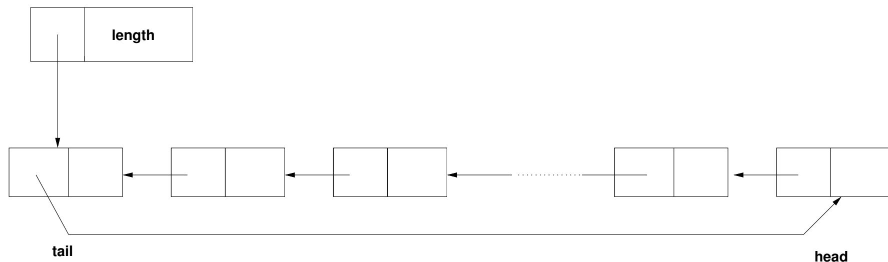
```
module Queue : QUEUE = struct
  type 'a queue = 'a list ref
  exception Empty
  let create() = ref []
  let enq x q = q:= !q@[x]
  let deq q =
    match !q with
          [] -> raise Empty
        | h::r -> q:=r; h
  let length q = List.length !q
end ;;
```

Une manière plus raisonnable de *définir* Queue

```
module Queue : QUEUE = struct
  type 'a cell = { content: 'a;  mutable next: 'a cell }    (* invisible *)
  type 'a queue = { mutable length: int; mutable tail: 'a cell }
  exception Empty
  let create () = { length = 0; tail = Obj.magic None }
  let enq x q =
    q.length <- q.length + 1;
    if q.length = 1 then
       let rec cell = { content = x; next = cell} in
       q.tail <- cell
    else
       let tail = q.tail in
       let head = tail.next in
       let cell = { content = x; next = head} in
       tail.next <- cell;
       q.tail <- cell
  let deq q =
    if q.length = 0 then raise Empty;
    q.length <- q.length - 1;
    let tail = q.tail in
    let head = tail.next in
    if head == tail then
      q.tail <- Obj.magic None
    else
      tail.next <- head.next;
    head.content
  let length q = q.length
end;;
```

Voyons cela graphiquement

Implementation de Queue



L'utilisation de option est plus propre mais 5% plus lente

```
module Queue : QUEUE = struct
  type 'a cell = { content: 'a;  mutable next: 'a cell option}
  type 'a queue = { mutable length: int; mutable tail: 'a cell }
  exception Empty
  let create () = { length = 0; tail = None }
  let enq x q =
    q.length <- q.length + 1;
    if q.length = 1 then
       let rec cell = { content = x; next = cell} in
       q.tail <- Some cell
    else
       let Some tail = q.tail in        (* non exhaustive pattern matching *)
       let head = tail.next in
       let cell = { content = x; next = head} in
       tail.next <- cell;
       q.tail <- Some cell
  let deq q =
    if q.length = 0 then raise Empty;
    q.length <- q.length - 1;
    let Some tail = q.tail in           (* non exhaustive pattern matching *)
    let head = tail.next in
    if head == tail then
      q.tail <- None
    else
      tail.next <- head.next;
    head.content
  let length q = q.length
end;;
```

Une application : un générateur de valeurs

On veut une fonction qui à chaque appel génère un ‘nouveau’ symbole. Pour ce faire, on utilise un compteur ‘caché’.

- On définit une signature avec deux fonctions.

```
# module type GENSYM =
   sig
     val reset : unit -> unit      (* pour initialiser *)
     val next : string -> string   (* nouveau symbole *)
   end ;;
```

- On définit une structure cohérente avec la signature.

```
# module Gensym : GENSYM =
   struct
     let c = ref 0
     let reset () = c:=0
     let next s = incr c ; s ^ (string_of_int !c)
  end;;
module Gensym : GENSYM
```

Nota bene

La référence `c` n’est pas accessible en dehors des fonctions `reset` et `next`.

- Supposons maintenant qu'un utilisateur standard n'ait pas le droit de faire `reset`. Pour avoir une vue restreinte on pose :

```
# module type USER_GENSYM =
   sig
     val next : string -> string
   end;;
```

- On peut créer un module correspondant :

```
# module UserGensym = (Gensym : USER_GENSYM) ;;
module UserGensym : USER_GENSYM

# UserGensym.next "U" ;;
- : string = "U2"

# UserGensym.reset() ;;
Error: Unbound value UserGensym.reset
```

- Pour avoir le comportement souhaité il faut que les deux vues GENSYM et USER_GENSYM *partagent* le même compteur. Ce qui est en effet le cas.

```
# Gensym.next "U" ;;
- : string = "U3"

# Gensym.reset() ;;
- : unit = ()

# UserGensym.next "V" ;;
- : string = "V1"
```

Nota Bene

L'effet de

```
# module UserGensym = (Gensym : USER_GENSYM) ;;
```

est donc de créer une vue restreinte d'une structure existante.

Exercice (multicounter)

On souhaite définir un module qui permet de créer un nombre arbitraire de compteurs. On déclare un type enregistrement compteur :

```
type counter = {
  increment: unit -> unit;          (* pour incrementer le compteur *)
  show: unit -> int                 (* pour voir la valeur du compteur *)
} ;;
```

et la signature du module

```
module type MULTICOUNTER =
sig
  val create: unit -> counter       (* pour créer un compteur *)
end;;
```

Un exemple d’utilisation.

```
# let c1 = Multicounter.create ();;
val c1 : counter = {increment = <fun>; show = <fun>}

# c1.increment(); c1.show();;
- : int = 1

# c1.increment();;
- : unit = ()

# let c2 = Multicounter.create ();;
val c2 : counter = {increment = <fun>; show = <fun>}

# c2.increment(); c2.show();;
- : int = 1

# c1.show();;
- : int = 2
```

Proposez une *structure* `Multicounter` adaptée.

Une solution :

```
module Multicounter : MULTICOUNTER =
struct
  let create () =
    let c = ref 0 in
    let f1 () = c:=!c+1 in
    let f2 () = !c in
      {increment = f1 ; show = f2}
end;;
```

Nota Bene

Dans ce cas, la structure ne contient pas de déclaration de type et un enregistrement pourrait très bien faire l'affaire !

```
let create () =
  let c = ref 0 in
  { increment = (fun()-> c:=!c+1) ; show = fun()-> !c }
```

sans que cela soit encapsulé dans une structure.

Rationale

Les modules ont leur raison d'être en présence de l'abstraction des types

Partage de type par contrainte

L'abstraction peut être une source de difficultés. . .

- Par masquage on peut rendre un type *abstrait*.
- A priori tous les types abstraits sont *différents*.
- Parfois, on souhaite spécifier que deux types abstraits sont le même de façon à les *partager* entre plusieurs modules.
- Le langage offre la possibilité d'exprimer des contraintes d'*égalité de types*.

Exemple (partage de types)

- Un module M avec un type abstrait t.

```
# module M =
 (
   struct
     type t = int ref
     let create() = ref 0
     let add x = incr x
     let get x = if !x>0 then (decr x; 1) else failwith "Empty"
   end
   :
   sig
     type t
     val create : unit -> t
     val add : t -> unit
     val get : t -> int
   end
 ) ;;
```

- On restreint la vue du module `M` de deux façons.

```
# module type S1 =
   sig
     type t
     val create : unit -> t
     val add : t -> unit
   end ;;

# module type S2 =
   sig
     type t
     val get : t -> int
   end ;;

# module M1 = (M:S1) ;;
module M1 : S1

# module M2 = (M:S2) ;;
module M2 : S2
```

- Le problème est que les types `M1.t` et `M2.t` ne sont pas identifiés :

```
# let x= M1.create ();;
val x : M1.t = <abstr>

# M1.add x;;
- : unit = ()

# M2.get x;;
This expression has type M1.t but is here used with type M2.t
```

- On règle le problème avec des contraintes d'égalité

```
# module M1 = (M:S1 with type t = M.t) ;;
module M1 : sig
   type t = M.t
   val create : unit -> t
   val add : t -> unit
end

# module M2 = (M:S2 with type t = M.t) ;;
module M2 : sig
   type t = M.t
   val get : t -> int
end

# let x = M1.create() in M1.add x ;  M2.get x ;;
- : int = 1
```

Une solution alternative avec sous-modules

- On construit `M1` et `M2` comme *sous-modules* de `M`

```
# module M =
  (struct
     type t = int ref
     module M_hide =
       struct
         let create() = ref 0
         let add x = incr x
         let get x = if !x>0 then (decr x; 1) else failwith"Empty"
       end
     module M1 = M_hide
     module M2 = M_hide
   end
  :
   sig
     type t
     module M1 : sig  val create : unit -> t  val add : t -> unit end
     module M2 : sig  val get : t -> int  end
   end ) ;;
```

- Le type synthétisé est :

```
module M :
  sig
    type t
    module M1 : sig val create : unit -> t val add : t -> unit end
    module M2 : sig val get : t -> int end
  end
```

- Maintenant `M1` et `M2` font référence au même type abstrait.

```
# let x = M.M1.create() ;;
val x : M.t = <abstr>

# M.M1.add x ; M.M2.get x ;;
- : int = 1
```

- Avec les foncteurs (prochain argument) la dernière solution n'est plus viable

Exercice (listes associatives)

Une liste associative est une liste dont les éléments comportent un champ clef et un champ valeur. On suppose que la clef est un entier.

1. Définir une signature ALISTE pour les listes associatives paramétrique dans le type des valeurs. La signature comprend des opérations créer une liste, ajouter un élément, accéder un élément à partir de sa clef, tester si un élément est dans la liste à partir de la clef, supprimer un élément de la liste à partir de la clef.
2. Définir une structure Aliste qui a signature ALISTE.
3. Définir deux signatures ADM_ALISTE et USER_ALISTE. La première contient les opérations créer, ajouter et supprimer alors que la deuxième contient les opérations accéder et tester.
4. Créer deux vues de la structure Aliste avec signature ADM_ALISTE et USER_ALISTE de façon à que les opérations soient compatibles.

Une solution

```
module type ALIST = sig       (* Signature pour les listes d'association *)
  type 'a aslist
  exception ValueNotFound
  val creer :    'a aslist
  val ajouter:  int *  'a * 'a aslist  -> 'a aslist
  val acceder :  int * 'a aslist  -> 'a
  val appartenir :  int * 'a aslist  -> bool
  val suppr  :  int *  'a aslist  -> 'a aslist
end;;

module Alist = struct         (* Structure pour les listes d'association *)
  type  'a aslist = (int * 'a) list
  exception ValueNotFound
  let creer = []
  let ajouter (c, v, l) = (c,v)::l
  let rec acceder(c, l) = match l with
      [] -> raise ValueNotFound
    | (c1,v1):: l1 -> if c1=c then v1 else acceder (c,l1)
  let rec appartenir (c,l) = match l with
      [] -> false
    | (c1,v1):: l1 -> if c1=c then true else appartenir (c,l1)
  let rec suppr (c,l) =  match l with
      [] -> []
    | (c1,v1)::l1 -> if c1=c then suppr(c,l1) else (c1,v1)::suppr(c,l1)
end;;

module Alist = (Alist: ALIST);;                   (* on abstrait les types *)
```

```
(* Signature pour l'administrateur *)
module type ADM_ALIST =
sig
  type 'a aslist
  exception ValueNotFound
  val creer :   'a aslist
  val ajouter:  int *  'a * 'a aslist  -> 'a aslist
  val suppr  :  int *  'a aslist  -> 'a aslist
end;;

(* Signature pour l'utilisateur *)
module type USER_ALIST =
sig
  type 'a aslist
  exception ValueNotFound
  val acceder :  int * 'a aslist  -> 'a
  val appartenir :  int * 'a aslist  -> bool
end;;


(* Structures Admin et User avec contraintes *)
module Admin = (Alist: ADM_ALIST with type 'a aslist = 'a Alist.aslist);;
module User = (Alist: USER_ALIST with type 'a aslist = 'a Alist.aslist);;

(* Administration et Utilisation *)
# let x = Admin.ajouter(3, "foo", Admin.creer );;
val x : string Admin.aslist = <abstr>
# User.appartenir (3,x);;
- : bool = true
```

Inclusion de structures et signatures

Nous avons vu comment *restreindre* la vue d'une signature. Quid si on veut *élargir* une structure ou une signature ?

```
# module type S =
sig
  type t
  val x: t
  val f: t->t
end;;

# module type S1 =
sig
  include S          (* inclusion d'une signature *)
  val g: t->t
end;;

module type S1 = sig type t val x : t val f : t -> t val g : t -> t end
```

Un autre exemple avec Points et Cercles

```
module type POINT =
sig
  type point = float * float
  val mk_point: float * float -> point
  val x_coord:  point -> float
  val y_coord:  point -> float
  val move_p : point * float * float -> point
end;;

module type CIRCLE =
sig
  include POINT                           (* inclusion de la signature *)
  type circle
  val mk_circle: point * float -> circle
  val center:  circle -> point
  val radius:  circle -> float
  val move_c : circle * float * float -> circle
end;;
```

```
module Point: POINT =
struct
  type point = float * float
  let mk_point(x,y)  = (x,y)
  let x_coord(x,y) = x
  let y_coord(x,y) = y
  let move_p ((x,y),dx,dy) = (x+.dx,y+.dy)
end;;

module Circle: CIRCLE = struct
  include Point                     (* inclusion de la structure *)
  type circle = point * float
  let mk_circle (x,y) = (x,y)
  let center(x,y) = x
  let radius (x,y) = y
  let move_c(((x,y),r),dx,dy) = ((x+.dx,y+.dy),r)
end;;
```

Include pour le programmeur averti (1)

Nota Bene

Le comportement d'include est parfois un peu *surprenant*.

```
# module type S = sig
    type t
    val x: t
    val f: t->t
  end;;

# module type S1 = sig
    include S
    val f: t->t
  end;;

module type S1 = sig type t val x : t val f : t -> t val f : t -> t end
```

On veut bien deux occurrences de `f` avec le même type.

Include pour le programmeur averti (2)

```
module type S = sig
  type t
  val x: t
  val f: t->t
end;;

module type S1 = sig
  include S
  val g: t->t
end;;

module type S2 = sig
  include S
  val h: t->t
end;;

module type S12 = sig
  include S1
  include S2
end;;
Multiple definition of the type name t.
Names must be unique in a given structure or signature.
```

Mais on ne veut pas deux occurrences du même type !

Include pour le programmeur averti (3)

```
module type S1aux = sig
  type t1
  val g: t1->t1
end;;

module type S1 =  sig
  include S
  include S1aux with type t1 = t
end;;

module type S2aux = sig
  type t2
  val h: t2->t2
end;;

module type S2 = sig
  include S
  include S2aux with type t2=t
end;;

module type S12 = sig
  include S
  include S1aux with type t1=t
  include S2aux with type t2=t
end;;
```

```
module Example =
struct
  type t = int
  type t1 = int
  type t2 = int
  let x = 3
  let f x = x+1
  let g x = x-1
  let h x = x*x
end;;

module Example = (Example : S12);;
module Example : S12
```

Il faut expliciter les t1 et t2 dans la structure, autrement la structure n'est pas compatible avec la signature S12.

Compilation séparée (1)

- Dans la programmation à grande échelle il convient de séparer un programme en plusieurs fichiers qui peuvent être compilés séparément.
- En OCAML, *unité de compilation = deux fichiers* :
  - le fichier implémentation `nom.ml` (= contenu d'une structure)
  - le fichier interface `nom.mli` (= contenu d'une signature)
  - Les deux fichiers sont équivalents à la déclaration

```
module Nom = (
    struct
      (* contenu de nom.ml *)
    end :
    sig
      (* contenu de nom.mli *)
    end
)
```

Compilation separeée (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
- Le fichiers `nom.ml` et `nom.mli` peuvent être compilés séparément avec l'option -c (compiler sans lier)

`% ocamlc -c aux.mli`	produit	`aux.cmi`	code objet interface
`% ocamlc -c aux.ml`	produit	`aux.cmo`	code objet implantation
`% ocamlc -c main.mli`	produit	`main.cmi`	code objet interface
`% ocamlc -c main.ml`	produit	`main.cmo`	code objet implantation
`% ocamlc aux.cmo main.cmo -o main`	linking		

- Le programme est équivalent à :

```
module Aux: sig (* contenu de aux.mli *) end
          = struct (* contenu de aux.ml *) end;;
module Main: sig (* contenu de main.mli *) end
          = struct (* contenu de main.ml *) end;;
```

En particulier `Main` peut faire référence aux définitions dans l'interface de `Aux`, mais `Aux` ne peut pas faire référence à `Main`.

- Depuis la version 3.07 de OCaml il est possible de définir des structures et des signatures récursives par la syntaxe :

```
module rec ... and ...
```

  avec des restrictions pour assurer la terminaison :
  - Tout cycle de dépendance doit passer par au moins un module “safe".
  - Un module est “safe” si tout valeur défini dans le module est une fonction
  - L’évaluation démarre en construisant les modules “safe" dont les valeurs sont initialisées à `fun _ -> raise Undefined_recursive_module`.

Outline

1. Introduction à la Modularité
2. Modules (simples) en ML
3. Foncteurs
4. Un exemple un peu plus compliqué

Fonceteurs

Exemple

- On définit la signature d'un *groupe*.

```
# module type GROUPE =
sig
  type g
  val e: g
  val comp: g*g -> g
  val inv: g -> g
end;;
```

- On définit la construction de carré d'un groupe comme un 'foncteur' des groupes dans les groupes.

```
# module Square (Gr: GROUPE) =
  ( struct
     type g = Gr.g * Gr.g
     let e = (Gr.e,Gr.e)
     let comp ((a,b),(c,d)) = (Gr.comp(a,c),Gr.comp(b,d))
     let inv (a,b) = (Gr.inv(a),Gr.inv(b))
    end : GROUPE );;
module Square : functor (Gr : GROUPE) -> GROUPE
```

- On peut construire la structure GROUPE des entiers.

```
# module Zeta: GROUPE =
  struct
    type g = int
    let e = 0
    let comp (n,m) = n+m
    let inv (n) = -n
  end;;
```

- et générer le groupe carré par application.

```
# module SquareZeta = Square(Zeta) ;;
module SquareZeta :
  sig
    type g = Square(Zeta).g
    val e : g
    val comp : g * g -> g
    val inv : g -> g
  end
```

NB Ici le type dans le résultat est *abstrait*.

Un autre exemple : mots ordonnés

- On déclare une signature *type ordonné*.

```
type comparison = Less | Equal | Greater;;

module type ORDERED_TYPE =
    sig
     type t
     val compare: t -> t -> comparison
    end;;
```

- On déclare un foncteur Set qui est paramétré sur un type ordonné.

```
module Set (Elt: ORDERED_TYPE) =
  struct
    type element = Elt.t
    type set = element list
    let empty = []
    let rec add x s =
      match s with
        [] -> [x]
      | hd::tl ->
         match Elt.compare x hd with
           Equal   -> s          (* x is already in s *)
          | Less    -> x :: s     (* x is smaller than all elmts of s *)
          | Greater -> hd :: add x tl
    let rec member x s =
      match s with
        [] -> false
      | hd::tl ->
          match Elt.compare x hd with
            Equal   -> true      (* x belongs to s *)
          | Less    -> false     (* x is smaller than all elmts of s *)
          | Greater -> member x tl
  end;;
```

Le type inferé est :

```
module Set :
functor (Elt : ORDERED_TYPE) ->
    sig
      type element = Elt.t
      type set = element list
      val empty : 'a list
      val add : Elt.t -> Elt.t list -> Elt.t list
      val member : Elt.t -> Elt.t list -> bool
    end
```

- On construit la structure *mots ordonnés*.

```
# module OrderedString =
    struct
      type t = string
      let compare x y =
            if x = y then Equal
            else if x < y then Less
            else Greater
    end;;
module OrderedString :
  sig type t = string val compare : 'a -> 'a -> comparison end
```

- On dérive par *application* la structure *ensembles de mots*

```
# module StringSet = Set(OrderedString);;
module StringSet :
  sig
    type element = OrderedString.t
    type set = element list
    val empty : 'a list
    val add : OrderedString.t -> OrderedString.t list -> OrderedString.
    val member : OrderedString.t -> OrderedString.t list -> bool
  end

# StringSet.member "bar" (StringSet.add "foo" StringSet.empty);;
- : bool = false
```

Foncteurs et abstraction

- On souhaite cacher le fait que les ensembles sont représentés par des listes.
- On déclare une signature *de fonction*.

```
# module type SETFUNCTOR =
  functor (Elt: ORDERED_TYPE) ->
    sig
      type element = Elt.t       (* concrete *)
      type set                   (* abstract *)
      val empty : set
      val add : element -> set -> set
      val member : element -> set -> bool
    end;;
```

- On utilise la signature pour créer une vue abstraite de Set.

```
# module AbstractSet = (Set : SETFUNCTOR);;
module AbstractSet : SETFUNCTOR

# module AbstractStringSet = AbstractSet(OrderedString);;
module AbstractStringSet :
   sig
     type element = OrderedString.t
     type set = AbstractSet(OrderedString).set     ←list n'est plus visible!
     val empty : set
     val add : element -> set -> set
     val member : element -> set -> bool
   end

#AbstractStringSet.add "gee" AbstractStringSet.empty;;
 - : AbstractStringSet.set = <abstr>
```

Foncteurs et abstraction (suite)

On considère un ordre non-standard sur le mots (on ne distingue pas lettres majuscules et minuscules).

```
# module NoCaseString =
  struct
    type t = string
    let compare s1 s2 =
      OrderedString.compare (String.lowercase s1) (String.lowercase s2)
  end;;
module NoCaseString :
    sig type t = string val compare : string -> string -> comparison end
```

On utilise le foncteur `AbstractSet` pour construire des ensembles de mots dont le type de representation est abstrait

```
 # module NoCaseStringSet = AbstractSet(NoCaseString);;
 module NoCaseStringSet :
    sig
      type element = NoCaseString.t
      type set = AbstractSet(NoCaseString).set
      val empty : set
      val add : element -> set -> set
      val member : element -> set -> bool
    end
```

```
# NoCaseStringSet.add "FOO" AbstractStringSet.empty;;
  This expression has type
    AbstractStringSet.set = AbstractSet(OrderedString).set
  but is here used with type
    NoCaseStringSet.set = AbstractSet(NoCaseString).set
```

Les types AbstractStringSet.set et NoCaseStringSet.set sont *incompatibles*

Nota Bene

Ceci est *souhaitable*. Par exemple, l'union sur AbstractStringSet est différente de l'union sur NoCaseStringSet.set.

Foncteurs et Contraintes

On nomme SET la signature de la structure rendue par le foncteur AbstractSet.

```
# module type SET = sig
    type element
    type set
    val empty : set
    val add : element -> set -> set
    val member : element -> set -> bool
  end;;
```

On pourrait penser d'utiliser SET pour abstraire le foncteur Set

```
# module WrongSet = (Set : functor(Elt: ORDERED_TYPE) -> SET);;
module WrongSet : functor (Elt : ORDERED_TYPE) -> SET

# module WrongStringSet = WrongSet(OrderedString);;
module WrongStringSet : sig
   type element = WrongSet(OrderedString).element
   type set = WrongSet(OrderedString).set
   val empty : set
   val add : element -> set -> set
   val member : element -> set -> bool
end

# WrongStringSet.add "gee" WrongStringSet.empty;;
This expression has type string but is here used with type
  WrongStringSet.element = WrongSet(OrderedString).element
```

Le problème est que `SET` spécifie le type des éléments de façon abstraite.
Ainsi `WrongStringSet.element` n'est pas le même type que `string`.
Pour surmonter cette difficulté on doit ajouter des *contraintes* :

```
# module AbstractSet =
   (Set : functor(Elt: ORDERED_TYPE) -> (SET with type element = Elt.t));;
module AbstractSet :
   functor (Elt : ORDERED_TYPE) ->
     sig
       type element = Elt.t
       type set
       val empty : set
       val add : element -> set -> set
       val member : element -> set -> bool
     end
```

Exercice (fonctions polymorphes et foncteurs)

- On veut définir une opération de tri polymorphe
  `tri : 'a list -> 'a list`
- On a besoin d'une opération de comparaison
  `lesseq: 'a -> a' -> bool`
- On est donc obligé de définir
  `tri : 'a list ->  ('a -> 'a -> bool) -> 'a list`

Exercice : Proposez une solution alternative selon le schéma suivant :

1. On définit une signature ORDTYPE 'type ordonné'.
2. On définit un foncteur qui prend en paramètre une structure 'type ordonné' et produit une structure avec une fonction de tri pour le type ordonné en question.

Une solution

```
(* Une signature pour les types ordonnés *)
module type ORDTYPE = sig
  type t
  val lesseq: t -> t -> bool
end ;;

(* Un module parametrique pour faire le tri par insertion *)
module Sort (OrdType : ORDTYPE ) = struct
  type t = OrdType.t
  let rec insert x l =  match l with
    [] -> [x] | y::l1 -> if OrdType.lesseq x y
                         then x::y::l1 else y:: insert x l1
  let rec isort l = match l with
    [] -> []  | y::l1 -> insert y  (isort l1)
end;;

(* Une structure de paires d'entiers avec ordre lexicographique *)
module OrdIntPair = struct
  type t = int * int
  let lesseq (x1,x2) (y1,y2) =
  if x1 <= y1 then true else (if x1=y1 then x2<= y2 else false)
end;;

(* Définition d'une structure Sort(OrdIntPair) *)
module S = Sort(OrdIntPair);;
```

```
(* Une liste de couples d'entiers *)

 # let l = [(2,4); (3,2); (1,5)];;
 val l : (int * int) list = [(2, 4); (3, 2); (1, 5)]

(* On utilise la structure pour trier la liste d'entiers *)

 # S.isort l;;
  - : OrdIntPair.t list = [(1, 5); (2, 4); (3, 2)]


(* La fonction insert est aussi visible *)

 # S.insert (4,5) (S.isort l);;
 - : OrdIntPair.t list = [(1, 5); (2, 4); (3, 2); (4, 5)] *)
```

```
(* Pour la cacher on definit *)

module Sort (OrdType : ORDTYPE ) = (
struct
  type t = OrdType.t
  let rec insert x l =  match l with
     [] -> [x] | y::l1 -> if OrdType.lesseq x y then x::y::l1
                          else y:: insert x l1
  let rec isort l = match l with
     [] -> []  | y::l1 -> insert y  (isort l1)
end
:
sig
  val isort : OrdType.t list -> OrdType.t list
end);;
```

Exercice (vecteurs paramétrés)

1. On suppose une signature `MONOIDE`

```
module type MONOIDE = sig
  type t
  val e: t
  val comp: t -> t -> t
  val print_mon: t -> unit
end;;
```

2. Définir des structures `Rationnel` et `Complexe` qui sont compatibles avec la signature `MONOIDE`.
3. Définir un foncteur `Vecteur` paramétré sur la signature `MONOIDE` qui produit une structure comprenant

```
type vt = Monoide.t array
val comp_vect : Monoide.t array -> Monoide.t array -> Monoide.t array
val print_vect : Monoide.t array -> unit
```

4. Utilisez le foncteur pour produire des opérations de composition (partielle) et d'impression sur les vecteurs de `Rationnel` et `Complexe`.

Rappel : Pour accéder le troisième élément du vecteur `v` on écrit `v.(2)` et pour lui affecter la valeur 5 on écrit `v.(2)<-5`. Aussi `Array.length v` donne la longueur de `v` et `Array.create 35 x` génère un vecteur de longueur 35 dont les entrées sont initialisées avec la valeur de `x`.

Outline

1. Introduction à la Modularité
2. Modules (simples) en ML
3. Foncteurs
4. Un exemple un peu plus compliqué

Exemple : gestion de comptes

On analyse la conception d'un programme de gestion de comptes bancaires qui combine différentes techniques :

1. Abstraction de type.
2. Génération de différentes vues d'un module.
3. Utilisation de foncteurs (ici il s'agit plutôt d'expliciter la paramétrisation que de réutiliser du code).
4. Contraintes d'égalité sur les types abstraits.

Organisation de l'application

- Les opérations pour la gestion.

$$Gestion \supset BGestion, CGestion.$$

- Repartion des ingrédients de la gestion en 4 modules de base :

$$Compte, Date, Histo, Releve$$

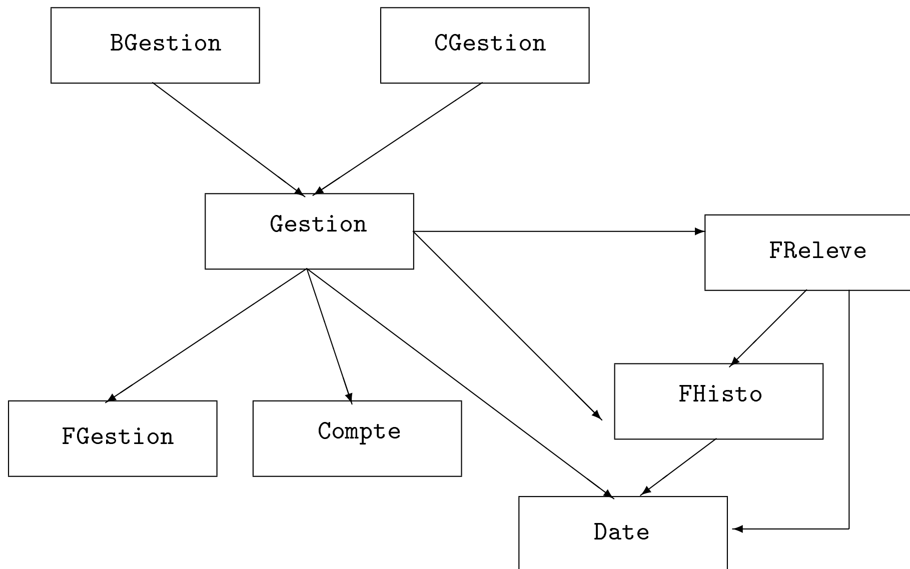
- Expliciter les dépendances entre modules de base :

$$Histo = FHisto(Date), \qquad Releve = FReleve(Date, Histo)$$

- Le module gestion est obtenu à partir des 4 modules de base :

$$Gestion = FGestion(Compte, Date, Histo, Releve).$$

Organisation de l'application



Compte

Signature COMPTE

```
# module type COMPTE = sig
   type t
   exception OperationImpossible
   val creer : float -> float -> t  (* solde init., découvert autorisé *)
   val depot : float -> t -> unit
   val retrait : float -> t -> unit (* peut déclencher exception *)
   val solde : t -> float
 end ;;
```

Structure Compte

```
# module Compte:COMPTE =
  struct
   type t = { mutable solde:float; decouvert:float }
   exception OperationImpossible
   let creer s d = { solde=s; decouvert=(-.d) }
   let depot s c =  c.solde <- c.solde+.s
   let solde c = c.solde
   let retrait s c =
    let ss = c.solde -. s in
     if ss < c.decouvert then raise OperationImpossible
     else c.solde <- ss
  end ;;
```

Date (signature et structure)

```
# module type DATE = sig
     type t
     val creer : unit -> t           (* une clef unique *)
     val of_string : string -> t   (* conversion *)
     val to_string : t -> string
     val eq : t -> t -> bool         (* comparaison *)
     val lt : t -> t -> bool
     val gt : t -> t -> bool
   end ;;
```

Les opérations sont enregistrées selon un historique. On associe une clé à chaque enregistrement.

```
# module Date:DATE =  struct
   type t = float
   let creer() = Unix.time()
   let of_string = float_of_string
   let to_string = string_of_float
   let eq = (=)
   let lt = (<)
   let gt = (>)
  end ;;
module Date : DATE
```

Une clef d'enregistrement est simplement la date de la transaction exprimée en flottant telle que la fournit la fonction time du module Unix (noter que les clefs forment une structure ordonnée)

Signature HISTO

```
# module type HISTO = sig
   type tcle                                          (* clef enregistrement *)
   type tinfo                                                (* informations *)
   type t                                            (* structure stockage *)
   val creer : unit -> t
   val add : tcle -> tinfo -> t -> unit
   val nth : int -> t -> tcle*tinfo  (* accès par ordre d'enregistrement *)
   val get : (tcle -> bool) -> t -> (tcle*tinfo) list  (* accès par clef *)
  end ;;
```

Notez que le premier paramètre de `get` est un prédicat sur les cléfs.

Puisque une historique depend du type de clef choisie, un module de signature HISTO sera obtenu par l'application d'un foncteur.

Foncteur Historique

L'historique d'un compte dépend du type de clé choisi.

```
# module FHisto (K:DATE) = struct
   type tcle = K.t
   type tinfo = float
   type t = { mutable content : (tcle*tinfo) list }
   let creer() = { content = [] }
   let add c i h = h.content <- (c,i)::h.content
   let nth i h = List.nth h.content i
   let get f h = List.filter (fun (c,_) -> (f c)) h.content
  end ;;

  module FHisto :
   functor(K : DATE) ->
    sig
      type tcle = K.t
      and tinfo = float
      and t = { mutable content: (tcle * tinfo) list }
      val creer : unit -> t
      val add : tcle -> tinfo -> t -> unit
      val nth : int -> t -> tcle * tinfo
      val get : (tcle -> bool) -> t -> (tcle * tinfo) list
    end
```

NB Le type des informations doit être cohérent avec celui donné lors de la définition du foncteur de gestion.

Signature RELEVE

```
# module type RELEVE =
    sig
      type tdata                            (* type données à traiter *)
      type tinfo                            (* type info extraites *)
      val editB : tdata -> tinfo            (* edition pour banquier *)
      val editC : tdata -> tinfo            (* edition pour client *)
    end ;;
```

Comme pour les historiques, un rélevé depend d'autres modules. En particulier du type de clef et d'historique choisies. Ainsi tout module de signature RELEVE sera obtenu par l'application d'un foncteur.

Foncteur Relevé

```
# module FReleve (K:DATE) (H:HISTO with type tcle=K.t) = struct
   type tdata = H.t
   type tinfo = (H.tcle*H.tinfo) list
   let editB h =  List.map (fun i -> H.nth i h) [0;1;2;3;4]//5 transactions
   let editC h =                                            //10 jours
    let c0 = K.of_string (string_of_float ((Unix.time()) -. 864000.)) in
    let f = K.lt c0 in H.get f h
  end ;;

  module FReleve :
   functor(K : DATE) ->
    functor
      (H : sig
             type  tcle = K.t
             and tinfo
             and t
             val creer : unit -> t
             val add : tcle -> tinfo -> t -> unit
             val nth : int -> t -> tcle * tinfo
             val get : (tcle -> bool) -> t -> (tcle * tinfo) list
           end) ->
      sig
        type tdata = H.t
        and tinfo = (H.tcle * H.tinfo) list
        val editB : H.t -> (H.tcle * H.tinfo) list
        val editC : H.t -> (H.tcle * H.tinfo) list
      end
```

Foncteur Relevé

```
# module FReleve (K:DATE) (H:HISTO with type tcle=K.t) = struct
   type tdata = H.t
   type tinfo = (H.tcle*H.tinfo) list
   let editB h =  List.map (fun i -> H.nth i h) [0;1;2;3;4]
   let editC h =
    let c0 = K.of_string (string_of_float ((Unix.time()) -. 864000.)) in
    let f = K.lt c0 in H.get f h
  end;;
```

Noter :

1. `H.get: (H.tcle -> bool) -> H.t -> (H.tcle * H.tinfo) list`
2. `K.lt c0 :K.t -> bool` (puisque `c0 : K.t`).
3. `H.tcle -> bool` est compatible avec `K.t -> bool` grâce à la contrainte `H.tcle = K.t`.

Foncteur Gestion

```
# module FGestion =
  functor (C:COMPTE) ->
  functor (K:DATE) ->
  functor (H:HISTO with type tcle=K.t and type tinfo=float) -> //contrainte
  functor (R:RELEVE with type tdata=H.t                        //contrainte
                   and type tinfo=(H.tcle*H.tinfo) list) ->   //contrainte
    struct
      type t = { mutable c : C.t; mutable h : H.t }
      let creer s d = { c = C.creer s d; h = H.creer() }
      let depot s g = C.depot s g.c ; H.add (K.creer()) s g.h
      let retrait s g =  C.retrait s g.c ; H.add (K.creer()) (-.s) g.h
      let solde g = C.solde g.c
      let releve edit g =
        let f (d,i) = (K.to_string d) ^ ":" ^ (string_of_float i)
        in List.map f (edit g.h)
      let releveB = releve R.editB
      let releveC = releve R.editC
    end ;;
```

Exercice

Trouver l’utilité de toutes les contraintes de types spécifiées dans `FGestion`.

```
module FGestion :
  functor(C : COMPTE) ->
    functor(K : DATE) ->
      functor
        (H : sig
               type tcle = K.t
               and tinfo = float
               and t
               val creer : unit -> t
               val add : tcle -> tinfo -> t -> unit
               val nth : int -> t -> tcle * tinfo
               val get : (tcle -> bool) -> t -> (tcle * tinfo) list
             end) ->
        functor
          (R : sig
                 type tdata = H.t
                 and tinfo = (H.tcle * H.tinfo) list
                 val editB : tdata -> tinfo
                 val editC : tdata -> tinfo
               end) ->
          sig
            type t = { mutable c: C.t; mutable h: H.t }
            val creer : float -> float -> t
            val depot : H.tinfo -> t -> unit
            val retrait : float -> t -> unit
            val solde : t -> float
            val releve : (H.t -> (K.t * float) list) -> t -> string list
            val releveB : t -> string list
            val releveC : t -> string list
          end
```

Modules finaux

Pour construire les modules GBanque et GClient respectivement destinés au banquier et au client on procède comme suit :

1. définition d'une structure par application du foncteur FGestion aux paramètres.
2. déclaration d'une signature indiquant les fonctions accessibles dans chacun des cas.
3. définition du module final par contrainte de la structure obtenue en 1 avec la signature déclarée en 2.

```
# module Gestion =
  FGestion (Compte)
           (Date)
           (FHisto(Date))
           (FReleve (Date) (FHisto(Date))) ;;

  module Gestion :
   sig
    type t =
      FGestion(Compte)(Date)(FHisto(Date))(FReleve(Date)(FHisto(Date))).t =
      { mutable c: Compte.t;
        mutable h: FHisto(Date).t }
    val creer : float -> float -> t
    val depot : FHisto(Date).tinfo -> t -> unit
    val retrait : float -> t -> unit
    val solde : t -> float
    val releve :
      (FHisto(Date).t -> (Date.t * float) list) -> t -> string list
    val releveB : t -> string list
    val releveC : t -> string list
  end
```

```
# module type GESTION_BANQUE =
   sig
    type t
    val creer : float -> float -> t
    val depot : float -> t -> unit
    val retrait : float -> t -> unit
    val solde : t -> float
    val releveB : t ->  string list
   end ;;

# module GBanque = (Gestion:GESTION_BANQUE with type t=Gestion.t) ;;
```

```
module GBanque :
  sig
    type t = Gestion.t
    val creer : float -> float -> t
    val depot : float -> t -> unit
    val retrait : float -> t -> unit
    val solde : t -> float
    val releveB : t -> string list
  end
```

```
# module type GESTION_CLIENT =
   sig
    type t
    val depot : float -> t -> unit
    val retrait : float -> t -> unit
    val solde : t -> float
    val releveC : t ->  string list
   end ;;
```

```
# module GClient = (Gestion:GESTION_CLIENT with type t=Gestion.t) ;;
```

```
module GClient :
  sig
    type t = Gestion.t
    val depot : float -> t -> unit
    val retrait : float -> t -> unit
    val solde : t -> float
    val releveC : t -> string list
  end
```

Nota Bene

Pour que les comptes créés par un banquier puissent être manipulés par un client on utilise la contrainte de type Gestion.t dans la définition de GBanque et GClient.

Questions

1. Seriez-vous arrivés à cette décomposition ?
2. Par quel chemin ?
3. Avez-vous une autre décomposition à proposer ?

Lectures conseillées

- J. Mitchell. Concepts in programming languages, chpt 9, Data abstraction and Modularity.

  Pour une perspective historique sur les notions d'abstraction et de modularité.

- E. Chailloux et al. Objective OCAML, chapitre 14, Programmation modulaire (en ligne).

  Pour les détails sur les modules en OCAML (ces transparents sont tirés de ce livre).

Lectures avancées

- D. Mac Queen. Modules for standard ML. ACM-POPL, 1984.

  On décrit la conception du système de modules de ML.

- D. Dreyer, K. Crary, R. Harper. A type system for higher-order modules. ACM-POPL 2003.

  We present a type theory for higher-order modules that accounts for many central issues in module system design, including translucency, applicativity, generativity, and modules as first-class values (...)

NB Le mot 'théorie' ici doit être pris avec un grain de sel... On cherchera en vain l'énoncé d'un 'théorème' dans ces papiers.