

OCaml: les objets

David Delahaye

Faculté des Sciences
David.Delahaye@lirmm.fr

Licence L3 2019-2020

Plan du cours

3 semaines de cours

- ❶ Noyau fonctionnel ;
- ❷ *Objets simples (héritage simple et multiple, sous-typage) ;*
- ❸ Objets avancés (types ouverts, contraintes, « self-types »).

Nous allons apprendre OCaml !

Histoire d'OCaml

- 1978 : langage ML (Milner) ;
- 1980 : projet Inria Formel (Huet) ;
- 1985 : « Categorical Abstract Machine » (Cousineau, Curien, Mauny) ;
- 1987 : première release de Caml (Suarez) ;
- 1988-1992 : Caml prend de l'ampleur (Mauny, Weis) ;
- 1990-1991 : machine Zinc, Caml Light (Leroy, Doligez) ;
- 1995 : ajout des modules, Caml Special Light (Leroy) ;
- 1996 : ajout des objets, Objective Caml (Vouillon, Rémy) ;
- 2000 : merge avec la branche Objective Label (Guarrigue) ;
- 2011 : le nom devient définitivement OCaml.

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
object  
  val content = 0  
  method get = content  
end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```


Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
  It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
  It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Dans la boucle interactive

```
# class cell =  
  object  
    val content = 0  
    method get = content  
  end;;  
class cell :  
  object val content : int method get : int end  
# let o = new cell;;  
val o : cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#content;;  
Error: This expression has type cell  
      It has no method content
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```


Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Classes polymorphes

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a → object val content : 'a method get : 'a end  
# let o = new cell 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = new cell true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```


Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Constructeurs fonctionnels, application partielle

```
# let f = new cell;;  
val f : 'a → 'a cell = <fun>  
# let o = f 1;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 1  
# let o = f true;;  
val o : bool cell = <obj>  
# o#get;;  
- : bool = true
```

Premières classes et premiers objets

Types de classes

```
# class type ['a] cell_type =  
  object  
    method get : 'a  
  end;;  
  
class type ['a] cell_type = object method get : 'a end  
# class ['a] cell n : ['a] cell_type =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell : 'a → ['a] cell_type
```


Premières classes et premiers objets

Types de classes

```
# class type ['a] cell_type =  
  object  
    method get : 'a  
  end;;  
class type ['a] cell_type = object method get : 'a end  
# class ['a] cell n : ['a] cell_type =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell : 'a → ['a] cell_type
```

Premières classes et premiers objets

Types de classes

```
# class type ['a] cell_type =  
  object  
    method get : 'a  
  end;;  
class type ['a] cell_type = object method get : 'a end  
# class ['a] cell n : ['a] cell_type =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell : 'a → ['a] cell_type
```

Premières classes et premiers objets

Types de classes

```
# class type ['a] cell_type =  
  object  
    method get : 'a  
  end;;  
class type ['a] cell_type = object method get : 'a end  
# class ['a] cell n : ['a] cell_type =  
  object  
    val content = n  
    method get = content  
  end;;  
class ['a] cell : 'a → ['a] cell_type
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
object  
  val mutable content = n  
  method get = content  
  method set n = content <- n  
end;;  
  
class ['a] cell :  
  'a →  
  object val mutable content : 'a  
    method get : 'a method set : 'a → unit end
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
object  
  val mutable content = n  
  method get = content  
  method set n = content <- n  
end;;  
class ['a] cell :  
  'a →  
  object val mutable content : 'a  
    method get : 'a method set : 'a → unit end
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```


Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Premières classes et premiers objets

Valeurs mutables

```
# let o = new cell 0;;  
val o : int cell = <obj>  
# o#get;;  
- : int = 0  
# o#set 1;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : int = 1
```

Types des objets et égalité entre types d'objet

Principe

- Type d'un objet = type de toutes les méthodes de l'objet ;
- Les variables d'instance ne sont pas considérées ;
- Égalité entre types d'objet structurel ;
- Deux types d'objets sont égaux si et seulement si :
 - ▶ Les deux objets ont les mêmes méthodes avec les mêmes noms et les mêmes types.
- Note : contrairement au type d'une fonction, un type d'objet ne contient plus aucune variable de type.

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
object  
  val mutable content = n  
  method get = content  
  method set n = content <- n  
end;;  
class ['a] cell :  
  'a →  
  object val mutable content : 'a  
    method get : 'a method set : 'a → unit end
```

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# class ['a] cell (n : 'a) =  
  object  
    val mutable content = n  
    method get = content  
    method set n = content <- n  
  end;;  
class ['a] cell :  
  'a →  
  object val mutable content : 'a  
    method get : 'a method set : 'a → unit end
```


Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# class ['a] box | (n : 'a) =  
object  
  val name = "Name:␣" ^ |  
  val mutable content = n  
  method get = content  
  method set n = content <- n  
end;;
```

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
class ['a] box :  
  string →  
  'a →  
object  
  val mutable content : 'a  
  val name : string  
  method get : 'a  
  method set : 'a → unit  
end
```

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Types des objets et égalité entre types d'objet

Égalité structurelle

```
# let c = new cell 1;;  
val c : int cell = <obj>  
# let b = new box "Integer" 2;;  
val b : int box = <obj>  
# let l = [c; b];;  
val l : int cell list = [<obj>; <obj>]  
# List.map (fun o → o#get) l;;  
- : int list = [1; 2]
```

Dans cet exemple

- `int cell = < get : int; set : int → unit > = int box ;`
- OCaml ne fait aucune différence entre les deux types ;
- La liste `l` a le type `int cell` ou `int box` indifféremment (OCaml choisit `int cell` car il type `c` en premier).

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# class account b =  
object (self)  
  val mutable balance = 0.0  
  method get = balance  
  method deposit a = balance <- balance +. a  
  method withdraw a = balance <- balance -. a  
  method print = print_float balance; print_newline ()  
  initializer self#deposit b  
end;;
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
class account :  
  float →  
  object  
    val mutable balance : float  
    method deposit : float → unit  
    method get : float  
    method print : unit  
    method withdraw : float → unit  
end
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```


Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Clauses d'initialisation

```
# let o = new account 100.;;  
val o : account = <obj>  
# o#print;;  
100.  
- : unit = ()  
# o#deposit 50.;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 150.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# class interest_account b =  
object  
  inherit account b  
  method interest =  
    balance <- balance +. 5. *. balance /. 100.  
end;;
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
class interest_account :  
  float →  
  object  
    val mutable balance : float  
    method deposit : float → unit  
    method get : float  
    method interest : unit  
    method print : unit  
    method withdraw : float → unit  
  end
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```


Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Ajout de méthodes

```
# let o = new interest_account 100.;;  
val o : interest_account = <obj>  
# o#get;;  
- : float = 100.  
# o#interest;;  
- : unit = ()  
# o#get;;  
- : float = 105.
```

Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
# class secure_account b =  
object  
  inherit account b as super  
  method withdraw a =  
    if (balance -. a) >= 0. then super#withdraw a  
    else failwith "Not␣enough␣money!"  
end;;
```


Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
class secure_account :  
  float →  
  object  
    val mutable balance : float  
    method deposit : float → unit  
    method get : float  
    method print : unit  
    method withdraw : float → unit  
  end
```

Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
# let o = new secure_account 100.;;  
val o : secure_account = <obj>  
# o#withdraw 150.;;  
Exception: Failure "Not enough money!".
```

Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
# let o = new secure_account 100.;;  
val o : secure_account = <obj>  
# o#withdraw 150.;;  
Exception: Failure "Not enough money!".
```

Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
# let o = new secure_account 100.;;  
val o : secure_account = <obj>  
# o#withdraw 150.;;  
Exception: Failure "Not enough money!".
```

Héritage (simple)

Redéfinition de méthodes

```
# let o = new secure_account 100.;;  
val o : secure_account = <obj>  
# o#withdraw 150.;;  
Exception: Failure "Not enough money!".
```

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
  val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
  val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let s = new secure_account 100.;;  
val s : secure_account = <obj>  
# [a; s];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Aucun problème car les types `account` et `secure_account` sont égaux !

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;  
Error: This expression has type interest_account  
      but an expression was expected of type account  
      The second object type has no method interest
```

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;  
Error: This expression has type interest_account  
      but an expression was expected of type account  
      The second object type has no method interest
```

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;  
Error: This expression has type interest_account  
      but an expression was expected of type account  
      The second object type has no method interest
```

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>
```

```
# [a; i];;
```

*Error: This expression has **type** interest_account
but an expression was expected **of type** account
The second **object type** has no **method** interest*

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;
```

*Error: This expression has **type** interest_account
but an expression was expected of **type** account
The second **object type** has no **method** interest*

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;  
Error: This expression has type interest_account  
      but an expression was expected of type account  
      The second object type has no method interest
```

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux ;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Mettre des comptes hétérogènes dans une liste

```
# let a = new account 100.;;  
val a : account = <obj>  
# let i = new interest_account 100.;;  
val i : interest_account = <obj>  
# [a; i];;  
Error: This expression has type interest_account  
      but an expression was expected of type account  
      The second object type has no method interest
```

- Les types `account` et `interest_account` ne sont pas égaux;
- Le type `interest_account` possède la méthode `interest` en plus.

Sous-typage

Utiliser le sous-typage explicite

```
# [a; (i:interest_account:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]  
# [a; (i:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Possible si `interest_account` est un sous-type de `account` ;
- Dans la liste, l'objet `i` possède toujours la méthode `interest` mais elle ne peut plus être utilisée ;
- Du point de vue de la sûreté d'exécution, c'est incorrect de vouloir l'utiliser et ça n'est donc pas une contrainte !

Sous-typage

Utiliser le sous-typage explicite

```
# [a; (i:interest_account:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]  
# [a; (i:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Possible si `interest_account` est un sous-type de `account` ;
- Dans la liste, l'objet `i` possède toujours la méthode `interest` mais elle ne peut plus être utilisée ;
- Du point de vue de la sûreté d'exécution, c'est incorrect de vouloir l'utiliser et ça n'est donc pas une contrainte !

Sous-typage

Utiliser le sous-typage explicite

```
# [a; (i:interest_account:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]  
# [a; (i:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Possible si `interest_account` est un sous-type de `account` ;
- Dans la liste, l'objet `i` possède toujours la méthode `interest` mais elle ne peut plus être utilisée ;
- Du point de vue de la sûreté d'exécution, c'est incorrect de vouloir l'utiliser et ça n'est donc pas une contrainte !

Sous-typage

Utiliser le sous-typage explicite

```
# [a; (i:interest_account:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]  
# [a; (i:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Possible si `interest_account` est un sous-type de `account` ;
- Dans la liste, l'objet `i` possède toujours la méthode `interest` mais elle ne peut plus être utilisée ;
- Du point de vue de la sûreté d'exécution, c'est incorrect de vouloir l'utiliser et ça n'est donc pas une contrainte !

Sous-typage

Utiliser le sous-typage explicite

```
# [a; (i:interest_account:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]  
# [a; (i:>account)];;  
- : account list = [<obj>; <obj>]
```

- Possible si `interest_account` est un sous-type de `account` ;
- Dans la liste, l'objet `i` possède toujours la méthode `interest` mais elle ne peut plus être utilisée ;
- Du point de vue de la sûreté d'exécution, c'est incorrect de vouloir l'utiliser et ça n'est donc pas une contrainte !

Sous-typage

Sous-typage structurel (approximation)

Un type d'objet A est un sous-type d'un type d'objet B :

- Si A et B sont égaux ;
- Ou si chaque méthode de B est une méthode de A avec le même type.

Notez bien

- On ne regarde pas le nom des classes ;
- Conséquence immédiate : sous-type \nRightarrow sous-classe.

Dans l'exemple

D'après cette définition :

- `interest_account` est bien un sous-type de `account`.

Sous-typage

Sous-typage en profondeur

Un type d'objet A est un sous-type d'un type d'objet B :

- Si A et B sont égaux ;
- Ou si chaque méthode de B de type τ_B est une méthode de A avec le type τ_A tel que τ_A est un sous-type de τ_B .

Sous-typage entre types fonctionnels (Reynolds, Cardelli)

Le type $D_A \rightarrow I_A$ est un sous-type de $D_B \rightarrow I_B$ si :

- I_A est un sous-type de I_B : on peut agrandir l'image (covariance de l'image) ;
- D_B est un sous-type de D_A : on peut rétrécir le domaine (contravariance du domaine).

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# class operations1 =  
  object  
    method op (a : account) = new interest_account a#get  
  end;;  
class operations1 : object  
  method op : account → interest_account end  
# class operations2 =  
  object  
    method op (a : interest_account) = new account a#get  
  end;;  
class operations2 : object  
  method op : interest_account → account end
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# class operations1 =  
  object  
    method op (a : account) = new interest_account a#get  
  end;;  
class operations1 : object  
  method op : account → interest_account end  
# class operations2 =  
  object  
    method op (a : interest_account) = new account a#get  
  end;;  
class operations2 : object  
  method op : interest_account → account end
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# class operations1 =  
  object  
    method op (a : account) = new interest_account a#get  
  end;;  
class operations1 : object  
  method op : account → interest_account end  
# class operations2 =  
  object  
    method op (a : interest_account) = new account a#get  
  end;;  
class operations2 : object  
  method op : interest_account → account end
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# class operations1 =  
  object  
    method op (a : account) = new interest_account a#get  
  end;;  
class operations1 : object  
  method op : account → interest_account end  
# class operations2 =  
  object  
    method op (a : interest_account) = new account a#get  
  end;;  
class operations2 : object  
  method op : interest_account → account end
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
  val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
  val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```


Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```

Sous-typage

Sous-typage en profondeur et fonctionnel

```
# let o1 = new operations1;;  
val o1 : operations1 = <obj>  
# let o2 = new operations2;;  
val o2 : operations2 = <obj>  
# [(o1:>operations2); o2];;  
- : operations2 list = [<obj>; <obj>]
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# class point ((xi, yi) : int * int) =  
object  
  val x = xi  
  val y = yi  
  method get_x = x  
  method get_y = y  
end;;
```

```
class point :  
  int * int →  
  object val x : int val y : int method get_x : int  
    method get_y : int end
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# class point ((xi, yi) : int * int) =  
object  
  val x = xi  
  val y = yi  
  method get_x = x  
  method get_y = y  
end;;  
  
class point :  
  int * int →  
  object val x : int val y : int method get_x : int  
    method get_y : int end
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# class color (c : string) =  
object  
  val color = c  
  method get_color = c  
end;;  
class color :  
  string →  
  object val color : string method get_color : string end
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# class color (c : string) =  
  object  
    val color = c  
    method get_color = c  
  end;;  
class color :  
  string →  
  object val color : string method get_color : string end
```


Héritage multiple

Points colorés

```
# class colored_point (xi , yi) c =  
object (self)  
  inherit point (xi , yi)  
  inherit color c  
  method get = (self#get_x, self#get_y, self#get_color)  
end;;
```

Héritage multiple

Points colorés

```
class colored_point :  
  int * int →  
  string →  
  object  
    val color : string  
    val x : int  
    val y : int  
    method get : int * int * string  
    method get_color : string  
    method get_x : int  
    method get_y : int  
  end
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")
```

Héritage multiple

Points colorés

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# class point ((xi, yi) : int * int) =  
object  
  val x = xi  
  val y = yi  
  method get_x = x  
  method get_y = y  
  method print =  
    print_string "(";  
    print_int x;  
    print_string ", ";  
    print_int y;  
    print_endline ")"  
end;;
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
class point :  
  int * int →  
  object  
    val x : int  
    val y : int  
    method get_x : int  
    method get_y : int  
    method print : unit  
  end
```


Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# class color (c : string) =  
  object  
    val color = c  
    method get_color = c  
    method print = print_endline ("Color:␣" ^ c)  
  end;;  
class color :  
  string →  
  object val color : string method get_color : string  
    method print : unit end
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# class color (c : string) =  
  object  
    val color = c  
    method get_color = c  
    method print = print_endline ("Color:␣" ^ c)  
  end;;  
class color :  
  string →  
  object val color : string method get_color : string  
    method print : unit end
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# class colored_point (xi , yi) c =  
object (self)  
  inherit point (xi , yi)  
  inherit color c  
  method get = (self#get_x, self#get_y, self#get_color)  
end;;
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
class colored_point :  
  int * int →  
  string →  
  object  
    val color : string  
    val x : int  
    val y : int  
    method get : int * int * string  
    method get_color : string  
    method get_x : int  
    method get_y : int  
    method print : unit  
  end
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```


Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#get;;  
- : int * int * string = (1, 2, "blue")  
# cp#print;;  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# class colored_point (xi , yi) c =  
object (self)  
  inherit point (xi , yi) as point_super  
  inherit color c as color_super  
  method get = (self#get_x, self#get_y, self#get_color)  
  method print = point_super#print; color_super#print  
end;;
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
class colored_point :  
  int * int →  
  string →  
  object  
    val color : string  
    val x : int  
    val y : int  
    method get : int * int * string  
    method get_color : string  
    method get_x : int  
    method get_y : int  
    method print : unit  
  end
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#print;;  
(1, 2)  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#print;;  
(1, 2)  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#print;;  
(1, 2)  
Color: blue  
- : unit = ()
```

Héritage multiple

Avec deux méthodes de même nom dans les super-classes

```
# let cp = new colored_point (1, 2) "blue";;  
val cp : colored_point = <obj>  
# cp#print;;  
(1, 2)  
Color: blue  
- : unit = ()
```