Programmation Fonctionnelle
Cours 01 et 02

Michele Pagani

Université Paris Diderot
UFR Informatique
Laboratoire Preuves, Programmes et Systèmes

michele.pagani@pps.univ-paris-diderot.fr

15 et 19 septembre 2016

Organisation

Intervenants:

CM: Michele Pagani,
michele.pagani@pps.univ-paris-diderot.fr,
lundi 10h00-12h00, Amphi 2A

TP INFO1: Vincent Padovani,
padovani@pps.univ-paris-diderot.fr,
mardi 9h30-12h30, Salle 2031

TP INFO2: Peter Habermehl,
peter.habermehl@liafa.univ-paris-diderot.fr,
mercredi 9h30-12h30, Salle 2001

TP INFO3: Antonio Bucciarelli,
antonio.bucciarelli@pps.univ-paris-diderot.fr,
vendredi 9h30-12h30, Salle 2003

TP MI: Gabriel Radanne,
gabriel.radanne@pps.univ-paris-diderot.fr,
lundi 13h30-16h30, Salle 2001

Contrôle de connaissances

- Contrôle Continu :

$$\mathrm{CC} = \mathrm{qcm}\ (?) + \mathrm{projet}$$

- Première session :

$$55\% * \mathrm{exam1} + 45\% * \mathrm{CC}$$

- Deuxième session :

$$55\% * \mathrm{exam2} + 45\% * \mathrm{CC}$$

Attention ! Le projet est obligatoire et compte dans les deux sessions !

Contrôle de connaissances

- Contrôle Continu :

$$\mathrm{CC} = \mathrm{qcm}\ (?) + \mathrm{projet}$$

- Première session :

$$55\% * \mathrm{exam1} + 45\% * \mathrm{CC}$$

- Deuxième session :

$$55\% * \mathrm{exam2} + 45\% * \mathrm{CC}$$

Attention ! Le projet est obligatoire et compte dans les deux sessions !

Contrôle continu

QCM :

- probablement la semaine après la pause de la Toussaint

  à confirmer !
- absence = 0
- plagiats = 0 + procès-verbal

PROJET :

- à rendre sur Moodle le jeudi 5 janvier
- À faire en binôme, mais...

  attention: soutenance et note individuelles !
- absence = 0
- plagiats = 0 + procès-verbal
- Plus sur l'organisation du projet : voir les TP

Organisation

- Page web: sur Moodle: PF5 - Programmation Fonctionnelle

Inscrivez vous !

- Support : copies des transparents
  - ce n'est pas un livre !
  - il ne suffit pas. . .
- Il est indispensable d'assister au cours et au TP, et de faire le projet (obligatoire).
- Il y a des ressources en ligne (voir plus tard)

Organisation

- Page web: sur Moodle: PF5 - Programmation Fonctionnelle

Inscrivez vous !

- Support : copies des transparents
  - ce n'est pas un livre !
  - il ne suffit pas...
- Il est indispensable d'assister au cours et au TP, et de faire le projet (obligatoire).
- Il y a des ressources en ligne (voir plus tard)

Organisation

- Page web: sur Moodle: PF5 - Programmation Fonctionnelle

Inscrivez vous !

- Support : copies des transparents
  - ce n'est pas un livre !
  - il ne suffit pas...
- Il est indispensable d'assister au cours et au TP, et de faire le projet (obligatoire).
- Il y a des ressources en ligne (voir plus tard)

Organisation

- Page web: sur Moodle: PF5 - Programmation Fonctionnelle

Inscrivez vous !

- Support : copies des transparents
  - ce n'est pas un livre !
  - il ne suffit pas...
- Il est indispensable d'assister au cours et au TP, et de faire le projet (obligatoire).
- Il y a des ressources en ligne (voir plus tard)

Qu'est-ce que la programmation fonctionnelle ?

Deux styles face à face

Style impératif

```
1  static int gcd(int m, int n){
2  int aux;
3  while (m != 0) {
4       aux = m;
5       m = n % m;
6       n = aux;
7  }
8  return n;
9  }
```

- programme: séquence structurée d'instructions modifiant l'état de la machine
- évaluer: exécuter les instructions les unes après les autres jusqu'au point de sortie

Style fonctionnel

```
1  let rec gcd(m,n) =
2    if m=0 then n
3    else gcd(n mod m, m)
```

- programme: expression définissante une fonction
- évaluer: réécrire une expression jusqu'à obtenir une valeur

comme en math:
$(2 + 3) * 4 = 5 * 4 = 20$

Deux styles face à face

Style impératif

```
1  static int gcd(int m, int n){
2  int aux;
3  while (m != 0) {
4       aux = m;
5       m = n % m;
6       n = aux;
7  }
8  return n;
9  }
```

- programme: séquence structurée d'instructions modifiant l'état de la machine
- évaluer: exécuter les instructions les unes après les autres jusqu'au point de sortie

Style fonctionnel

```
1  let rec gcd(m,n) =
2    if m=0 then n
3    else gcd(n mod m, m)
```

- programme: expression définissante une fonction
- évaluer: réécrire une expression jusqu'à obtenir une valeur

comme en math:
$(2 + 3) * 4 = 5 * 4 = 20$

Deux styles face à face

Style impératif

```
1  static int gcd(int m, int n){
2  int aux;
3  while (m != 0) {
4       aux = m;
5       m = n % m;
6       n = aux;
7  }
8  return n;
9  }
```

- programme: séquence structurée d'instructions modifiant l'état de la machine
- évaluer: exécuter les instructions les unes après les autres jusqu'au point de sortie

Style fonctionnel

```
1  let rec gcd(m,n) =
2    if m=0 then n
3    else gcd(n mod m, m)
```

- programme: expression définissante une fonction
- évaluer: réécrire une expression jusqu'à obtenir une valeur

comme en math:
$(2 + 3) * 4 = 5 * 4 = 20$

Style impératif

```
1  static int gcd(int m, int n){
2  int aux;
3  while (m != 0) {
4        aux = m;
5        m = n % m;
6        n = aux;
7  }
8  return n;
9  }
```

PC	m	n	
1	4	6	aux
2	4	6	0
3	4	6	0
4	4	6	4
5	2	6	4
6	2	4	4
7	2	4	4
3	2	4	4
4	2	4	2
5	0	4	2
6	0	2	2
7	0	2	2
3	0	2	2
8	0	2	2

Style fonctionnel

```
1  let rec gcd(m,n) =
2    if m=0 then n
3    else gcd(n mod m, m)
```

$$
\begin{aligned}
\texttt{gcd (4,6)} &\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{if m=0 then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{if 4=0 then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{if false then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{gcd(6 mod 4, 4)} \\
&\xrightarrow[n=6]{m=4,} \texttt{gcd(2, 4)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{if m=0 then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{if 2=0 then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{if false then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{gcd(4 mod 2, 2)} \\
&\xrightarrow[n=4]{m=2,} \texttt{gcd(0, 2)} \\
&\xrightarrow[n=2]{m=0,} \texttt{if 0=0 then n else gcd(n mod m, m)} \\
&\xrightarrow[n=2]{m=0,} n \xrightarrow{m=0,\ n=2} 2
\end{aligned}
$$

Qu'est-ce qu'on gagne ?

- Les fonctions sont des données de première classe: elles peuvent être retournées en résultat et passées en argument à d'autres fonctions
- Permet d'écrire des programmes qui sont plus proche au problème donné
- Favorise la vérification (même automatique) des comportements des programmes
- . . . et cela souvent sans perte d'efficacité

Qu'est-ce qu'on gagne ?

- Les fonctions sont des données de première classe: elles peuvent être retournées en résultat et passées en argument à d'autres fonctions
- Permet d'écrire des programmes qui sont plus proche au problème donné
- Favorise la vérification (même automatique) des comportements des programmes
- ... et cela souvent sans perte d'efficacité

Qu'est-ce qu'on gagne ?

- Les fonctions sont des données de première classe: elles peuvent être retournées en résultat et passées en argument à d'autres fonctions
- Permet d'écrire des programmes qui sont plus proche au problème donné
- Favorise la vérification (même automatique) des comportements des programmes
- ... et cela souvent sans perte d'efficacité

Qu'est-ce qu'on gagne ?

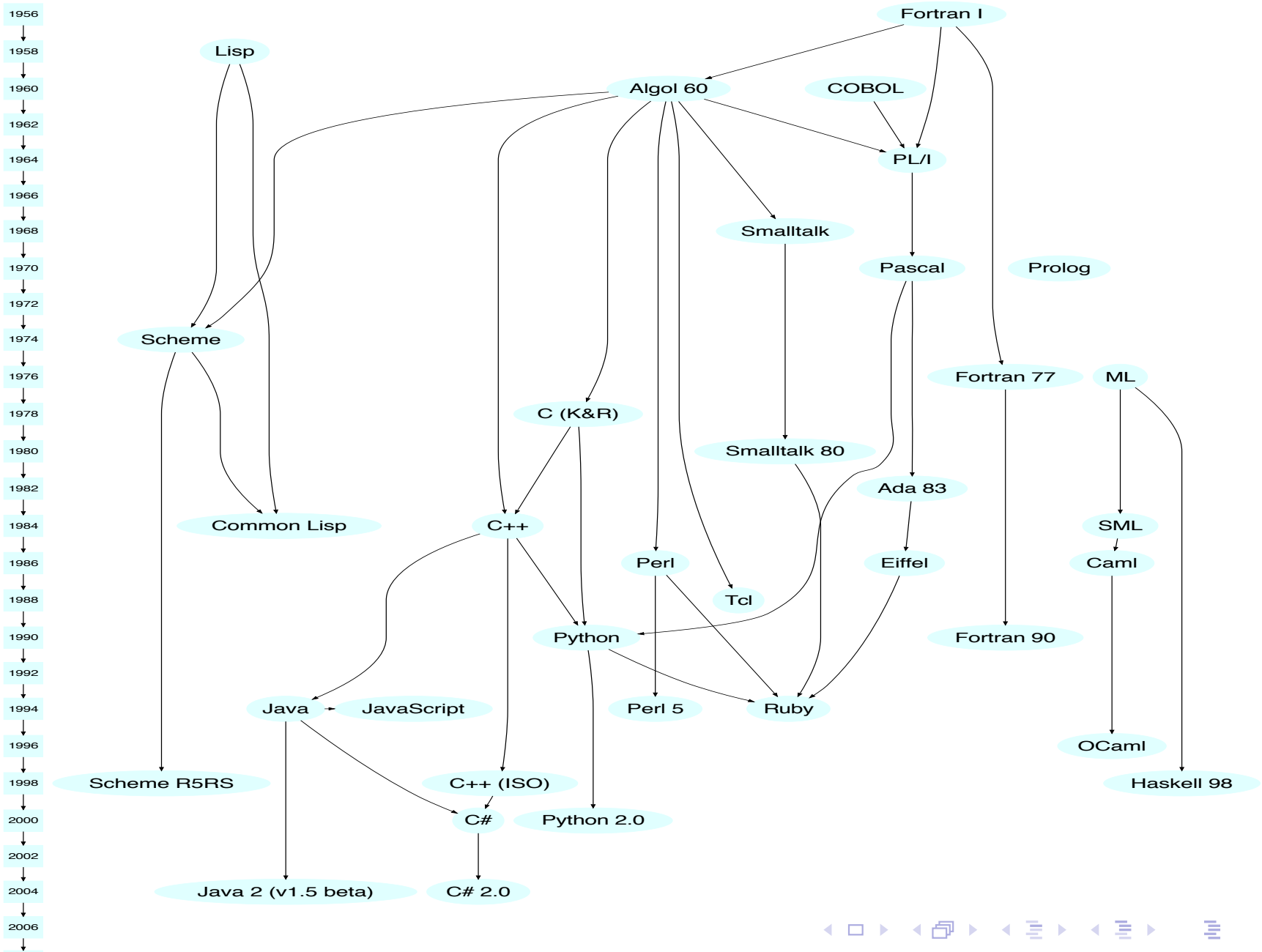
- Les fonctions sont des données de première classe: elles peuvent être retournées en résultat et passées en argument à d'autres fonctions
- Permet d'écrire des programmes qui sont plus proche au problème donné
- Favorise la vérification (même automatique) des comportements des programmes
- . . . et cela souvent sans perte d'efficacité

Qu'est-ce qu'on gagne ?

- Les fonctions sont des données de première classe: elles peuvent être retournées en résultat et passées en argument à d'autres fonctions
- Permet d'écrire des programmes qui sont plus proche au problème donné
- Favorise la vérification (même automatique) des comportements des programmes
- ... et cela souvent sans perte d'efficacité

Le langage OCaml

Où on est


1956
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984
1986
1988
1990
1992
1994
1996
1998
2000
2002
2004
2006
Fortran I
Lisp
Algol 60
COBOL
PL/I
Smalltalk
Pascal
Prolog
Scheme
Fortran 77
ML
C (K&R)
Smalltalk 80
Ada 83
Common Lisp
C++
SML
Perl
Eiffel
Caml
Tcl
Python
Fortran 90
Java
JavaScript
Perl 5
Ruby
OCaml
Scheme R5RS
C++ (ISO)
Haskell 98
C#
Python 2.0
Java 2 (v1.5 beta)
C# 2.0

Qui a créé OCaml?

OCaml (Objective Caml) est le fruit de développements continus:

1975 R. Milner propose ML comme métalangage pour l'assistant de preuve LCF OCaml

1980 Projet Formel à l'INRIA (G. Huet), Categorical Abstract Machine (P. L. Curien) OCaml

1985 Développement de Caml à l'INRIA et, en parallèle, de Standard ML à Édimbourg, de SML à New-Jersey, de Lazy ML à Chalmers, de Haskell à Glasgow, etc.

1990 Implantation de Caml-Light par X. Leroy et D. Doligez

1995 Compilateur vers du code natif + système de modules

1996 Object et classes OCaml

2002 Méthodes polymorphes, librairies partagées, etc.

2003 Modules récursifs, private types, etc.

Spécificités d'OCaml

Haut niveau

- fonctions fournissent mécanisme d'abstraction puissant
- gestion mémoire automatique (comme JAVA)

Multi-paradigme

- styles fonctionnel, impératif, orientée objet
- graphisme, applications réseaux, ...

Système de typage

- capture beaucoup d'erreurs
- types synthétisés automatiquement par le compilateur
- permet reutilisation du code grâce au polymorphisme

Performance

- génération de code efficace

Spécificités d'OCaml

Haut niveau

- fonctions fournissent mécanisme d'abstraction puissant
- gestion mémoire automatique (comme JAVA)

Multi-paradigme

- styles fonctionnel, impératif, orientée objet
- graphisme, applications réseaux, ...

Système de typage

- capture beaucoup d'erreurs
- types synthétisés automatiquement par le compilateur
- permet reutilisation du code grâce au polymorphisme

Performance

- génération de code efficace

Spécificités d'OCaml

Haut niveau

- fonctions fournissent mécanisme d'abstraction puissant
- gestion mémoire automatique (comme JAVA)

Multi-paradigme

- styles fonctionnel, impératif, orientée objet
- graphisme, applications réseaux, ...

Système de typage

- capture beaucoup d'erreurs
- types synthétisés automatiquement par le compilateur
- permet reutilisation du code grâce au polymorphisme

Performance

- génération de code efficace

Spécificités d'OCaml

Haut niveau

- fonctions fournissent mécanisme d'abstraction puissant
- gestion mémoire automatique (comme JAVA)

Multi-paradigme

- styles fonctionnel, impératif, orientée objet
- graphisme, applications réseaux, ...

Système de typage

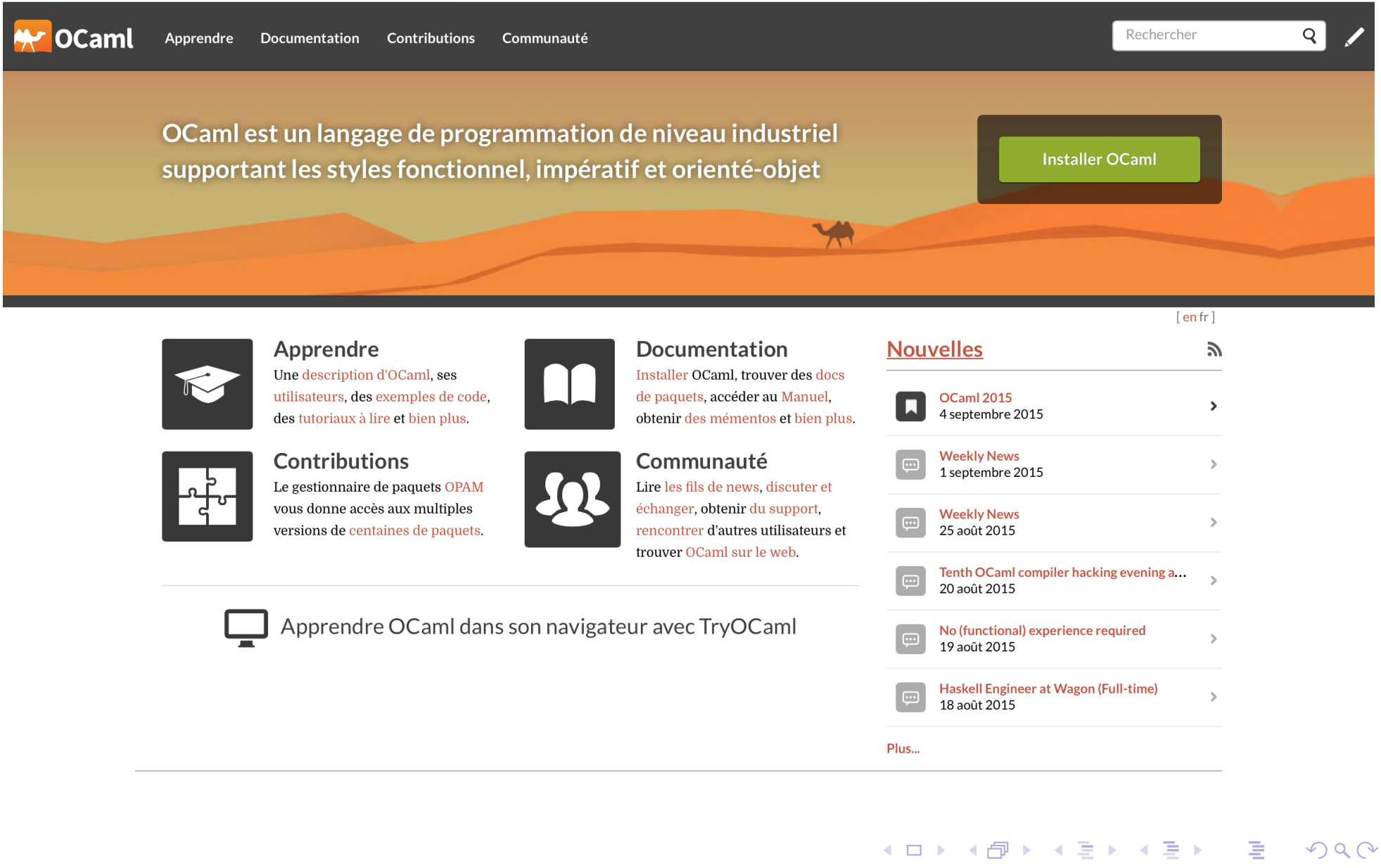
- capture beaucoup d'erreurs
- types synthétisés automatiquement par le compilateur
- permet reutilisation du code grâce au polymorphisme

Performance

- génération de code efficace

Ressources et Bibliographie

http://ocaml.org/index.fr.html



MOOC sur OCAML

https://www.fun-mooc.fr/courses/parisdiderot/56002S02/session02/about

présentation

ABOUT THIS COURSE

Functional programming is a programming paradigm which is rapidly attracting interest from a broad range of developers because it allows to write expressive, concise and elegant programs.

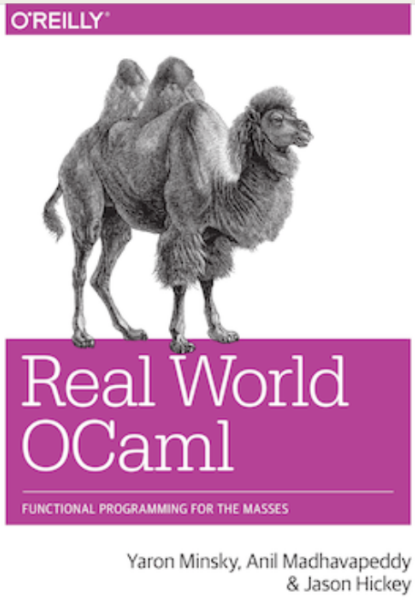
Disponibles gratuitement

- Xavier Leroy et al :
  The Objective Caml system
  `http://caml.inria.fr/pub/docs/manual-ocaml/`
  (Le manual officiel)

- Emmanuel Chailloux, Pascal Manoury et Bruno Pagano :
  Développement d'Applications avec Objective Caml
  O'Reilly, 2000
  `http://caml.inria.fr/pub/docs/oreilly-book/`

Disponibles gratuitement

`https://realworldocaml.org`



Available in print and eBook!

@realworldocaml

Welcome

This is the online home for Real World OCaml. Here you'll find:

- The full **HTML text** of the book.
- **Installation instructions** for the key software that Real World OCaml depends on.
- **API documentation** for many of the libraries that are introduced in the text.

If you enjoy the book, please consider purchasing it in **print** or **ebook** form!

FAQ

Why do I need to provide my Github login details to add comments?

You need a free Github account to make comments on the book. You will be redirected to Github to login to authenticate to the website. When this is complete, you *temporarily* grant us access to your public repositories. However, we do not store your authorization tokens on the server side and instead use a client-side cookie on your browser. To log out, simply delete the cookie.

Autres ouvrages

- John Whitington
  OCaml from the Very Beginning
  Coherent Press, 2013
  (S'adresse plutôt à des débutants)

- Guy Cousineau et Michel Mauny
  Approche fonctionnelle de la programmation
  Dunod, 1995

- Pierre Weis et Xavier Leroy
  Le langage Caml
  Dunod, 1999

. . . enfin, une liste de livres sur la programmation fonctionnelle est maintenue par Alex Ott:
`http://alexott.net/en/fp/books/`

Modes de compilation

Deux façons de travailler avec OCaml

1. compiler (comme en Java, C, ...) :
   - permet d'obténir des exécutables autonomes
   - nécessite une certaine maîtrise du langage
   - existe aussi en OCaml (voir plus tard)

ocamlc	compilateur en ligne de code-octet
ocamlrun	interprète de code-octet
ocamlopt	compilateur en ligne de code natif
js_of_ocaml	compilateur vers JavaScript

2. interagir :
   - permet d'expérimenter avec le langage, et d'observer les effets des requêtes une par une
   - plus adapté pour apprendre un langage

ocaml	lance la boucle d'interaction

Deux façons de travailler avec OCaml

1. compiler (comme en Java, C, ...) :
   - permet d'obténir des exécutables autonomes
   - nécessite une certaine maîtrise du langage
   - existe aussi en OCaml (voir plus tard)

ocamlc	compilateur en ligne de code-octet
ocamlrun	interprète de code-octet
ocamlopt	compilateur en ligne de code natif
js_of_ocaml	compilateur vers JavaScript

2. interagir :
   - permet d'expérimenter avec le langage, et d'observer les effets des requêtes une par une
   - plus adapté pour apprendre un langage

ocaml	lance la boucle d'interaction

Comment lancer l'interpréteur ?

- Dans une shell: `ocaml`
- Mieux: lancer l'interpréteur avec un éditeur de ligne (comme `rlwrap` ou `ledit`)
  `ledit ocaml`
- Encore mieux: dans `emacs` (ou `xemacs`, ou `aquamacs`): utiliser le mode `tuareg`

La boucle d'interaction (ou top-level)

- L'utilisateur tape une requête (on dit encore une phrase) OCaml : une expression terminée par deux points-virgules consécutifs.
- OCaml analyse la syntaxe, affiche un message d'erreur si cette syntaxe est incorrecte.
- Si la syntaxe est correcte, le top-level infère (c'est-à-dire calcule) le type de l'expression, affiche un message d'erreur si l'expression est mal typée.
- Si l'expression est bien typée, le top-level évalue l'expression, puis affiche le type calculé et la valeur obtenue.
- Boucle Read-Eval-Print introduite par LISP.

La boucle d'interaction (ou top-level)

- L'utilisateur tape une requête (on dit encore une phrase) OCaml : une expression terminée par deux points-virgules consécutifs.
- OCaml analyse la syntaxe, affiche un message d'erreur si cette syntaxe est incorrecte.
- Si la syntaxe est correcte, le top-level infère (c'est-à-dire calcule) le type de l'expression, affiche un message d'erreur si l'expression est mal typée.
- Si l'expression est bien typée, le top-level évalue l'expression, puis affiche le type calculé et la valeur obtenue.
- Boucle Read-Eval-Print introduite par LISP.

La boucle d'interaction (ou top-level)

- L'utilisateur tape une requête (on dit encore une phrase) OCaml : une expression terminée par deux points-virgules consécutifs.
- OCaml analyse la syntaxe, affiche un message d'erreur si cette syntaxe est incorrecte.
- Si la syntaxe est correcte, le top-level infère (c'est-à-dire calcule) le type de l'expression, affiche un message d'erreur si l'expression est mal typée.
- Si l'expression est bien typée, le top-level évalue l'expression, puis affiche le type calculé et la valeur obtenue.
- Boucle Read-Eval-Print introduite par LISP.

La boucle d'interaction (ou top-level)

- L'utilisateur tape une requête (on dit encore une phrase) OCaml : une expression terminée par deux points-virgules consécutifs.
- OCaml analyse la syntaxe, affiche un message d'erreur si cette syntaxe est incorrecte.
- Si la syntaxe est correcte, le top-level infère (c'est-à-dire calcule) le type de l'expression, affiche un message d'erreur si l'expression est mal typée.
- Si l'expression est bien typée, le top-level évalue l'expression, puis affiche le type calculé et la valeur obtenue.
- Boucle Read-Eval-Print introduite par LISP.

La boucle d'interaction (ou top-level)

- L'utilisateur tape une requête (on dit encore une phrase) OCaml : une expression terminée par deux points-virgules consécutifs.
- OCaml analyse la syntaxe, affiche un message d'erreur si cette syntaxe est incorrecte.
- Si la syntaxe est correcte, le top-level infère (c'est-à-dire calcule) le type de l'expression, affiche un message d'erreur si l'expression est mal typée.
- Si l'expression est bien typée, le top-level évalue l'expression, puis affiche le type calculé et la valeur obtenue.
- Boucle Read-Eval-Print introduite par LISP.

Exemples (code/examples1.ml)

```
(* correct *)
3*(4+1)-7;;

(* syntax error *)
17 +;;

(* erreur de typage *)
42 + "hello";;

2+3*1;;

5/2;;

-5 mod 3;;
```

Remarques

- C'est le ;; qui termine la requête, pas le saut de ligne. Les sauts de ligne à l'intérieur d'une requête sont des espaces comme les autres.
- Les ;; ne font pas partie de la syntaxe du langage *Caml* lui-même mais sont spécifiques à l'interpréteur.
- Commentaires : entre $(*$ et $*)$, éventuellement sur plusieurs lignes.

Remarques

- C'est le ;; qui termine la requête, pas le saut de ligne. Les sauts de ligne à l'intérieur d'une requête sont des espaces comme les autres.
- Les ;; ne font pas partie de la syntaxe du langage *Caml* lui-même mais sont spécifiques à l'interpréteur.
- Commentaires : entre (* et *), éventuellement sur plusieurs lignes.

Remarques

- C'est le ;; qui termine la requête, pas le saut de ligne. Les sauts de ligne à l'intérieur d'une requête sont des espaces comme les autres.
- Les ;; ne font pas partie de la syntaxe du langage *Caml* lui-même mais sont spécifiques à l'interpréteur.
- Commentaires : entre (* et *), éventuellement sur plusieurs lignes.

Premiers pas en OCaml

Premiers pas en OCaml

1. types de base
   - int , float , bool, char, string
2. déclaration des valeurs
   - **let** nom = expr
   - **let** nom = expr1 **in** expr2
3. fonctions
   - **function** var -> expr
   - **fun** var1 ... varn -> expr
4. déclaration des valeurs
   - **let** f var1 ... varn = expr
   - **let** **rec** f var1 ... varn = expr
   - **let** nom1 = expr1 **and** ... **and** nomn = exprn

Premiers pas en OCaml

1. types de base
   - int , float , bool, char, string
2. déclaration des valeurs
   - **let** nom = expr
   - **let** nom = expr1 **in** expr2
3. fonctions
   - **function** var -> expr
   - **fun** var1 ... varn -> expr
4. déclaration des valeurs
   - **let** f var1 ... varn = expr
   - **let** **rec** f var1 ... varn = expr
   - **let** nom1 = expr1 **and** ... **and** nomn = exprn

int

valeurs: $\ldots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots$

opérateurs:

- $+$: addition (infixe)
- $-$: soustraction (infixe)
- $*$: moltiplication (infixe)
- / : division entière (infixe)
- mod : reste de la division entière (infixe)
- ...

int (exemples)

```
# 3 + 4 * 2;;
- : int = 11

# (3 + 4) * 2;;
- : int = 14

# mod (3+4) 2;;
  ^^^
Error: Syntax error

# (3+4) mod 2;;
- : int = 1
```

float

valeurs: $\ldots, -2.0, 3.14, 5e3, 6e{-}9 \ldots$

opérateurs: arithmetiques

$+.$, $-.$, $*.$, $/.$

attention ! opérateurs typés: sur float les opérateurs arithmétiques s'écrivent avec un point

réels

sin, sqrt, log, ceil, floor, ...

conversion: il y a des fonctions de conversion entre int et float

```
# float_of_int;;
- : int -> float = <fun>
# (float);;
- : int -> float = <fun>
# int_of_float;;
- : float -> int = <fun>
```

float (exemples)

```
# sin (2.0/.3.0);;
- : float = 0.618369803069737
# 3.0 +.2.5;;
- : float = 5.5
# 3.0 + 2.5;;
  ^^^
Error: This expression has type float but an expression
was expected of type int

# int_of_float 3.0 + int_of_float 2.5;;
- : int = 5

# 3+.2.5;;
  ^
Error: This expression has type int but an expression
was expected of type float

# float_of_int 3 +. 2.5;;
- : float = 5.5
```

float

valeurs: $\ldots, -2.0, 3.14, 5e3, 6e{-}9 \ldots$

opérateurs: arithmetiques

$+.$, $-.$, $*.$, $/.$

attention ! opérateurs typés: sur float les opérateurs arithmétiques s'écrivent avec un point

réels

sin, sqrt, log, ceil, floor, ...

conversion: il y a des fonctions de conversion entre int et float

```
# float_of_int;;
- : int -> float = <fun>
# (float);;
- : int -> float = <fun>
# int_of_float;;
- : float -> int = <fun>
```

float (exemples)

```
# sin (2.0/.3.0);;
- : float = 0.618369803069737
# 3.0 +.2.5;;
- : float = 5.5
# 3.0 + 2.5;;
  ^^^
Error: This expression has type float but an expression
was expected of type int

# int_of_float 3.0 + int_of_float 2.5;;
- : int = 5

# 3+.2.5;;
  ^
Error: This expression has type int but an expression
was expected of type float

# float_of_int 3 +. 2.5;;
- : float = 5.5
```

bool

valeurs: true, false

opérateurs: logiques

- **not** : négation
- &&, & : et séquentiel (infixe)
- ||, **or** : ou séquentiel (infixe)

comparaison

- = : égalité (infixe, à détaillé plus tard)
- >, >= : plus grand, plus grand ou égale (infixe)
- <, <= : plus petit, plus petit ou égale (infixe)

conditionnel: **if** cond **then** e1 **else** e2

- cond est une expression de type bool
- e1 et e2 sont deux expressions de même type, qui est aussi le type du conditionel
- seulement une des deux branches e1 et e2 est évaluée.

bool (exemples)

```
# not false && false;;
- : bool = false
# not (false && false);;
- : bool = true
# true = false;;
- : bool = false
# 3 = 3;;
- : bool = true
# 4 + 5 >= 10;;
- : bool = false
# 2.0 *. 4.0 >= 7.0;;
- : bool = true

# if (3<4) then 1 else 0;;
  - : int = 1
# if (4<3) then 1 else 0;;
  - : int = 0
```

bool

valeurs: true, false

opérateurs: logiques

- **not** : négation
- &&, & : et séquentiel (infixe)
- ||, **or** : ou séquentiel (infixe)

comparaison

- = : égalité (infixe, à détaillé plus tard)
- >, >= : plus grand, plus grand ou égale (infixe)
- <, <= : plus petit, plus petit ou égale (infixe)

conditionnel: **if** cond **then** e1 **else** e2

- cond est une expression de type bool
- e1 et e2 sont deux expressions de même type, qui est aussi le type du conditionel
- seulement une des deux branches e1 et e2 est évaluée.

bool (exemples)

```
# not false && false;;
- : bool = false
# not (false && false);;
- : bool = true
# true = false;;
- : bool = false
# 3 = 3;;
- : bool = true
# 4 + 5 >= 10;;
- : bool = false
# 2.0 *. 4.0 >= 7.0;;
- : bool = true

# if (3<4) then 1 else 0;;
  - : int = 1
# if (4<3) then 1 else 0;;
  - : int = 0
```

char

valeurs: caractères ASCII (écrits entre apostrophes ')
(*American Standard Code Information Interchange*)
'a', 'z', ' ','W'

échappement:

- \\ : antislash (\)
- \n : saut de ligne (line feed)
- \t : tabulation
- *ddd* : le caractère avec le code ASCII *ddd* en décimal
- \' : apostrophe (')

fonct. convers.:

- Char.code: char -> int
- Char.chr: int -> char
- Char.lowercase: char -> char
- Char.uppercase: char -> char

Voir manual (module `Char`) pour une liste complète.

char (exemples)

```
# 'a';;
- : char = 'a'

# Char.code 'a';;
- : int = 97

# '\097';;
- : char = 'a'

# '\97';;
    ^^
Error: Illegal backslash escape in string or character (\9)

# Char.uppercase 'a';;
- : char = 'A'

# Char.uppercase '[';;
- : char = '['
```

string

valeurs: chaînes de caractères (écrites entre guillemets ")
"Hello", "a", "␣","\097␣est␣a"

string ≠ char:
```
# "Hello".[1];;
- : char = 'e'

# "Hell"^'o';;
          ^^^
Error: This expression has type char but an
       expression was expected of type string
```

concatenation:
```
# "Hello␣"^"World";;
- : string = "Hello␣World"
```

autres fonct.:

- String.length: string -> int
- String.get: string -> int -> char
- String.make: int -> char -> string
- String.sub: string -> int -> int -> string

Voir manual (module `String`) pour une liste complète.

string (exemples)

```
# "\097 est a";;
- : string = "a est a"

# "\097\"".[1];;
- : char = '"'

# String.length "hello";;
- : int = 5

# "hello".[0];;
- : char = 'h'

# "hello".[5];;
Exception: Invalid_argument "index out of bounds".

# String.make 10 'a';;
- : string = "aaaaaaaaaa"
```

Premiers pas en OCaml

1. types de base
   - int , float , bool, char, string
2. déclaration des valeurs
   - **let** nom = expr
   - **let** nom = expr1 **in** expr2
3. fonctions
   - **function** var -> expr
   - **fun** var1 ... varn -> expr
4. déclaration des valeurs
   - **let** f var1 ... varn = expr
   - **let rec** f var1 ... varn = expr
   - **let** nom1 = expr1 **and** ... **and** nomn = exprn

let nom = expr

- est une déclaration qui associe à `nom` la valeur de l'expression `expr`, qui peut donc être réutilisé dans les expressions suivantes:

```
# let x = 2 + 3;;
val x : int = 5
# x * 3;;
- : int = 15
# let y = x+1;;
val y : int = 6
```

- attention, le nom est associé à la valeur et pas à l'expression:

```
# let z = 6-1;;
val z : int = 5
# x = z;;
- : bool = true
```

- une déclaration peut être écrasée par une autre déclaration:

```
#let x = 0;;
val x : int = 0
# (*attention, la valeur de y ne change pas*)
y;;
- : int = 6
# let z = x+1;;
val z : int = 1
```

let nom = expr1 **in** expr2

- permet une déclaration locale de `nom` à l'intérieur de `expr2`:

```
# let x = 3 in x+4;;
- : int = 7
# let y=x+4;;
        ^^^
Error: Unbound value x
```

- un nom déclaré par **let** (ou **let rec**) est par contre connu dans toutes les expressions qui suivent la déclaration:

```
# let x = 3;;
val x : int = 3
# x+4;;
- : int = 7
# let y=x+4;;
val y : int = 7
```

- une déclaration locale peut redéfinir localement un nom global

```
# let x = 2;;
val x : int = 2
# let x = 3 in x;;
- : int = 3
# x;;
- : int = 2
```

Visibilité des liaisons

```
let x = 1;;
⋮                    } x = 1
let x = 2 in
  ⋮                  } x = 2
  let x = 3 in
    ⋮                } x = 3
  ⋮                  } x = 2
⋮                    } x = 1
```

Seulement la liaison la plus locale est visible.

Premiers pas en OCaml

1. types de base
   - int , float , bool, char, string
2. déclaration des valeurs
   - **let** nom = expr
   - **let** nom = expr1 **in** expr2
3. fonctions
   - **function** var -> expr
   - **fun** var1 ... varn -> expr
4. déclaration des valeurs
   - **let** f var1 ... varn = expr
   - **let** **rec** f var1 ... varn = expr
   - **let** nom1 = expr1 **and** ... **and** nomn = exprn

function var -> expr

- définit une fonction qui prend un argument, dénoté par le paramètre `var`, et qui renvoie comme résultat la valeur de l'expression `expr`.

```
# function x -> x+1;;
- : int -> int = <fun>
```

- l'application d'une fonction à un argument évalue dans le résultat obtenu en remplaçant `var` dans `expr` avec la valuer de l'argument.

```
# (function x -> x+1)2;;
- : int = 3
```

- un argument peut être une expression complexe:

```
# (function x -> x+1)(3+2-1);;
- : int = 5
# (function x -> x+1)((function x -> x+1)1);;
- : int = 3
```

- attention, l'application associe à gauche:

```
# (function x -> x+1)(function x -> x+1)1;;
              ^^^
Error: This function has type int -> int
It is applied to too many arguments.
```

function var −> expr (types)

- le type d'une fonction est t1 −> t2, où t1 est le type de l'argument et t2 est le type du résultat de la fonction.

```
# function x -> x+1;;
- : int -> int = <fun>
```

- le type est déterminé en utilisant des informations dans l'expression `expr`, et peut être polymorphe. (⇒ plus tard)

```
# function x -> x +. 1.;;
- : float -> float = <fun>
# function x -> x > 0.;;
- : float -> bool = <fun>
# function x -> x > 0;;
- : int -> bool = <fun>
# function x -> x;;
- : 'a -> 'a = <fun>
```

- bien sur, l'application doit respecter le type de la fonction.

```
# (function x -> x+1)2. ;;
                    ^^^
Error: This expression has type float but an expression
       was expected of type int
```

et si on a plusieurs arguments ?

- on les aligne !

```
# function x -> function y -> x+y;;
- : int -> int -> int = <fun>

# (function x -> function y -> x+y)2 3;;
- : int = 5
```

- OCaml fournit aussi une syntaxe simplifiée:

fun var1 ... varn −> expr

est équivalent à

function var1 −> ... **function** varn −> expr

```
# fun x y -> x+y;;
- : int -> int -> int = <fun>

# (fun x y -> x+y)2 3;;
- : int = 5
```

les fonctions: données de première classe !

- l'argument d'une fonction peut être une fonction.

```
# function f -> f(f(2));;
- : (int -> int) -> int = <fun>
# (function f -> f(f(2)))(function x -> x+1);;
- : int = 4
```

- l'implication associe à droite: attention aux parentheses !

```
# fun x y -> x + y;;
- : int -> int -> int = <fun>
```

- le résultat de l'évaluation d'une fonction peut être une autre fonction (évaluation partielle)

```
# (fun x y -> x + y) 1;;
- : int -> int = <fun>
```

Exemples

```
# fun x -> x*2;;
- : int -> int = <fun>
# function x -> x*2;;
- : int -> int = <fun>
# fun x y -> x*y;;
- : int -> int -> int = <fun>
# (fun x -> x*2) 3;;
- : int  = 6
# (fun x y -> x*y) 3;;
- : int -> int = <fun>
# (fun x y -> x*y) 3 2;;
- : int  = 6
# fun f -> (f(f2));;
- : (int -> int) -> int = <fun>
# (fun f x -> f (f x)) (fun x -> x*x);;
- : int -> int = <fun>
# (fun f x -> f (f x)) (fun x -> x*x) 2;;
- : int = 16
```

Premiers pas en OCaml

1. types de base
   - int , float , bool, char, string
2. déclaration des valeurs
   - **let** nom = expr
   - **let** nom = expr1 **in** expr2
3. fonctions
   - **function** var -> expr
   - **fun** var1 ... varn -> expr
4. déclaration des valeurs
   - **let** f var1 ... varn = expr
   - **let** **rec** f var1 ... varn = expr
   - **let** nom1 = expr1 **and** ... **and** nomn = exprn

Déclarer les fonctions

- on peut donner, en particulier, un nom aux fonctions

```
# let f = (fun x -> x * 2);;
val f : int -> int = <fun>
# f 3;;
- : int = 6
#  let g = fun y -> let f = fun x -> x*x in f (f y);;
val g : int -> int = <fun>
# g 2;;
- : int = 16
```

- OCaml fournit aussi une syntaxe simplifiée:

let nom var1 ... varn = expr

est équivalent à

let nom = **fun** var1 ... varn -> expr

```
# let f x = x *2;;
val f : int -> int = <fun>
# let g y = let f x = x*x in f (f y);;
val g : int -> int = <fun>
# g (f 2);;
- : int = 256
```

Déclarer les fonctions

- on peut donner, en particulier, un nom aux fonctions

```
# let f = (fun x -> x * 2);;
val f : int -> int = <fun>
# f 3;;
- : int = 6
#  let g = fun y -> let f = fun x -> x*x in f (f y);;
val g : int -> int = <fun>
# g 2;;
- : int = 16
```

- OCaml fournit aussi une syntaxe simplifiée:

let nom var1 ... varn = expr

est équivalent à

let nom = **fun** var1 ... varn -> expr

```
# let f x = x *2;;
val f : int -> int = <fun>
# let g y = let f x = x*x in f (f y);;
val g : int -> int = <fun>
# g (f 2);;
- : int = 256
```

let rec nom = **fun** arg1 arg 2... −> expr

- permet une définition récursive d'une fonction nom, c.à-d. nom peut être utilisé dans expr:

```
# let rec fact = fun x -> if (x=0) then 1 else x*fact(x-1);;
val fact : int -> int = <fun>
```

- si on utilise simplement **let** on obtient un error:

```
# let fact = fun x -> if (x=0) then 1 else x*fact(x-1);;
                                            ^^^
Error: Unbound value fact
```

let définit en effet fact dans toutes les expressions qui suivent la déclaration mais pas dans l'expression à droite de **let** fact = **fun** x −>...

- On peut utiliser la syntaxe simplifiée, comme pour **let**

```
# let rec fact x = if (x=0) then 1 else x*fact(x-1);;
val fact : int -> int = <fun>
```

let nom = expr1 **and** nom = expr2

- permet la définition simultanée de plusieurs expressions, séparées par le mot clef **and**:

```
# let a = 3 and b = 3*2 and c = 2.0;;
val a : int = 3
val b : int = 6
val c : float = 2.
```

- En particulier utile pour les définitions de fonctions récursives:

```
let rec even x =
  if (x=0) then true else odd (x-1)
and odd x =
  if (x=0) then false else even (x-1);;
val even : int -> bool = <fun>
val odd : int -> bool = <fun>

# even 4;;
- : bool = true
```

- en effet, l'evaluation de `even 4` enchaîne une alternance d'evaluations:

$$\texttt{even}\,4 \mapsto \texttt{odd}\,3 \mapsto \texttt{even}\,2 \mapsto \texttt{odd}\,1 \mapsto \texttt{even}\,0 \mapsto \texttt{true}$$

Utilité **let in**

Une déclaration locale permet une majore efficacité quand on appelle plusieurs fois la même expression.

- la définition suivante est très inefficace car elle évalue deux fois exp (x/2) dans chaque branche du cas $x > 0$:

```
# let rec exp x =
  if (x = 0) then 1
  else if (x mod 2 = 1) then (exp (x/2)) * (exp (x/2)) * 2
       else (exp (x/2)) * (exp (x/2));;
val exp : int -> int = <fun>
```

- Pour éviter ce type de problèmes on peut définir des noms locaux

```
# let rec exp x =
  if (x = 0) then 1
  else let h =  exp (x/2) in
               if (x mod 2 = 1) then h * h * 2
               else h * h;;
val exp : int -> int = <fun>
```

Utilité **let in**

Une déclaration locale permet une majore efficacité quand on appelle plusieurs fois la même expression.

- la définition suivante est très inefficace car elle évalue deux fois exp (x/2) dans chaque branche du cas $x > 0$:

```
# let rec exp x =
  if (x = 0) then 1
  else if (x mod 2 = 1) then (exp (x/2)) * (exp (x/2)) * 2
       else (exp (x/2)) * (exp (x/2));;
val exp : int -> int = <fun>
```

- Pour éviter ce type de problèmes on peut définir des noms locaux

```
# let rec exp x =
  if (x = 0) then 1
  else let h =  exp (x/2) in
               if (x mod 2 = 1) then h * h * 2
               else h * h;;
val exp : int -> int = <fun>
```