Programmation Objet : Concepts Avancés
Cours 6 : Étude comparée de C#, Python, Scala et O'Caml

Yann Régis-Gianas
yrg@pps.jussieu.fr

PPS - Université Denis Diderot – Paris 7

13 novembre 2009

Comment choisit-on un langage de programmation ?

- Il faut se donner des critères de comparaison :
  - l'expressivité ;
  - les garanties apportées par le système de type ;
  - le ou les paradigmes de programmation qu'ils favorisent ;
  - degré de formalisation, de standardisation ;
  - la pérennité ;
  - l'existence de compilateurs efficaces ;
  - l'existence de bibliothèques ;
  - ...

$\Rightarrow$ Savoir répondre à ces questions permet de déterminer le langage le plus adapté à ces besoins.

Objectif de ce cours

- Dans ce cours, nous allons présenter les spécificités de 4 langages à objets.

- C#(3.0), un langage :
  - impératif et fonctionnel,
  - statiquement typé,
  - à base de classes,
  - à sous-typage nominal,
  - avec inférence des types (faible).
- Python, un langage :
  - impératif et fonctionnel,
  - dynamiquement typé,
  - à base de classes.
- Scala, un langage :
  - impératif et fonctionnel,
  - statiquement typé,
  - à base de classes,
  - à sous-typage nominal,
  - avec inférence des types.
- O'Caml, un langage :
  - impératif et fonctionnel,
  - statiquement typé,
  - à base de classes et de modules,
  - à sous-typage structurel,
  - avec inférence des types.

Pour plus tard . . .

- Nous mettons de côté, pour le moment :
  - la reflexivité proposée par C#, Python et Scala

  ⇒ Ce sera l'objet d'un prochain cours.
  - le polymorphisme paramétrique proposée par C#, O'Caml et Scala

  ⇒ Ce sera l'objet d'un prochain cours.

C#

En deux mots . . .

- C# est un langage de programmation objet développé par Microsoft.
- Il est compilé vers le *Common Language Runtime* (CLR), la plateforme d'exécution de l'environnement .Net. (nous le reverrons lors du cours sur l'interopérabilité).
- Il existe une implémentation libre de C#, appelée Mono.
- C# existe en 3 versions :
  - 1.0 – normalisé par l'ECMA (ECMA-334) en décembre 2001 et par l'ISO/CEI (ISO/CEI 23270) en 2003.
  - 2.0 – normalisé par l'ECMA (ECMA-334) en juin 2006 et par l'ISO/CEI (ISO/IEC 23270 :2006) en septembre 2006.
  - 3.0 – sortie en 2007.
- Si la syntaxe de C# ressemble à celle du C++, ses caractéristiques le rapproche plutôt de Java ou Pascal Objet.

Les types et les valeurs de C#

- C# propose un système de type unifié : comme en JAVA, toutes les valeurs sont des objets (des sous-classes d'une class Object).
- Il y a deux grandes catégories de valeurs :
  - les valeurs de base de type int, bool, ...
  - les valeurs références (stockent des références aux données).
- Ces valeurs sont allouées sur la pile.
- Une instance d'objet est toujours allouée sur le tas.
- Un ramasse-miettes s'occupe de la gestion mémoire.
- Il existe un mode unsafe qui permet de manipuler les adresses des objets sous forme de pointeurs (réservé à une programmation de bas niveau).

Initialisation des variables

- La non initialisation des variables est une source d'erreur inépuisable en programmation impérative.
- En C#, on ne peut pas utiliser une variable tant qu'elle n'est pas initialisé.

```
using System ;
public class Foo {

   public static void Main () {
      int i ;
      Console.WriteLine (i) ;
   }
}
/tmp % smcs notinit.cs
notinit.cs(6,24) : error CS0165 : Use of unassigned local variable 'i'
Compilation failed : 1 error(s), 1 warnings
```

- Si on désire vraiment déclarer une variable non initialisée, il faut lui donner un type annulable (*nullable*). Pour cela, on suffixe le type d'un point d'interrogation.
- Exemple : `int ? i = null ;`

Si toute valeur de type de base est sur la pile, comment partager un simple entier ?

- On utilise souvent des références sur des valeurs de base pour partager des résultats entre fonctions en travaillant en espace constant.
- C# réintroduit le mot-clé de PASCAL ref qui permet de passer un argument (initialisé) par référence :

```
using System ;
public class Foo {
   public static void dincr (ref int i) { i += 2 ; }
   public static void Main () {
      int i = 0 ;
      dincr (ref i) ; /* On doit préciser qu'on passe l'argument par référence. */
      Console.WriteLine (i) ; /* i vaut 2 ici. */
   }
}
```

- Il introduit aussi un mot-clé out permettant de passer un argument non initialisé par référence.

Les structures, des enregistrements classiques

- Contrairement à C++, le mot-clé struct de C#n'est pas (quasi-)équivalent au mot-clé class.
- Les structures de C# sont traitées comme des valeurs non référencées. Elles sont allouées sur la pile et on ne peut pas définir de relation d'héritage entre elles.
- Ces valeurs sont des implémentations de n-uplets plus légères que les objets.

Les types anonymes, des enregistrements définis à la volée

- Prédéfinir les types de n-uplets qui vont être utilisés peut parfois être fastidieux (par exemple, dans une couche de liason avec une base de données).
- Le compilateur C# peut automatiquement insérer ces définitions à partir des utilisations de n-uplets faites dans le programme.
- Il s'agit d'une forme (faible) d'inférence des types.
- Ainsi, il est possible d'écrire :

```
/* "var" signifie que le compilateur doit déterminer le type de la variable. */
/* Ce type n'est utilisable que pour les variables locales. */
var i1 = new { x = 0, y = "bar" }
var i2 = new { x = 42, y = "foo" }
```

  sans même qu'une classe contenant un attribut 'x' et un attribut 'y' n'est été prédéfinie.
- Les variables 'i1' et 'i2' ont le même type.

Les fonctions sont de première classe en C#

- Comme nous l'avons vu dans le cours sur les *design patterns*, manipuler des fonctions comme des objets de première classe est essentiel pour programmer des comportements.
- On peut très bien utiliser des objets pour cela car ils encapsulent des méthodes. Néanmoins :
  - le processus est très lourd syntaxiquement car il faut déclarer une classe pour chaque fonction,
  - le mécanisme de capture de l'environnement doit être fait manuellement.

Comparez !

```
class fresh_names {
private:  int _i;
public:
   class fresh_name_generator {
   private:  fresh_names& _f;
   public:
      fresh_name_generator (fresh_names& f) :
          _f (f) {}
      std::string operator() () {
         std::stringstream s;
         _f._i++;
         s ≪ "name_" ≪ _f._i ≪ std::ends;
         return s.str ();
      }
   };
};

int main (int argc, char** argv) {
   fresh_names pool;
   fresh_names::fresh_name_generator
      generator (pool);
   std::cout ≪ generator () ≪ std::endl;
   std::cout ≪ generator () ≪ std::endl;
}
```

C++

```
let fresh_name_generator_pool () =
   let x = ref 0 in
      fun () → incr x; "name_" ^ string_of_int !x

let fresh_name_generator =
   fresh_name_generator_pool ()

let _ =
    output_string (fresh_name_generator ());
    output_string (fresh_name_generator ())
```

O'CAML

Les délégués, les fonctions de première classe de C#

```
class Program {

   public delegate string Generator ();

   public static Generator pool () {
      int x = 0;
      return () => { x++; return "name_" + x; };
   }

   static public void Main () {
      Generator g = pool ();
      System.Console.WriteLine (g ());
      System.Console.WriteLine (g ());
   }
}
```

Des fonctions de première classe sans inférence des types ?

- Il n'est pas nécessaire de proposer un mécanisme d'inférence des types quand on fournit des fonctions de première classe . . . mais, tout de même, un tel mécanisme permet d'éviter au programmeur d'écrire de très gros types !

Les membres de classe en C#

- Comme en C++, les membres d'une classe peuvent être des attributs, des méthodes, des constantes, des types, des classes, des constructeurs et des destructeurs.
- On trouve en plus des indiceurs, des événements et des propriétés.
- Les modificateurs d'accès sont aussi importés de C++ : private, public, protected.
- Est rajouté le modificateur internal qui permet de ne donner accès à un composant seulement à l'intérieur de l'unité de compilation.

Les événements

- Les événements sont une implémentation du patron sujet-observateur directement dans le langage.
- On peut publier un événement dans une classe.
- Des instances peuvent ensuite s'incrire pour être informées lorsque l'événement se concrétise.
- Nous reviendrons sur cette notion dans le chapitre sur l'interopérabilité.

Les propriétés

- Le mécanisme le plus simple pour assurer un premier niveau d'encapsulation consiste à ne jamais donner un accès direct aux attributs d'un objet.
- La pratique courante lorsqu'un attribut "logique" existe naturellement est de fournir au client des accesseurs en lecture et en écriture.
- Exemple : un vecteur est défini par une direction et une norme.
- Le code du client ressemble alors à ceci :

```
e.setNorm (f.getNorm () - g.getNorm ())
```

- Les propriétés de C# permettent de définir des accesseurs qui s'utilisent syntaxiquement comme des attributs classiques :

```
e.Norm = f.Norm - g.Norm
```

ce qui allège la syntaxe.

Les propriétés : exemple

```
class Program {

   class Vector {
      private float norm;
      public float Norm {
         get { return norm; }
         set { System.Diagnostics.Debug.Assert (value ≥ 0); norm = value; }
      }
   }

   public static void Main () {
      Vector x = new Vector ();
      x.Norm = 42;
      x.Norm = x.Norm + 1;
   }

}
```

Les propriétés en lecture seule

- Il suffit d'omettre l'accesseur en écriture pour ne donner au client qu'une interface en lecture seule sur l'attribut.
- Il existe un modificateur readonly qui de forcer l'immutabilité d'un attribut une fois qu'il a été initialisé (au moment de sa déclaration ou dans le constructeur de la classe).
- On trouve toujours le mot-clé const qui est similaire à readonly mais un peu plus restrictif : l'initialisation doit être fait nécessairement au sein de la déclaration.

Les indiceurs

```
class SampleIntCollection
{
      private int[] arr = new int[100];
      public int this[int i] {
            get { return arr[i]; } /* Is used to evaluate this[x]. */
            set { arr[i] = value; } /* Is used to evaluate this[x] = e; */
      }
}

class Program
{
      static void Main(string[] args)
      {
            SampleIntCollection intCollection = new SampleIntCollection();
            stringCollection[0] = 42;
            System.Console.WriteLine(intCollection[0]);
      }
}
```

(source : `http://msdn.microsoft.com/en-us/library/6x16t2tx.aspx`)

Déclaration de classes en C#

- Les déclarations de classe en C# se font ainsi :

```
public class (abstract|sealed) A : B, I1, ..., IN {
    public A () {} /* Un constructeur par défaut. */
    public A (T x) {} /* Un constructeur à un argument de type T. */
}
```

- Le mot-clé sealed signifie qu'on ne peut pas hériter de la classe.
- L'héritage est simple (dans notre exemple, B est une classe).
- On peut implémenter de multiples interfaces (I1, . . . , IN ici).

Les déclarations de méthodes en C#

- La syntaxe des déclarations de méthode a été conçu pour qu'un client puisse déterminer la méthode de résolution des méthodes déclarées dans une classe A en regardant seulement le code de la classe A (contrairement à C++).
- Voici cette syntaxe :

method_declaration ::= modifier T method_id (arguments) ;

modifier ::= new | public | protected | internal | private | static
| virtual | sealed | override | abstract | extern

- On retrouve beaucoup de mot-clé de C++, ils ont ici un sens à peu près équivalent.
- Le mécanisme de résolution statique/dynamique a été importé avec une légère amélioration.

Liaison tardive en C#

```
class Program {
   class A { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("A.foo") ; } }
   class B : A { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("B.foo") ; } }
   class C : B { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("C.foo") ; } }

   public static void Main () {
      C c = new C () ;
      A a = c ;
      a.foo () ;
   }
}
```

- Ce programme ne compile pas en C# :

lateBinding.cs(8) : warning CS0114 : 'Program.B.foo()' hides inherited member 'Program.A.foo()'. To make the current member override that implementation, add the override keyword. Otherwise add the new keyword

Liaison tardive en C#

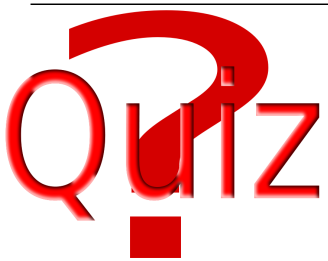
```
class Program {
   class A { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("A.foo") ; } }
   class B : A { public override void foo () { System.Console.WriteLine ("B.foo") ; } }
   class C : B { public override void foo () { System.Console.WriteLine ("C.foo") ; } }

   public static void Main () {
      C c = new C () ;
      A a = c ;
      a.foo () ;
   }
}
```

- Le comportement est celui attendu : C.foo est appelée.

Liaison tardive en C#

```
class Program {
   class A { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("A.foo") ; } }
   class B : A { public virtual new void foo () { System.Console.WriteLine ("B.foo") ; } }
   class C : B { public override void foo () { System.Console.WriteLine ("C.foo") ; } }

   public static void Main () {
      C c = new C () ;
      A a = c ;
      a.foo () ;
   }
}
```

- Ici, A.foo est appelée.



Pourquoi ?

Liaison tardive restreinte en C#

```
class Program {
   class A { public virtual void foo () { System.Console.WriteLine ("A.foo") ; } }
   class B : A { public override sealed void foo () { System.Console.WriteLine ("B.foo") ; } }
   class C : B { public override void foo () { System.Console.WriteLine ("C.foo") ; } }

   public static void Main () {
      C c = new C () ;
      A a = c ;
      a.foo () ;
   }
}
```

- Le mot-clé sealed interdit la redéfinition :

  lateBinding.cs(12) : error CS0239 : 'Program.C.foo()' : cannot override inherited member 'Program.B.foo()' because it is sealed

Références

- http://msdn.microsoft.com
- http://www.cs.vu.nl/~vadim/grammars/CSharp/grammar.html
- http://www.mono-project.com/CSharp_Compiler

Conclusion préliminaire sur C#

- Chaque nouvelle version de C# a introduit de nouvelles constructions en les accumulant au-dessus des précédentes, ce qui rend plus long l'apprentissage du langage.
- Il existe de nombreux autres mécanismes (pour la programmation concurrente ou encore la programmation générique), nous les aborderons dans un prochain cours.

Python

Présentation

- Python est langage de programmation orienté-objet, fonctionnel et impératif, développé par Guido van Rossum (Google). La première version de Python a été publiée en 1991.
- Contrairement aux langages vus précédemment, Python est un langage à typage dynamique, interprété dans un environnement d'exécution muni d'un ramasse-miettes.
- Il est utilisé par Google, la NASA, YouTube, ...

Retour sur le typage dynamique et le typage statique

Une question qui revient sans cesse . . .

Que fait ce programme ?

Une question qui revient sans cesse . . .

Que fait ce programme ?

- Est-ce qu'il s'exécute sans erreur ?

Une question qui revient sans cesse . . .

Que fait ce programme ?

- Est-ce qu'il s'exécute sans erreur ?
- Est-ce qu'il fait ce qu'il doit faire ?

Une question qui revient sans cesse . . .

Que fait ce programme ?

- Est-ce qu'il s'exécute sans erreur ?
- Est-ce qu'il fait ce qu'il doit faire ?

$\Rightarrow$ J'aimerais le vérifier automatiquement . . .

Posons la question à Alan Turing . . .

« Il est impossible d'écrire un programme qui décide si un programme arbitraire termine. »

Une limite infranchissable . . . mais que pouvons-nous faire ?

- On peut vérifier qu'une fonction qui attend deux arguments est toujours appelée avec deux arguments.
- On peut vérifier qu'une fonction qui attend un entier est toujours appelée avec une valeur entière.
- On peut vérifier que dans un contexte utilisant un objet de type A, un objet de type B sera compatible car B est un sous-type de A.
- On peut vérifier qu'une preuve P, donnée par le programmeur, certifie qu'un programme trie correctement une liste (cf. le cours sur la certification) ou que ce programme termine toujours quelque soit la liste.

$\Rightarrow$ Ces programmes fournissent des garanties sur toutes les exécutions possibles du programme en observant seulement son code source.

$\Rightarrow$ Ce sont des analyses statiques.

$\Rightarrow$ Obtenir des analyses statiques toujours plus fines est un domaine de recherche très actif !

Comment faire face à l'inconnu ?

- Dans un langage comme PASCAL, la vérification des types contraint le programmeur a connaître précisément tous les types des données que son programme va utiliser.
- Dans les systèmes de type avec polymorphisme, on peut manipuler des données en ayant une connaissance partielle de leur type :
  - soit leur type est opaque (polymorphisme paramétrique, comme en O'CAML) ;
  - soit leur type est un sous-type d'une interface connue (sous-typage).

$\Rightarrow$ Malheureusement, cette connaissance partielle est parfois une approximation trop imprécise de l'inconnu ...

Concéder un test dynamique : l'exemple de instanceof

- Lorsque l'analyse statique n'est pas assez précise, on permet au programmeur d'effectuer un test à l'exécution permettant de recouvrer statiquement une information sur la nature des données :

```
public Shape is_shape (Object o) {
   if (o instanceof Shape)
      // Si le test a réussi, on a la garantie statique de le type de o est Shape.
      return (Shape) o ;
   else
      // Erreur !
}
```

- La garantie était :

  Si le programme est bien typé, il s'exécute sans erreur.

- Elle est maintenant plus faible :

  Si le programme est bien typé et que instanceof n'échoue jamais, il s'exécute sans erreur.

  mais cette concession engendre un gain d'expressivité.

Pour aller encore plus loin . . .

- La recherche actuelle en typage statique tend à :
  - augmenter l'expressivité des types pour que l'analyse statique effectuée par le vérificateur de type soit plus précise ;
  - intégrer des tests dynamiques dont l'issue positive ou négative peut être traitée comme une nouvelle connaissance statique (typage hybride, types algébriques généralisés, typage multi-niveaux).

Mais en attendant . . .

- Certaines fonctionnalités utiles ne seront pas intégrées dans les langages de l'industrie avant quelques dizaines d'années.
- En particulier, la généralité, c'est-à-dire la capacité à produire automatiquement du code, est nécessaire dès à présent pour :
  - Faire interagir des composants hétérogènes (cf. le cours sur l'interopérabilité) ;
  - Permettre la programmabilité des applications par l'utilisateur.
- Comment embarquer des objets répondant à des messages inconnus dans une application existante ?

Le choix de la vérification dynamique

- PYTHON et OBJECTIVE-C font le choix de ne pas vérifier les programmes avant leurs exécutions.
- Les valeurs du langage ainsi que la description de leurs types ont une existence durant l'évaluation du programme.
- Juste avant d'évaluer une expression, on vérifie que les valeurs ont la bonne structure. [DEMONSTRATION]
- Ce sont donc des langages non sûrs.
- En contrepartie, ils offrent plus de souplesses que les langages à typage statique.
- En particulier, ils sont parfaitement adaptés pour implémenter les fonctionnalités du transparent précédent.

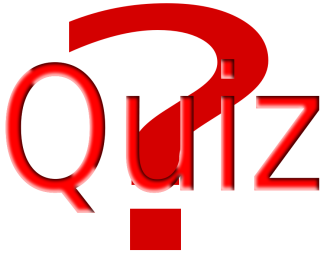
Structure d'un programme en PYTHON

- PYTHON est un langage interprété.
- On peut l'utiliser de façon dans une boucle d'intéraction ou par le biais de fichiers de commandes dont l'extension est `.py` (mode *batch*).

Commandes en Python

- Il existe plusieurs classes de commandes, en voici la grammaire BNF :

```
compound_stmt   : :=   if_stmt
                  |    while_stmt
                  |    for_stmt
                  |    try_stmt
                  |    with_stmt
                  |    funcdef
                  |    classdef
suite           : :=   stmt_list NEWLINE
                  |    NEWLINE INDENT statement+ DEDENT
statement       : :=   stmt_list NEWLINE
                  |    compound_stmt
stmt_list       : :=   simple_stmt (";" simple_stmt)* [";"]
```



Il y a quelque chose de bizarre dans cette grammaire,
le trouverez-vous ?

Des blocs par indentation

- En PYTHON, les blocs de commandes sont définis grâce à l'indentation.

```
if x > 0:
    print 'Ici, x est positif.'
    y = -x
else:
    print 'Ici, y est négatif.'
```

Les valeurs de PYTHON

- Toute donnée est un objet en PYTHON.
- Un objet est composé d'une identité, d'un type et d'une valeur.
- Les types de valeurs prédéfinis de PYTHON sont :
  - les nombres :
    - les entiers (machine, à précision arbitraire, booléens) ;
    - les nombres complexes ;
    - les flottants ;
  - les séquences :
    - non modifiables : chaîne de caractères, chaîne UNICODE, n-uplet ;
    - modifiables : listes, tableaux ;
  - les ensembles modifiables ou non ;
  - les structures associatives : dictionnaires, tables de base de données ;
  - les données exécutables (les fonctions, les méthodes, les classes, . . .) ;
  - les modules, les fichiers, . . .

[DEMONSTRATION]

Définition de hiérarchie de classes en Python

```
#! /usr/bin/env python

import sys
import os
import os.path

class FileSystemNode :
    def __init__ (self, name):
        self._name = name

    def name (self): return self._name
```

Définition de hiérarchie de classes en PYTHON (suite)

```
class File (FileSystemNode):
    def __init__ (self, name) :
        FileSystemNode.__init__ (self, name)
        try:
            self._fd = open (name)
            self._mode = True
        except (IOError, OSError):
            self._mode = False
            print 'Error during file loading ', name

    def isleaf (self) :  return True
    def children (self) :  return []
    def file (self):  return self._fd
    def mode (self):  return self._mode

    def close (self):
        if self.mode ():
            self._fd.close ()
            self._mode = False
```

Définition de hiérarchie de classes en PYTHON (suite)

```
class Directory (FileSystemNode):
    def __init__ (self, name) :
        FileSystemNode.__init__ (self, name)
        try:
            self._members = map (self.load_member, os.listdir (name))
        except (IOError, OSError):
            print 'Error while loading directory ', name

    def load_member (self, name):
        full_name = os.path.join (self.name (), name)
        if os.path.isdir (full_name):
            return Directory (full_name)
        else:
            f = File (full_name)
            f.close ()
            return f
```

Des fonctions très polymorphes grâce au typage dynamique

- L'absence de typage fort permet d'écrire des fonctions très générales :

```
def show_with_parenthesis (x):
    print '(', x.show (), ')'
```

. . . mais encore une fois, sans aucune garantie.

Programmation dirigée par les types dynamiques

- Comme les types sont des données, il est possible d'écrire des fonctions qui observent le type de leur argument pendant l'exécution du programme et agissent différemment en fonction de ce type.

```
class magic_array (dict):
    def __init__ (self):
        dict.__init__ (self)
        self._named_position = {
            'first' : lambda (self): self[0],
            'second' : lambda (self): self[1],
            'third' : lambda (self): self[2]
        }
    def __getitem__ (self, x):
        if type(x) == int:
            return dict.__getitem__ (self, x)
        elif type(x) == str:
            try: return self._named_position[x] (self)
            except: raise TypeError
        else:
            raise TypeError

x = magic_array ()
x[0] = 'foobar'
print x['first'], x['fourth'], x[True]
```

Liste définie par compréhension en Python

- On peut définir une liste en décrivant les éléments qui la composent à l'aide d'un générateur.

```
def cartesian_product (l1, l2) :  return [ (x, y) for x in l1 for y in l2 ]
                                                # {(x, y) | x ∈ l1 ∧ y ∈ l2}

def diagonal (p) :  return [ x for (x, y) in p if x == y ]
                                        # {x | (x, y) ∈ p ∧ x = y}
```

Conclusion temporaire sur PYTHON

- PYTHON est un langage orienté objet qui offre des mécanismes très simples et une vue unifié de la programmation par objets.
- Le typage dit dynamique n'a rien à voir avec le typage statique.
- Il s'agit d'une décoration des données, des méta-données, permettant à l'interprète de détecter les erreurs ...
- ... mais il est déjà trop tard ! Les erreurs se sont déjà produites !
- Par contre, nous verrons dans le cours sur l'interopérabilité dans quelle mesure ces méta-données facilitent l'adaptation et l'extensibilité automatique des composants.

Une unique référence pour patienter

- `http://www.python.org`

Scala

Présentation

- SCALA est un langage fonctionnel orienté objet statiquement typé à base de classes et de traits.
- Il est développé par Martin Odersky de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- La version 1.0 a été publiée en 2003, la version 2.0 a été publiée en 2006.
- SCALA se compile vers DOTNET et vers la JVM. Il intéragit très bien avec les bibliothèques existantes sur ces deux plateformes.
- On peut utiliser SCALA dans une boucle d'intéraction.

Valeurs et types du langage

- Toute valeur est un objet.
- En tant que langage fonctionnel, SCALA propose des fonctions de première classe, qui peuvent être vues comme des objets.

Définition de classes

```
class A (arg_1 : U_1, ..., arg_k : U_k) extends B {
  val x = ...
  def my_method (x_1 : T_1, ..., x_n : T_n) : T_r = ...
  type T = ...
  class A = ...
}
```

(Les U et les T sont des types.)

- L'héritage est simple.
- Le langage intègre une inférence des types partielle. On peut omettre certains types lorsqu'ils sont déductibles du contexte.

Exemple

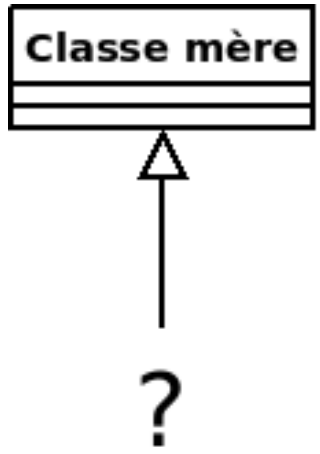
```
class File {
  def read : int = ...
  def write (x: int) : unit = ...
}

object the_program {
  def main (args : Array[String]) = {
    val x = new File;
    x.write (42);
    x write 42; // Syntaxe équivalente.
  }
}
```

- Le mot-clé object permet d'implémenter le patron de conception singleton. La classe est instanciée lors de sa première utilisation et c'est ensuite toujours la même instance qui est utilisée.

Les traits, un remplacement sain de l'héritage multiple

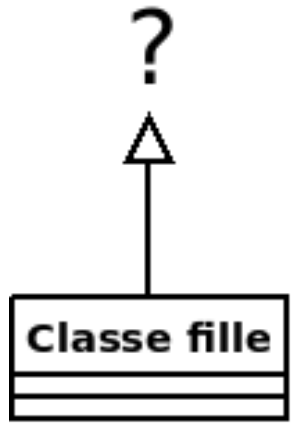
- L'héritage multiple est utile pour joindre des hiérarchies de classes découplées.
- Cependant, il est souvent difficile à implémenter pour le concepteur de langage et il est parfois trop peu expressif pour certaines compositions.
- SCALA importe (dans un cadre de type statique) la composition mixin du langage SMALLTALK pour généraliser la notion même d'héritage.

L'asymétrie de la composition par héritage



- En programmation objet traditionnelle, on développe une classe en pensant à ses possibles extensions sous la forme de sous-classes.

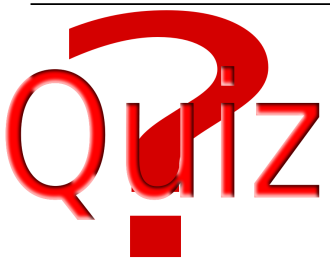
L'asymétrie de la composition par héritage



- Pourquoi ne pas développer une extension sans savoir ce que l'on est en train d'étendre ?

Exemple en C++

```
struct File {
   virtual void write (int x) { ... }
};

struct SyncFile :  public File {
   void acquireLock () {}
   void releaseLock () {}
   virtual void write (int x) { acquireLock (); File::write (x); releaseLock (); }
};

struct Stream {
   virtual void write (int x) { ... }
};

struct SyncStream :  public Stream {
   void acquireLock () {}
   void releaseLock () {}
   virtual void write (int x) { acquireLock (); Stream::write (x); releaseLock (); }
};
```



Comment factoriser le code de synchronisation ? [a]

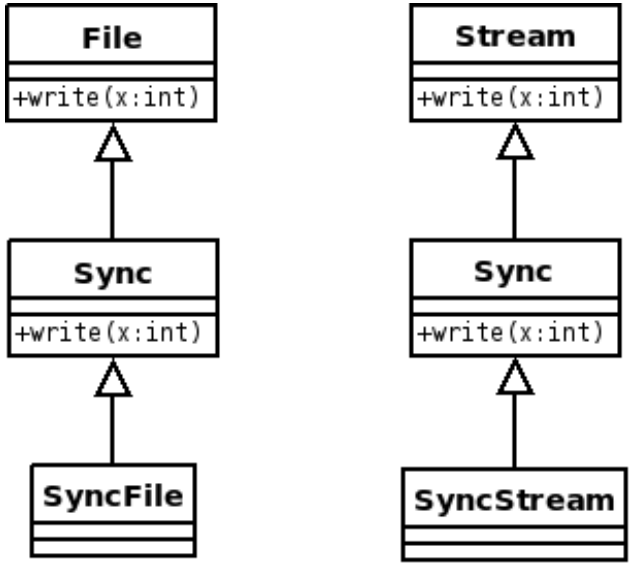
[a] Exemple tiré de « Adding traits to (statically typed) languages »
Oscar Nierstrasz, Stéphane Ducasse, Stefan Reichhart and Nathanael Schärli

Une tentative en C++

```
struct File {
  virtual void write (int x) { }
};

struct Stream {
  virtual void write (int x) { }
};

struct Sync {
  void acquireLock () {}
  void releaseLock () {}
  virtual void directWrite (int x) = 0;
  virtual void write (int x) { acquireLock (); this→directWrite (x); releaseLock (); }
};

struct SyncFile : public File, Sync {
  virtual void write (int x) { this→Sync::write (x); }
  virtual void directWrite (int x) { this→File::write (x); }
};

struct SyncStream : public Stream, Sync {
  virtual void write (int x) { this→Sync::write (x); }
  virtual void directWrite (int x) { this→Stream::write (x); }
};
```

Critique de la solution

- L'héritage multiple ne capture pas la notion de composition qu'on veut exprimer.
- Ici, on veut dire que `Sync` dérive d'une classe, encore inconnue, mais qui possède une méthode `write` et `read`.
- La classe finale `SyncFile` doit « insérer » la classe `Sync` entre elle et la classe `File` dans le treillis d'héritage sans dupliquer son code.



Une solution grâce aux templates de C++

```
struct File {
  virtual void write (int x) { }
};

struct Stream {
  virtual void write (int x) { }
};

template <class Super>
struct Sync : public Super {
  void acquireLock () {}
  void releaseLock () {}
  virtual void write (int x) { acquireLock (); this→Super::write (x); releaseLock (); }
};

struct SyncFile : public Sync<File> {};

struct SyncStream : public Sync<Stream> {};
```

Mais . . .

- Les classes templates et l'héritage multiple n'ont pas été prévus pour répondre aux problèmes de la composition `mixin`.
- Certaines irrégularités du langage rendent périlleux le passage à l'échelle de cette méthode.
- Par exemple, il n'y a aucune vérification que le paramètre `Super` de la classe `Sync` possède bien une méthode `write`.
- C'est seulement lorsque la classe `Sync` est utilisée que la vérification du code de `Sync` est effectuée.

Les traits en SCALA

- Un des mécanismes centraux du système de types de SCALA est la composition mixin.
- Les traits sont des composants logiciels ne contenant que des méthodes (pas d'attributs). Certaines méthodes sont définies tandis que d'autres sont seulement déclarées.
- La classe mère d'un trait est indéterminée.
- Le mot-clé with est utilisée pour insérer un trait dans une hiérarchie de classes. C'est à cette occasion que la classe mère du trait est instanciée dans le code des méthodes.

Solution en SCALA

```
class File {
  def write (x: int) : unit = println ("File.write")
}

class Stream {
  def write (x: int) : unit = println ("Stream.write")
}

trait Writable {
  def write (x: int) : unit
}
// "extends" ne fixe pas une classe pour super, il contraint
// juste la future classe à posséder une méthode write.
trait Sync extends Writable {
  def acquire_lock : unit = println ("Acquire")
  def release_lock : unit = println ("Release")

  abstract override def write (x : int) : unit = {
    this.acquire_lock ;
    super.write (x) ;
    this.release_lock
  }
}

class SyncA extends A with Sync {}
class SyncB extends B with Sync {}
```

Le traitement des listes en SCALA

- Comme en PYTHON ou HASKELL, on peut construire des listes par compréhension :

```
def cartesian_product (l1 : List[int], l2 : List[int]) : List[(int, int)] =
  for (val x ← l1 ; val y ← l2) yield (x, y)

def main (args: Array[String]) {
  val l1 = List(1, 2, 3)
  val l2 = List(1, 2, 3)
  for (x ← cartesian_product (l1, l2))
    println (x)
}
```

- « val x ← l1 » se lit « x ∈ l1 ».

Le pattern matching en SCALA

- Définir une fonction par cas est une pratique très courante en informatique.
- Les langages de la famille ML facilitent cela à l'aide des types algébriques.
- Typiquement, on définit des fonctions par induction sur la structure d'un arbre ainsi :

```
type color = Red | Black
type tree = Empty | Node of color × tree list

let rec is_red_node = function
| Empty | Node (Black, _) → false
| Node (Red, children) → List.for_all is_black_node children

and is_black_node = function
| Node (Red, children) → false
| Empty → true
| Node (Black, children) → List.for_all is_red_node children

let is_redblack_tree = is_black_node
```

Être un arbre rouge-noir en SCALA

```
abstract class Color
case class Red () extends Color
case class Black () extends Color

abstract class Tree
case class Empty () extends Tree
case class Node (val c: Color, val children: List[Tree]) extends Tree

object RedBlackTree {
  def is_red_node (x: Tree) : boolean =
    x match {
      case Empty () => false
      case Node (Red (), children) => false
      case Node (Black (), children) => children forall this.is_black_node
    }
  def is_black_node (x: Tree) : boolean =
    x match {
      case Empty () => true
      case Node (Red (), children) => children forall this.is_red_node
      case Node (Black (), children) => false
    }
  def is_redblack_tree : Tree => boolean = this.is_black_node
}
```

Conclusion préliminaire sur SCALA

- SCALA introduit une composition plus générale que l'héritage, la composition mixin
- Cette composition permet de découpler le développement des classes.
- La sémantique de SCALA est très claire et formalisée.
- Ce langage a importé des mécanismes provenant du monde fonctionnel et du monde objet.
- Nous verrons que le système de types de ce langage est particulièrement adapté à la programmation générique.

O'Caml

Présentation

- O'Caml est un langage fonctionnel proposant un système d'objets et un système de modules pour organiser les composants logiciels.
- Il est développé par l'équipe Gallium de l'INRIA.
- Son environnement d'exécution intègre un ramasse-miette.
- Il est compilé en code-octet ou en code natif.
- Une boucle d'interaction est intégrée dans la distribution.

Les valeurs et les types du langage

- Les valeurs du langage comprennent :
  - les valeurs de base (entiers, flottants, booléens, ...) ;
  - les valeurs de type algébrique (liste, arbre, ...) ;
  - les fonctions ;
  - les enregistrements ;
  - les n-uplets ;
  - les objets ...
- Les types sont stratifiées en deux classes : les types monomorphes et les schémas de type.
- Le langage intègre une inférence de type qui détermine le type le plus général d'un programme sans aucune aucune annotation.

Un objet est un enregistrement

- En première approximation, un objet peut être vu comme un enregistrement défini récursivement.
- La syntaxe pour construire un objet est :

```
object
   val x = 42
   val y = 37
   method getx = x
   method gety = y
   method show = "I am a point"
-: <show : string; getx : int; gety : int> = <obj>
```

- Les appels de méthodes sont de la forme : obj#method_name e_1 ... e_n
- Exemple : point#show

Exemple de création d'objets

```
# let minmax x y =
        if x < y then object
            method min = x
            method max = y
        end else object
            method max = x
            method min = y
        end ; ;
val minmax : α → α → < max : α ; min : α > = <fun>
# let last_memo f = object (self)
        val mutable last = []
        method apply x =
            let y = f x in
                last ← y : : last ;
                y
        method last = last
        method reset = last ← [] ; self
    end ; ;
val last_memo :
    (α → 'b) → (< apply : α → 'b ; last : 'b list ; reset : 'c > as 'c) =
    <fun>
```

Le polymorphisme sur la partie inconnue des objets

- Le sous-typage des objets en O'CAML est structurel.
- Il est implémenté grâce au polymorphisme de rangées, qui s'appuie sur une quantification sur la partie inconnue des objets.

```
# let display p = Printf.printf "(%d, %d)[%s]" p#x p#y p#show
val display : < show : string; x : int; y : int; .. > → unit = <fun>
```

- La fonction display est compatible avec tous les objets qui disposent des méthodes x, y et show.
- La notation .. signifie qu'il existe une partie inconnue de l'objet par rapport à laquelle la fonction est polymorphe.

Une classe est un générateur dérivable

- Les classes sont utilisées pour produire des objets et réutiliser le code d'autres classes par le biais de l'héritag.e

```
class point x y =
object
  method x : int = x
  method y : int = y
  method show = "No, I am not a number !"
end

let color_point_generator x y (c : [‘Black | ‘Red]) =
object
  inherit (point x y)
  method color = c
  method show = "Yes, I have a color !"
end
```

- L'héritage peut être multiple.
- On retrouve les notions habituelles de classe et de méthode abstraites.

Les types de classe

- Parfois, l'inférence de type infère un type général en regard aux besoins de modélisation.
- Il est alors nécessaire de contraindre ce type à l'aide d'annotations de type ou à l'aide de type de classe :

```
class type point_type = object
  val x : int
  val y : int
  method getx : int
  method gety : int
  method show : string
end

class point x y : point_type = object
  val x = x
  val y = y
  method getx = x
  method gety = y
  method string = "Hi ! I am a point !"
end
```

Les coercions explicites

- Le sous-typage est présence de polymorphisme paramétrique rend complexe l'inférence des types. Pour simplifier ce problème, O'Caml ne choisit pas implicitement un type général lorsqu'il a le choix entre plusieurs types :

```
# let p = new point 0 0 ; ; let pc = new color_point 0 0 'Red ; ;
val p : point = < obj >
val pc : color_point = < obj >
# [p ; pc ] ; ;
Characters 4-6 :
  [p ; pc] ; ;
       ^

This expression has type color_point but is here used with type point
The second object type has no method color
```

- Dans ces cas, la conversion de type doit être faite explicitement par le programmeur en utilisant une coercion explicite :

```
# [p ; (pc : > point)] ; ;
-: point list = [<obj> ; <obj>]
```

Les objets fonctionnels

- O'CAML simplifie la définition d'objets fonctionnels.
- L'état (les attributs) d'un objet **ne sont pas modifiables**.
- Un message est alors vu comme une fonction produisant un nouvel objet à partir d'un autre.

```
#class functional_point y =
    object
      val x = y
      method get_x = x
      method move d = {< x = x + d >}
    end;;
class functional_point :
  int →
  object ('α) val x : int method get_x : int method move : int → 'α end
#let p = new functional_point 7;;
val p : functional_point = <obj>
#p#get_x;;
- : int = 7
#(p#move 3)#get_x;;
- : int = 10
#p#get_x;;
- : int = 7
```