

# Typage et Analyse Statique

## Cours 6

Emmanuel Chailloux

Spécialité Science et Technologie du Logiciel  
Master mention Informatique  
Sorbonne Université

année 2019-2020

# Plan du cours

- ▶ génériques en Java
  - ▶ passage de Java 1.4 à 1.5
  - ▶ classes et méthodes paramétrées
  - ▶ typage et sous-typage
  - ▶ polymorphisme borné
- ▶ *lambda*-expressions en Java 1.8

# Génériques en Java 1.5

Introduction du polymorphisme paramétrique (même code quelque soit le type).

- ▶ But : manipuler des classes paramétrées
  - ▶ pour un code plus sûr
  - ▶ et plus lisible
- ▶ Contraintes :
  - ▶ utiliser la même machine virtuelle
  - ▶ être compatible ascendant (programmes 1.4 compilables)

# Motivations

- ▶ typage statique générique pour
  - ▶ diminuer les tests dynamiques de types
  - ▶ écrire des structures de données génériques classiques et effectuer des calculs dessus
  - ▶ faciliter la lecture des programmes
- ▶ répondre aux critiques d'autres langages :
  - ▶ C++, Ada95, OCaml, Haskell ...
- ▶ tenir compte de propositions d'extension :
  - ▶ Pizza, GJ, ...
- ▶ répondre à l'avance à C#

# Contraintes

- ▶ compatible avec les versions antérieures :
  - ▶ du langage
  - ▶ des bibliothèques
  - ▶ de la machine abstraite
- ▶ cohabitation possible entre codes/bibliothèques antérieurs
- ▶ ne pas être coûteux si on ne s'en sert pas

# Influences

- ▶ polymorphisme paramétrique (ML, )
- ▶ propositions Pizza et GJ :
  - ▶ Pizza : <http://pizzacompiler.sourceforge.net/>
  - ▶ GJ : : <http://homepages.inf.ed.ac.uk/wadler/pizza/gj/>
- ▶ Génériques pour C# et .NET :  
<http://research.microsoft.com/projects/clrgen/>
- ▶ un bon livre :
  - ▶ Génériques et collections Java, Naftalin-Wadler, O'Reilly

# Java 1.4 : API

## vecteurs extensibles

```
1 java.util
2   Class ArrayList
```

## hiérarchie de classes

```
1 java.lang.Object
2   java.util.AbstractCollection
3     java.util.AbstractList
4       java.util.ArrayList
```

## principales méthodes

```
1 ArrayList(int initialCapacity)
2 void add(int index, Object element)
3 Object get(int index)
4 Object set(int index, Object element)
```

## Java 1.4 : utilisation (UD.java)

```
1 import java.util.ArrayList;
2 class UD {
3     public static void main(String[] a) {
4         ArrayList all=new ArrayList(3);
5         all.add(0,new Integer(3));
6         all.add(1,"salut");
7         Integer x = (Integer)(all.get(0));
8         Integer y = (Integer)(all.get(1));        //
9         int res = x.intValue() + y.intValue();
10    }
11 }
```

▶ compilation : javac -source 1.4 UD.java

▶ exécution : runtimeException

```
$ java UD
```

```
Exception in thread "main"
```

```
java.lang.ClassCastException: java.lang.String
    at UD.main(UD.java:8)
```



# Java 1.5 : API

## vecteurs extensibles

```
1 java.util
2   Class ArrayList<E>
```

## hiérarchie de classes

```
1 java.lang.Object
2   java.util.AbstractCollection<E>
3     java.util.AbstractList<E>
4       java.util.ArrayList<E>
```

## principales méthodes

```
1 ArrayList(int initialCapacity)
2 void add(int index, E element)
3 E get(int index)
4 E set(int index, E element)
```

## Java 1.5 : utilisation (UD.java)

⇒ warnings à la compilation

```
1 $ javac -source 1.5 UD.java
2 Note: UD.java uses unchecked or unsafe operations.
3 Note: Recompile with -Xlint:unchecked for details.
4 -bash-3.00$ javac -source 1.5 -Xlint:unchecked UD.java
5 UD.java:5: warning: [unchecked] unchecked call to add(int,E) as a member of ↵
      the raw type java.util.ArrayList
      all.add(0,new Integer(3));
          ^
6 UD.java:6: warning: [unchecked] unchecked call to add(int,E) as a member of ↵
      the raw type java.util.ArrayList
      all.add(1,"salut");
          ^
7
8
9
10
11 2 warnings
```

⇒ exception à l'exécution

```
1 $ java UD
2 Exception in thread "main"
3 java.lang.ClassCastException: java.lang.String
4 at UD.main(UD.java:8)
```

## Java 1.5 : classe paramétrée (US.java)

```
1 import java.util.ArrayList;
2 class US {
3     public static void main(String[] a) {
4         ArrayList<Integer> all=
5             new ArrayList<Integer>(3);
6         all.add(0,new Integer(3));
7         all.add(1,"salut");
8         Integer x = (Integer)(all.get(0));
9         Integer y = (Integer)(all.get(1));
10        int res = x.intValue() + y.intValue();
11    } }
```

⇒ erreur à la compilation

```
1 US.java:7: cannot find symbol
2 symbol   : method add(int,java.lang.String)
3 location: class java.util.ArrayList<java.lang.Integer>
4     all.add(1,"salut");
5         ^
6 1 error
```

# Exemples (1)

## Classe et interface:

```
1 interface Comparable<E> {  
2     int compareTo(E e)  
3 }
```

```
1 public class H implements Comparable<H> {  
2     // ...  
3     H max(H e) {  
4         if (this.compareTo(e) > 0)  
5             {return this;}  
6         else {return e;}  
7     }
```

## Exemples (2)

### Structures de données génériques:

```
1  class Arbre<T> {
2      private T etiq;
3      private List<Arbre<T>> fils =
4          new ArrayList<Arbre<T>>();
5
6      public Arbre<T>(T etiq){this.etiq=etiq;}
7      public T getEtiq(){return etiq;}
8      public List<Arbre<T>> getFils(){return fils;}
9      public void ajouteFils(Arbre<T> f){fils.add(f);}
10     //...
11 }
```

# Contraintes sur les variables de type

Une variable de type peut avoir une ou plusieurs bornes (séparées par &).

- ▶ borne supérieure : <T extends Object>
- ▶ combinée : &

```
1  static <T extends Clonable & Closable> T m(T x) {  
2      T y = x.clone();  
3      x.close();  
4  }
```

- ▶ récursive

```
1  public interface Orderable<T extends Orderable<T>> {  
2      Public boolean lessThan(T t);  
3  }
```

## 2 modèles:

- ▶ expansion de code (à la C++)  
chaque instance d'une classe paramétrée a sa propre version de code
- ▶ le paramètre de type est remplacé par Object  
un code unique  
avec des transtypages sûrs

# Limitations

- ▶ paramètre de type instancié par une classe ou une interface  
pas par un type primitif  
⇒ auto-boxing (voir cours 5)
- ▶ pas de manipulation du paramètre de type à l'exécution :
  - ▶ pas de new sur un type paramétré
  - ▶ pas d'héritage sur un type paramétré
  - ▶ pas de cast avec type paramétré (warning)
  - ▶ ni d'instanceof (erreur), ni de catch (erreur)
  - ▶ pas de type paramétré comme type des éléments d'un tableau :  
car il faudrait garder le type du paramètre de type dans le  
tableau pour vérifier les relations de sous-typage des tableaux.



## Simplification des déclarations

Depuis Java 1.7, il y a de l'inférence de types pour éviter de répéter des types pour les classes paramétrées ; on utilise l'opérateur <> pour l'instanciation des classes :

```
1 List<String> l = new ArrayList<>();
2 Map<String, Integer> m1 = new HashMap<>();
3 Map<String, List<String>> m2 = new HashMap<>();
```

Le compilateur Java déduit les types des constructeurs si cela est possible, sinon déclenche une erreur à la compilation.

```
1 ArrayList<String> al = new ArrayList<>();
2 al.add("hello");
3 al.addAll(new ArrayList<>());
```

⇒ erreur ligne 3

OK en 1.8

## Méthodes paramétrées

Possibilité de définir le paramètre de type au niveau d'une méthode (devant son type de retour) :

```
1 class G {
2     public static <T> void arrayToList (T[] a, List<T> l) {
3         for ( T elt : a ) { l.add(elt); }
4     }
5     public static void main(String[] args) {
6         ArrayList<String> als = new ArrayList<String>();
7         arrayToList(args,als);
8         System.out.println("==> " + als);
9     }
10 }
```

```
1 $ java G un deux trois
2 ==> [un, deux, trois]
```

Intérêt :

- ▶ Si la généricité d'une méthode est indépendante de celui de la classe de définition, alors il n'est pas dangereux de le lier localement en indiquant les paramètres de types de la méthode.

## Méthodes paramétrées : autre exemple

```
1 import java.util.*;
2 interface Comparator<T> {
3     public int compare(T x, T y); }
4 class ByteComparator implements Comparator<Byte> {
5     public int compare (Byte x, Byte y) { return (x - y);} }
6
7 class Collections {
8     public static <T> T max(Collection<T> col,
9                             Comparator<T> cmp) {
10         Iterator<T> it = col.iterator();
11         T elt = it.next();
12         while (it.hasNext()) {
13             T elt2 = it.next();
14             if (cmp.compare(elt,elt2) < 0 ) elt = elt2;
15         }
16         return elt;
17     }
18 }
```

# Méthodes paramétrées en OCaml

En OCaml <http://caml.inria.fr/pub/docs/manual-ocaml/manual005.html> :

```
1 # class intlist (l : int list) =
2   object
3     method empty = (l = [])
4     method fold : 'a. ('a -> int -> 'a) -> 'a -> 'a =
5       fun f accu -> List.fold_left f accu l
6     end;;
7
8 # let l = new intlist [1; 2; 3];;
9 val l : intlist = <obj>
10
11 # l#fold (fun x y -> x+y) 0;;
12 - : int = 6
13
14 # l#fold (fun s x -> s ^ string_of_int x ^ " ") "";;
15 - : string = "1 2 3 "
```

## Typage et sous-typage

- ▶ un type paramétré  $\tau_2 \langle T_2 \rangle \leq \tau_1 \langle T_1 \rangle$  ssi :
  - ▶  $\tau_2 \leq \tau_1$
  - ▶ et  $T_2 = T_1$
- ▶ un type paramétré  $\tau \langle T \rangle \leq \tau$
- ▶ un type paramétré  $\tau \langle T \rangle \leq \text{Object}$
- ▶  $\tau_2 \langle T_2 \rangle$  n'est pas sous-type de  $\tau_1 \langle T_1 \rangle$  si  $T_2 \neq T_1$

# Typage et sous-typage (1)

- ▶ effacement de type  
*raw type* : type paramétré sans paramètre (compatibilité)
  - ▶ `Type<A>` vers `RawType`
  - ▶ `RawType` vers `Type<A>` : warning

```
1  ArrayList<String> als = new ArrayList<String>(10);
2
3  ArrayList al = als; // ok
4
5  als = al; // warning a' la compilation
6  als = new ArrayList(); // idem
```

## Typage et sous-typage (2)

- ▶ pas de sous-typage direct sur les paramètres de types : erreur voir polymorphisme borné

```
1 ArrayList<String> as = new ArrayList<String>(3);
2 ArrayList<Object> ao = as;
3 ...
4 incompatible types
5 found   : java.util.ArrayList<java.lang.String>
6 required: java.util.ArrayList<java.lang.Object>
7     ArrayList<Object> ao = as;
```

- ▶ pas de création de tableaux paramétrés : erreur

```
1 A[] aa = new A[10];
```

# Compatibilité ascendante

- ▶ Tous les anciens programmes Java tournent.
- ▶ pas d'information sur les paramètres de type dans la représentation des objets
- ▶ pas d'introspection ou de test de types sur le paramètre de type



## Warning à la compilation

```
1 javac -Xlint:unchecked UD.java
```

Danger : voir de 2 manières une même structure

```
1 ArrayList<String> als = new ArrayList<String>(10);
2 ArrayList al = als;
3
4 als.add(0,"Salut");
5 // als.add(1,new Integer(4)); erreur compilation
6
7 al.add(1,new Integer(4)); // warning a' la compilation
8
9 String s = als.get(1); // erreur a' l'exe'cution
10 // Exception in thread "main"
11 // java.lang.ClassCastException:
12 //java.lang.Integer cannot be cast to java.lang.String
```

pas de *unchecked warning*

⇒ pas de `RuntimeException` *ClassCastException*

## Exemple : QueueD.java (1)

```
1 import java.util.ArrayList;
2
3 class Vide extends Exception {}
4 class Pleine extends Exception {}
5
6 class QueueD {
7     int taille, longueur;
8     ArrayList q;
9     int tete, fin;
10
11     QueueD(int n) {taille = n; q = new ArrayList(n);}
12
13     void entrer(Object x) throws Pleine {
14         if (longueur < taille) { q.add(fin++ % taille,x); longueur++;}
15         else throw new Pleine();
16     }
17
18     Object partir() throws Vide {
19         if (longueur > 0) { longueur--; return q.get(tete++ % taille);}
20         else throw new Vide();
21     }
22 }
```

## Exemple : Queue.java (2)

```
1
2  class Vide extends Exception {}
3  class Pleine extends Exception {}
4
5  class Queue<A> {
6      int taille, longueur;
7      A[] q;
8      int tete, fin;
9
10     Queue(int n) {taille = n; q = new A[n];}
11
12     void entrer(A x) throws Pleine {
13         if (longueur < taille) { q[fin++ % taille] = x; longueur++;}
14         else throw new Pleine();
15     }
16
17     A partir() {
18         if (longueur > 0) { longueur--; return q[tete++ % taille];}
19         else throw new Vide();
20     }
21 }
```

## Exemple : QueueS.java (3)

```
1 import java.util.ArrayList;
2
3 class Vide extends Exception {}
4 class Pleine extends Exception {}
5
6 class QueueS<A> {
7     int taille, longueur;
8     ArrayList<A> q;
9     int tete, fin;
10
11     QueueS(int n) {taille = n; q = new ArrayList<A>(n);}
12
13     void entrer(A x) throws Pleine {
14         if (longueur < taille) { q.add(fin++ % taille, x); longueur++;}
15         else throw new Pleine();
16     }
17
18     A partir() throws Vide {
19         if (longueur > 0) { longueur--; return q.get(tete++ % taille);}
20         else throw new Vide();
21     }
22 }
```

## Exemple : compilation (4)

### ▶ QueueD :

```
1 $ javac -Xlint:unchecked QueueD.java
2 QueueD.java:14: warning: [unchecked] unchecked call to add(int,E) as a ←
   member of the raw type java.util.ArrayList
3     if (longueur < taille) { q.add(fin++ % taille,x); longueur++;}
4                               ^
5 1 warning
```

### ▶ Queue :

```
1 $ javac -Xlint:unchecked Queue.java
2 Queue.java:10: generic array creation
3     Queue(int n) {taille = n; q = new A[n];}
4                               ^
5 1 error
```

### ▶ QueueS :

```
1 $ javac -Xlint:unchecked QueueS.java
```

## Exemple : exécution (5)

### ► UQS.java

```
1 import java.util.ArrayList;
2 class UQS {
3     public static void main(String[] a) {
4         QueueS<Integer> q = new QueueS<Integer>(3);
5         try { q.entrer(new Integer(3));
6             q.entrer(new Integer(4));
7             Integer x = q.partir();
8             Integer y = q.partir();
9             int res = x.intValue() + y.intValue();
10            System.out.println(res);
11        } catch (Exception e) {System.out.println(e.toString());}
12    } }
```

### ► compilation :

```
1 $ javac -Xlint:unchecked UQS.java
```

### ► exécution

```
1 $ java UQS
2 7
```

## Nouvelles erreurs à la compilation (1)

du à l'effacement du paramètre de type

- ▶ en cas de redéfinition
- ▶ en cas de surcharge

**Exemple de surcharge:**

```
1 class K {  
2     int m(ArrayList<Integer> x) {return x.get(0).intValue();}  
3     int m(ArrayList<String> x) {return x.get(0).length();}  
4 }
```

```
$ javac K.java
```

```
K.java:3: error: name clash: m(ArrayList<String>)  
    and m(ArrayList<Integer>) have the same erasure  
    int m(ArrayList<String> x) {return x.get(0).length();}  
        ^
```

```
1 error
```

## Nouvelles erreurs à la compilation (2)

### Exemple de redéfinition:

```
1 import java.util.*;
2
3 class K1 {
4     int m(ArrayList<Integer> x) {
5         return x.get(0).intValue(); }
6 }
```

```
1 import java.util.*;
2
3 class K2 extends K1 {
4     int m(ArrayList<String> x) {return x.get(0).length();}
5 }
```

```
javac K1.java K2.java
K2.java:3: name clash: m(java.util.ArrayList<java.lang.String>)
in K2 and m(java.util.ArrayList<java.lang.Integer>)
in K1 have the same erasure, yet neither overrides the other
int m(ArrayList<String> x) {return x.get(0).length();}
    ^
1 error
```



## Polymorphisme borné (1)

Sous-typage sur le paramètre de type en définissant une inconnue de type, notée ?, sur laquelle portera les différentes contraintes de typage.

```
1 ArrayList<?> al = als;
```

- ▶ C borne supérieure : ? extends C  
? une inconnue de type sous-type de C pour la covariance
- ▶ C borne inférieure : ? super C  
? une inconnue de type sur-type de C

<?> indique <? extends Object>

## Polymorphisme borné (2)

On récupère la relation de sous-typage grâce aux bornes et au sens de la variance :

- ▶ co-variance : `List<? extends Number>` sera sous-type de `List<T>` où `T` est sous-type de `Number`  
utilisée pour la lecture d'une valeur
- ▶ contra-variance : `List<? super Number>` sera sous-type de `List<T>` où `T` est sur-type de `Number`  
utilisée pour l'écriture d'une valeur

## exemple dans Collections:

```
1 public static <T> void copy(List<? super T> dest,  
2                           List<? extends T> src)
```

- ▶ *src* est en lecture (co-variance comme pour le type du résultat pour un type fonctionnel)
- ▶ *dst* est en écriture (contra-variance comme pour le type du paramètre dans un type fonctionnel)

On peut indiquer plusieurs bornes aux inconnues de type à l'aide de &.

## Polymorphisme borné (3)

exemple de wikipédia :

```
1 import java.util.*;
2
3 class Ext {
4     public static void main(String[] args) {
5
6         List<? extends Number> c =
7             new ArrayList<Integer>(); // Read-only,
8 // c.add(new Integer(3)); // ? Aucune connaissance des sous-classes
9         Number n = c.get(0);
10 // c.add(n); // n n'est pas compatible avec ?
11         List<? super Integer> d = new ArrayList<Number>(); // Write-only,
12         d.add(new Integer(3)); // ok
13 // Integer i = d.iterator().next(); // erreur ? Comme Object
14         Object o = d.iterator().next(); // ok
15         List<?> e = new ArrayList<Integer>();
16         System.out.println(" e.size() : " + e.size());
17 // e.add(new Integer(5)); // erreur de compil
18     }
19 }
```

## Polymorphisme borné (4)

### API:

```
1 ArrayList(Collection<? extends E> c)
2   Constructs a list containing the elements of
3   the specified collection, in the order
4   they are returned by the collection's
5   iterator.
```

inférence de types pour la détermination des inconnues.

## Exemple

```
1  import java.util.*;
2  class A<T> {
3      T x;
4      void set_x(T x) {this.x = x;}
5      T get_x() {return x;} }
6
7  class B<T> extends A<T>{
8      T y;
9      void set_y(T y) {this.y = y;}
10     T get_y() {return y;} }
11
12  class H {
13     public static void main(String[] a) {
14         A<? extends B> v1 = new B<B>();
15         A<? extends A> v2 = v1;
16         A<? extends Object> v3 = v2;
17
18         A<? super A> v4 = new B<Object>();
19         A<? super B> v5 = v4;
20         A<?> v6 = v5;
21     }
22 }
```

# Variances

- ▶ tableaux : *covariance* avec informations de types dans les valeurs

`S[]` est sous-type de `T[]`, si `S` est sous-type de `T`

- ▶ instance de classes paramétrées :

- ▶ *covariance*

`List<S>` est sous-type de `List<? extends T>`  
si `S` est sous-type de `T`

- ▶ *contravariance*

`List<S>` est sous-type de `List<? super T>`  
si `S` est sur-type de `T`

## Exemple 2 (1)

```
1 import java.util.ArrayList;
2
3 class Vide extends Exception {}
4 class Pleine extends Exception {}
5
6 public class QueueSW<A> {
7     int taille, longueur;
8     ArrayList<A> q;
9     int tete, fin;
10
11     QueueSW(int n) {taille = n; q = new ArrayList<A>(n);}
12
13     void entrer(A x) throws Pleine {
14         if (longueur < taille) { q.add(fin++ % taille, x); longueur++;}
15         else throw new Pleine();
16     }
17
18     A partir() throws Vide {
19         if (longueur > 0) { longueur--; return q.get(tete++ % taille);}
20         else throw new Vide();
21     }
22 }
```



## Exemple 2 (2)

```
1  class K {
2      public static void main(String[] a){
3          try {
4              QueueSW<Number> q1 = new QueueSW<Number>(5);
5              q1.entrer(new Integer(3));
6              q1.entrer((Number) new Integer(2));
7              q1.entrer(new Double (2.2));
8
9              // q1.entrer((Object) new Integer(4));
10
11             Object o = q1.partir();
12             Number n = q1.partir();
13
14             // Integer x = q1.partir();
15
16         } catch (Exception e) {}
17     }
18 }
```

## Modèles et Génériques : Composite et Visiteur (Partiel L3)

```
1  abstract class Visiteur<T> {
2      public abstract T visite(CteV c);
3      public abstract T visite(AddV a);
4      public abstract T visite(MultV m);
5  }
6  abstract class ExprArV {
7      public abstract <T> T accepte(Visiteur<T> v);
8  }
9  class AddV extends OpBinV {
10     public AddV(ExprArV fg, ExprArV fd){
11         this.fg = fg; this.fd = fd;
12     }
13     public <T> T accepte(Visiteur<T> v){
14         return v.visite(this);
15     }
16 }
17 class VisiteurEval extends Visiteur<Integer> {
18     public Integer visite(AddV a){
19         Integer i1,i2;
20         i1=a.sous_expr_g().accepte(this);
21         i2=a.sous_expr_d().accepte(this);
22         return (i1 + i2);
23     }
24 }
25 // A COMPLETER...
```

# Compilation (1)

**inférence de types:** sur les inconnues ?

- ▶ capture (liaison) d'un ? avec un paramètre de type ( $\langle T \rangle$ ) :
  - ▶ liaison unique (en dehors du type de retour)
  - ▶ et le type paramétré n'est pas argument d'un autre type paramétré
- ▶ aide à l'inférence en indiquant explicitement les paramètres de type de retour

## Compilation (2)

- ▶ code compatible 1.4
- ▶ pas de changement de machine virtuelle
- ▶ remplace les types paramétrés par les types sans paramètres :
  - ▶ pas d'information du paramètre de type à l'exécution
  - ▶ ajoute des tests de typage dynamiques (warning)
  - ▶ ne va pas plus vite
- ▶ limite les possibilités de *debug*

## Compilation (3)

- ▶ papiers sur Pizza pour les techniques de compilation :
  - ▶ monomorphisation : code spécialisé pour chaque paramètre de type instancié
  - ▶ tests de typage dynamiques : code plus compact mais plus lent
- ▶ papiers sur le CLR de .NET modifié pour intégrer les *generics* de C#

⇒ la compatibilité Java coûte cher.

## Autres lectures (1)

- ▶ livre de Wadler (O'reilly) : Génériques et collections en Java
- ▶ cours de Forax (Mlv) :  
<http://www-igm.univ-mlv.fr/~forax/ens/java-avance/cours/pdf/>
- ▶ tutorial GJ :  
<http://www.cis.unisa.edu.au:80/~pizza/gj/Documents/>
- ▶ tutorial Java 1.8 :  
<https://docs.oracle.com/javase/tutorial/extra/generics/index.html>
- ▶ tutorial Pizza :  
<http://pizzacompiler.sourceforge.net/doc/tutorial.html>
- ▶ sur .NET et les generics C# :  
<http://research.microsoft.com/projects/clrgen/>

## Exemple génériques en Java (1)

retour sur la méthode copy :

```
1  class Test {
2
3      static <T> void copy( List<? extends T> src,
4                          List<? super T> dst) {
5          for (T element : src) { dst.add(element); }
6      }
7
8      public static void main(String[]a) {
9          List<Integer> li = new ArrayList<Integer>(10);
10         li.add(10); li.add(20);
11         List<Object> lo = new ArrayList<>();
12         lo.add("Hello");
13         // ok
14         copy(lo, lo);
15         copy(li, li);
16         copy(li, lo);
17         // ...

```

## Exemple génériques en Java (2)

```
1 // 18: pas ok
2 // 19:    copy (lo,li);
3     }
4 }
```

```
1 Test.java:19: error: method copy in class Test cannot be applied
2   to given types;
3     copy (lo,li);
4     ^
5   required: List<? extends T>,List<? super T>
6   found: List<Object>,List<Integer>
7   reason: inferred type does not conform to upper bound(s)
8     inferred: Object
9     upper bound(s): Integer,Object
10  where T is a type-variable:
11    T extends Object declared in method <T>copy(List<? extends T>,List<?
12    super T>)
1 error
```



# Introduction des Lambda-expressions'

Pour répondre à ces inconvénients, Java 1.8 introduit les traits de la programmation fonctionnelle :

- ▶ des lambda-expressions (notées  $\lambda$ -expressions)
- ▶ passage de paramètres fonctionnels
- ▶ composition de calculs
- ▶ retour d'une valeur fonctionnelle d'une fonction ou d'une méthode
- ▶ typage des lambda-expressions via des interfaces fonctionnelles le tout dans le cadre typé à la Java :
  - ▶ interface fonctionnelle
  - ▶ API Stream

# Création d'une valeur fonctionnelle

## Syntaxe:

(parametres) -> corps\_de\_la\_fonction

- ▶ si le corps de la fonction est une expression
- ▶ si le corps de la fonction est une suite d'instructions :  
les encadrer par des accolades, et utiliser l'instruction return

```
1 (n) -> n +1 // fonction successeur
2 (a,b) -> a * b // fonction multiplication
3 (Etudiant et) -> (et.getAge() >= 16) // ve'rififier si un e'tudiant
4 && (et.getAge() <= 23) // a entre 16 et 23 ans
```

```
1 (Etudiant et) -> { int age = et.getAge();
2 System.out.println(age);
3 return (age >= 16) && (age <= 23); }
```

Comme pour les classes locales ou anonymes, les lambda-expressions peuvent capturer des variables.

## Interface fonctionnelle

On parle d'interface fonctionnelle pour les interfaces ne contenant qu'une seule déclaration de méthode. De nombreuses interfaces fonctionnelles sont définies dans `java.util.function`.

```
1 public interface Predicate<T> {  
2     boolean test (T t) ;  
3 }  
4 public interface Function<T,R> {  
5     R apply(T t) ;  
6 }
```

On associera une telle interface comme type d'une  $\lambda$ -expression, qui devra respecter la signature de la méthode déclarée. Il n'y a pas de type fonctionnel directement manipulable.

```
1 Predicate<Etudiant> estJeune =  
2     (Etudiant et) ->  
3     (et.getAge() >= 16) && (et.getAge() <= 23) ;
```

Une  $\lambda$ -expression peut être considérée comme une implantation anonyme d'une telle interface. Elle se doit d'être compatible au niveau des types (paramètres formels et type de retour).

## Référencement de méthode

Si on désire utiliser une méthode statique existante à la place d'une fonction, il est alors possible de la référencer par la notation `::`. Les références sur les méthodes d'instance ou de classe pour un objet ou une classe données, utilisent la même notation.

```
String::valueOf      x -> String.valueOf(x)
Object::toString    x -> x.toString()
x::toString         () -> x.toString()
ArrayList::new      () -> new ArrayList<>()
```

## Utilisation d'une valeur fonctionnelle

- ▶ fonction réflexe pour l'interface graphique, ici l'interface `MouseListener` ne possède qu'un seul champ : `void mousePressed(MouseEvent e)`

```
1 MouseListener clic = (MouseEvent e) -> {
2     int x = e.getX();
3     int y = e.getY();
4     System.out.println("x = " + x + " y = "+y) ;
5     getGraphics().drawString("salut le monde", x, y)
6 } ;
7 addMouseListener(clic) ;
```

- ▶ et de manière plus concise :

```
1 MouseListener clic =
2     (e) -> getGraphics().drawString("salut le
3     monde",e.getX(),e.getY());
4 addMouseListener(clic) ;
```

## Composition de calculs et de l'ordre supérieur

On peut ainsi définir de nouveaux itérateurs basé sur les fonctions :

- ▶ `map` qui applique une fonction aux éléments d'une liste et retourne la liste des résultats
- ▶ `filter` qui retourne les éléments d'une liste qui vérifient un prédicat
- ▶ `compose` qui compose deux fonctions  $g$  et  $f$  et calcule  $g(f\ x)$

```
1 public <T, R> List<R> map(List<T> l, Function<T, R> f) ;
2 public <T> List<T> filter(List<T> l, Predicate <T>pred) ;
3 public <R,S,T> T compose(Function <S,T> g, Function<R,S> f, <R> x) ;
```

```
1 public <T> List<T> filter(List<T> l, Predicate<T> pred) {
2     List<T> r = new ArrayList<T>();
3     for (T e : l) {     if (pred.test(e)) r.add(e);     }
4     return r;
5 }
```

```
1 Predicate<Etudiant> estJeune =
2     (et) -> ((et.getAge() >=16) && (et.getAge() <= 23)) ;
3 List<Etudiant> le2 = filter(le,estJeune);
```

## Un exemple complet d'utilisation de $\lambda$ -expressions

On cherche à récupérer la liste des noms des étudiants jeunes d'une liste d'étudiants, sans tenir compte des étudiants avec un nom vide.

```
1 public List <String> getNomsEtudiantsJeunes(List<Etudiant> etudiants) {
2     List<Etudiant> l = filter(etudiants, (et) ->
3         (et.getAge() >= 16) && (et.getAge() <= 23));
4     List<Etudiant> l2 = map(l, (p) -> p.getNom());
5     List<Etudiant> l3 = filter(l2, (n) -> (! (n.getNom().equals(""))));
6     return l3.reduce("", (r,n) -> r + "," + n);
7 }
```

La classe Etudiant possède les méthodes getAge et getNom. Les collections (voir cours 8 de pobj (L3)) possèdent des méthodes utilisant des  $\lambda$ -expressions comme map, filter et reduce.

```
1 T reduce(T identity,
2     BinaryOperator<T> accumulator)
```

## Api Stream

L'Api Stream pour les flux facilite la composition fonctionnelle de calculs, et permet de les paralléliser facilement.

Quelques signatures de méthodes :

```
<R> Stream<R> map(Function<? super T,? extends R> mapper)
Stream<T> filter(Predicate<? super T> predicate)
void forEach(Consumer<? super T> consumer)
T reduce(T identity, BinaryOperator<T> accumulator)
...
```

```
1 public String getNomsEtudiantsJeunes(List<Etudiant> etudiants) {
2     return etudiants // tous les etudiants
3         .stream() // dans un flux
4         .filter((Etudiant et) -> // filtrer les jeunes
5             (et.getAge() >= 16) && (et.getAge() <= 23))
6         .map(p -> p.getNom()) // recuperer les noms
7         .filter(n -> !(n.equals(""))) // sauf les ""
8         .reduce("", (res, n) -> res + ", " + n) ; // les concatener tous
9 }
```