

1 Introduction

Les bases de la généricité en Java ont été introduites lors d'une leçon précédente. Il reste néanmoins deux aspects de la généricité à présenter : les bornes inférieures et les `jokers`. Avant de pouvoir les présenter, il importe toutefois d'examiner en détail la notion de sous-typage, cruciale à leur compréhension.

2 Sous-typage

En Java, chaque classe, énumération et interface définit un type, et ces types sont liés entre eux par une relation de sous-typage. Cette relation de sous-typage est déterminée par la manière dont les classes et interfaces sont liées entre elles : lorsqu'une classe hérite d'une autre, son type est sous-type de celui de sa super-classe, et il en va de même pour les interfaces ; de plus, lorsqu'une classe implémente une interface, son type est sous-type de celui de l'interface.

Par exemple, le type `String` est un sous-type du type `Object` car la classe `String` hérite de la classe `Object`. De manière similaire, le type `Number` est un sous-type du type `Serializable` car la classe `Number` implémente l'interface `Serializable`.

Pour mémoire, le sous-typage est important en raison du **polymorphisme d'inclusion**, qui permet de substituer à une valeur d'un type `T1` donné une valeur d'un autre type `T2` pour peu que `T2` soit un sous-type de `T1`. On appelle aussi cela le **principe de substitution** (*substitution principle*).

Par exemple, si une fonction prend en argument une valeur de type `Number`, en plus d'une valeur de ce type on peut lui passer une valeur de type `Integer`, `Double`, etc. qui sont des sous-types de `Number`. Ainsi, l'appel à `add` ci-dessous est valide en raison du principe de substitution :

```
Number add(Number n1, Number n2) {  
    return new Double(n1.doubleValue() + n2.doubleValue());  
};
```

```
}  
add(new Integer(1), new Double(3.14));
```

Formellement, la relation de sous-typage est :

- **réflexive**, c-à-d que tout type est sous-type de lui-même,
- **transitive**, c-à-d que si un type T_1 est sous-type d'un type T_2 et T_2 est sous-type de T_3 , alors T_1 est aussi sous-type de T_3 ,
- **anti-symétrique**, c-à-d que si T_1 est sous-type de T_2 et T_2 est sous-type de T_1 , alors $T_1 = T_2$.

En mathématiques, une relation possédant ces trois propriétés est appelée un **ordre partiel** (*partial order*).

Comme tout ordre partiel, la relation de sous-typage Java peut être visualisée sous la forme d'un graphe dirigé dans lequel chaque type est un nœud et un arc lie le nœud d'un type à celui de ses super-types directs. La figure 1 présente un minuscule extrait du graphe des types standard Java.

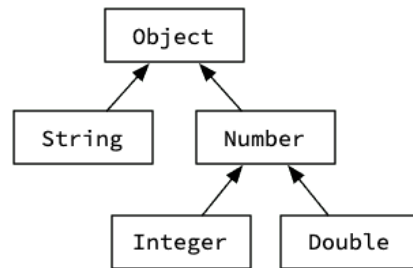


Fig. 1 : Extrait du graphe des types standard Java

A noter que lorsqu'un type T_2 est sous-type d'un type T_1 , on dit que T_1 est un **super-type** de T_2 .

3 Sous-typage et généricité

Le sous-typage et la généricité interagissent de manière non triviale et parfois surprenante. Pour l'illustrer, nous utiliserons l'interface générique `List` ci-dessous, une version simplifiée de celle de la bibliothèque Java, ainsi que sa mise en œuvre (simplifiée) `LinkedList`, que l'on suppose exister.

Le seul moyen de rendre l'appel à `addAll` valide est donc de changer le type de la seconde liste pour en faire une liste de `Number`. Cela n'est pas très satisfaisant, car il

loin la raison de cette restriction. n'est jamais sous-type de `List<V>` sauf dans le cas trivial où `V = V`. Nous verrons plus type d'une autre instanciation de ce même type générique ! Par exemple, le type `List<U>` Ce code est refusé car, en Java, une instanciation d'un type générique n'est *jamais* sous-

```
List<Number> l = new LinkedList<>();
List<Integer> li = new LinkedList<>();
Integer i = 1;
li.add(i);
l.addAll(li); // refusé !
```

Malheureusement, cette méthode `addAll` n'est pas utilisable comme nous le désirons, car l'ajout d'une liste d'entiers `Integer` à une liste de nombres `Number` est invalide :

```
public interface List<E> {
    // ...
    void addAll(List<E> other);
}
public class LinkedList<E> implements List<E> {
    // ...
    void addAll(List<E> other) {
        // ...
        void addAll(List<E> other) {
            for (E elem: other)
                add(elem);
        }
    }
}
```

Pour faciliter l'ajout de tous les éléments d'une liste à une liste existante, on peut vouloir ajouter une méthode `addAll` à `List`. Une première version de cette méthode pourrait ressembler à ceci :

```
List<Number> l = new LinkedList<>();
Integer i = 1;
l.add(i); // valide car Integer est sous-type de Number
Double d = 3.14;
l.add(d); // valide car Double est sous-type de Number
```

Le principe de substitution nous permet d'ajouter n'importe quel type de nombre — c-à-d n'importe quel sous-type de `Number` — à une liste de nombres :

```
public interface List<E> implements Iterable<E> {
    void add(E newElem);
    Iterator<E> iterator();
}
```

est clairement valide d'ajouter une liste d'entiers à une liste de nombres. Il nous faudra trouver une solution !

Attention toutefois, la restriction mentionnée ne signifie pas que deux types génériques différents ne peuvent pas être liés par la relation de sous-typage. Par exemple, `LinkedList<String>` est un sous-type de `List<String>` car la classe générique `LinkedList<E>` implémente l'interface `List<E>`. Par contre, deux instantiations différentes du même type générique ne sont jamais liées entre elles par la relation de sous-typage.

Cela est illustré par la figure 2 qui montre la relation de sous-typage pour deux instantiations de `List`. Il est très important de noter l'absence de flèche (donc de relation de sous-typage) entre les deux instantiations de `List` ou de `LinkedList`.

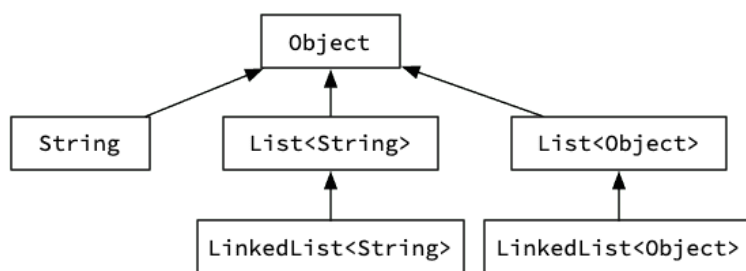


Fig. 2 : Absence de sous-typage entre instantiations de `List`

Pourquoi les concepteurs de la généricité Java ont-ils choisi d'imposer cette restriction ? Pour le comprendre, admettons que `List<Integer>` soit un sous-type de `List<Number>`. Cela nous autoriserait à écrire le code suivant :

```
void addPi(List<Number> l) {
    l.add(3.14);
}
List<Integer> l = new LinkedList<>();
addPi(l);
```

Or ce code est clairement faux, car il ajoute un nombre réel — une valeur de type `Double`, pour être précis — à une liste de nombre entiers.

3.1 Borne supérieure

N'est-il pas possible de définir une méthode `addAll` qui soit plus générale que celle définie précédemment, et qui permette l'ajout — valide — d'une liste d'entiers à une liste de nombres ? Oui, mais il faut pour cela la rendre générique et *borner* son paramètre de type. C'est ce qui est fait dans la nouvelle version de la méthode `addAll` ci-dessous :

- *Java Generics FAQ* d'Angelika Langer, une liste des questions fréquentes liées à la généricité Java, et leur réponse.

```
interface List<E> {
    // ...
    <F extends E> void addAll(List<F> other);
}
```

Comme nous l'avons vu précédemment, la notation <F extends E> déclare que la méthode addAll est générique, son paramètre de type s'appelle F, et il est borné par E. Cela signifie que, pour qu'une utilisation de cette méthode soit valide, il faut que le type du paramètre F soit un sous-type du type du paramètre E.

Grâce à cette borne, le code précédent est maintenant valide :

```
List<Number> l = new LinkedList<>();
List<Integer> li = new LinkedList<>();
Integer i = 1;
li.add(i);
l.addAll(li);
```

et le type inféré pour le paramètre de type F est Integer. La borne est clairement respectée, puisque E est instancié à Number pour la liste l, et Integer est un sous-type de Number. En résumé, la borne (supérieure) utilisée ici permet l'utilisation de n'importe quel sous-type de la borne, Number dans cet exemple. Cela est illustré par la figure 3.

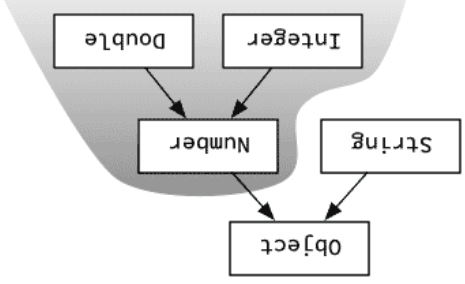


Fig. 3 : Borne supérieure

Bien entendu, changer le type dans l'interface List n'a de sens que si les mises en œuvre concrètes de la méthode restent valides. Pour addAll, c'est le cas :

```
public class LinkedList<E> implements List<E> {
    // ...
    <F extends E> void addAll(List<F> other) {
        for (F elem: other) {
            add(elem);
        }
    }
}
```

Quel type de borne utiliser et pourquoi ? Aucune — ou les deux, ce qui revient au même — car on veut à la fois lire et écrire dans le récepteur !

Règle des bornes : Lorsqu'on désire uniquement lire dans une structure, on utilise une borne supérieure (avec extends) ; lorsqu'on désire à la fois y lire et y écrire, on litse une borne inférieure (avec super) ; lorsqu'on désire à la fois y lire et y écrire, on n'utilise aucune borne.

En anglais, cette règle est parfois désignée par *PECS*, acronyme de *Producer Extends, Consumer Super* qui permet de se souvenir facilement que :

- lorsque la structure que l'on utilise est un producteur, c-à-d qu'on y lit des valeurs, il faut utiliser extends pour borner son type, et
- lorsque la structure que l'on utilise est un consommateur, c-à-d qu'on y écrit des valeurs, il faut utiliser super pour borner son type.

Lorsqu'on désire à la fois lire et écrire, on ne peut borner son type.

5 Références

- *Effective Java (3rd ed.)* de Joshua Bloch, en particulier :
 - la règle 31, *Use bounded wildcards to increase API flexibility* sur l'utilisation judicieuse des jokers bornés,
- *Java Generics and Collections* de Maurice Natralin et Philip Wadler, O'Reilly Media,

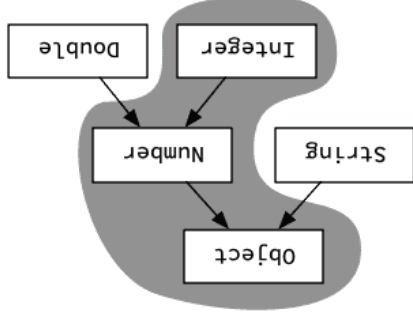


Fig. 4 : Borne inférieure

}

```
}
```

Cette définition de `addAll` est valide, car le principe de substitution autorise l'ajout, via la méthode `add`, d'un élément de type `F` à une liste dont les éléments ont le type `E`, étant donné que la borne garantit que `F` est un sous-type de `E`.

4 Jokers (ou *wildcards*)

Le paramètre de type `F` de la méthode `addAll` n'est pas utilisé ailleurs que dans son type. Il n'est donc pas nécessaire de le nommer, et Java permet d'utiliser dans ce cas un *joker* (*wildcard*) borné, noté `?` :

```
public interface List<E> {  
    // ...  
    void addAll(List<? extends E> other);  
}
```

Cette version de `addAll` est totalement équivalente à la précédente, mais plus concise et donc généralement préférable.

A noter qu'il est aussi possible d'utiliser un joker sans le borner explicitement, ce qui équivaut à le borner avec `Object`. Par exemple, `List<?>` est équivalent à `List<? extends Object>`.

4.1 Bornes inférieures

Nous avons réussi à définir une méthode `addAll` satisfaisante. Essayons maintenant de définir une méthode `addAllInto` qui ajoute tous les éléments du récepteur dans la liste passée en argument. Notre première tentative pourrait ressembler à ceci :

```
public interface List<E> {  
    // ...  
    void addAllInto(List<E> other);  
}  
class LinkedList<E> implements List<E> {  
    // ...  
    void addAllInto(List<E> other) {  
        other.addAll(this);  
    }  
}
```

Bien entendu, cette première version possède les mêmes limitations que notre première version de la méthode `addAll`, à savoir que le code suivant est invalide :

```
List<Number> l = new LinkedList<>();  
List<Integer> li = new LinkedList<>();
```

```
Integer i = 1;  
li.add(i);  
li.addAllInto(l); // refusé !
```

Nous pourrions bien entendu essayer de résoudre le problème de la même manière que pour `addAll`, c-à-d en utilisant un joker équipé d'une borne supérieure :

```
public interface List<E> {  
    // ...  
    void addAllInto(List<? extends E> other);  
}  
List<Number> l = new LinkedList<>();  
List<Integer> li = new LinkedList<>();  
Integer i = 1;  
li.add(i);  
li.addAllInto(l);
```

Malheureusement cela ne fonctionne pas car la borne de `addAllInto` doit être une borne *inférieure* et pas supérieure ! Heureusement, Java offre de telles bornes sur les jokers — mais pas sur les paramètres de type :

```
public interface List<E> {  
    // ...  
    void addAllInto(List<? super E> other);  
}  
List<Number> l = new LinkedList<>();  
List<Integer> li = new LinkedList<>();  
Integer i = 1;  
li.add(i);  
li.addAllInto(l);
```

La borne inférieure permet l'utilisation de n'importe quel super-type de la borne, ici `Integer`, ce qui est illustré par la figure 4.

Pour terminer, admettons que l'on désire définir une méthode `addAllFromAndInto` qui ajoute tous les éléments de l'argument au récepteur et inversement :

```
public interface List<E> {  
    // ...  
    void addAllFromAndInto(List<E> other);  
}  
class LinkedList<E> implements List<E> {  
    // ...  
    void addAllFromAndInto(List<E> other) {  
        this.addAll(other);  
        other.addAll(this);  
    }  
}
```