Collections : Ensembles

Michel Schinz

2018-03-19

1 Ensembles

Un **ensemble** (*set*) est une collection non ordonnée d'objets dans laquelle un objet peut apparaître au plus une fois. Cette notion d'ensemble correspond à la notion mathématique.

2 Ensembles en Java

Dans la bibliothèque Java, le concept d'ensemble est représenté par l'interface `Set` et parmi les mises en œuvres figurent les classes `HashSet` et `TreeSet`.

L'extrait de programme ci-dessous illustre leur utilisation en créant tout d'abord l'ensemble des voyelles non accentuées de l'alphabet latin puis en l'utilisant pour déterminer le nombre de voyelles que comporte le mot *deinstitutionalization* :

```
Set<Character> vowels = new HashSet<>();
vowels.addAll(Arrays.asList('a','e','i','o','u','y'));

String word = "deinstitutionalization";
int vowelCount = 0;
for (int i = 0; i < word.length(); ++i) {
  if (vowels.contains(word.charAt(i)))
    vowelCount += 1;
}
System.out.println("Le␣mot␣" + word + "␣contient␣"
                   + vowelCount + "␣voyelles.");
```

2.1 L'interface `Set`

Le concept d'ensemble est représenté dans l'API Java par l'interface `Set` du paquetage `java.util`. Tout comme `Collection` — dont elle hérite — cette interface est générique et son paramètre de type représente le type des éléments de l'ensemble :

```
public interface Set<E> extends Collection<E> { }
```

Cette interface n'ajoute aucune méthode à celles héritées de `Collection`, son seul but étant d'offrir un type distinct pour les ensembles.

Aux principales opérations sur les ensembles mathématiques correspond une méthode de l'interface `Set`, avec une différence importante : contrairement aux opérations mathématiques, les méthodes modifient l'ensemble auquel on les applique. La table ci-dessous donne les méthodes correspondant aux opérations mathématiques.

Opération	Méthode
union ($\cup$)	`addAll`
test d'appartenance ($\in$?)	`contains`
test d'inclusion ($\subseteq$?)	`containsAll`
différence ($\setminus$)	`removeAll`
intersection ($\cap$)	`retainAll`

2.2 Ensembles immuables

Tout comme pour les listes, l'interface `Set` offre une méthode statique permettant de construire un ensemble immuable :

- `<E> Set<E> of(E... es)`, retourne un ensemble immuable contenant les éléments donnés.

De plus, la classe `Collections` (avec un *s*) offre des méthodes permettant de créer des ensembles immuables :

- `<E> Set<E> emptySet()` : retourne un ensemble immuable vide,
- `<E> Set<E> singleton(E e)` : retourne un ensemble immuable contenant uniquement l'élément donné.

2.3 Ensembles non modifiables

Tout comme pour les listes, la classe `Collections` offre une méthode permettant d'obtenir une vue non modifiable sur un ensemble :

- `<E> Set<E> unmodifiableSet(Set<E> s)`

Comme d'habitude, il faut prendre garde au fait qu'il s'agit d'une vue et que toute éventuelle modification à l'ensemble sous-jacent sera répercutée sur la vue ! Celle-ci est donc non modifiable mais pas forcément immuable.

Dès lors, comme avec les listes, pour obtenir une version immuable d'un ensemble, il faut copier celui-ci (aussi profondément que nécessaire) et ensuite obtenir une vue non modifiable sur cette copie.

- la règle 10, *Obey the general contract when overriding equals* sur la redéfinition de la méthode `equals`.
- la règle 11, *Always override hashCode when you override equals* sur la compatibilité des méthodes `hashCode` et `equals`.

- la documentation de l'API Java, en particulier les classes et interfaces suivantes :
  - pour les ensembles :
    - l'interface `java.util.Set`,
    - la classe `java.util.HashSet`,
    - la classe `java.util.TreeSet`,
  - pour l'égalité et le hachage :
    - les méthodes `equals` et `hashCode` de la classe `java.lang.Object`,
    - la méthode `hash` de la classe `java.util.Objects`,
  - pour l'ordre :
    - l'interface `java.lang.Comparable`,
    - l'interface `java.util.Comparator`.

Règle des ensembles immuables : Pour obtenir un ensemble immuable à partir d'un ensemble quelconque, obtenez une vue non modifiable d'une copie de cet ensemble.

La copie peut se faire au moyen du constructeur de copie de l'une des mises en œuvre. Par exemple, en utilisant `HashSet`, on obtient :

```
Set…<> immutableSet =
  Collections.unmodifiableSet(new HashSet<>(set));
```

2.4 Parcours

Etant donné que l'interface `Set` implémente (indirectement) l'interface `Iterable`, les éléments d'un ensemble peuvent être parcourus au moyen d'un itérateur ou de la boucle *for-each*, comme ceux d'une liste.

Attention : contrairement aux éléments d'une liste, les éléments d'un ensemble ne sont pas ordonnés. Dès lors, l'ordre de parcours des éléments d'un ensemble dépend de la mise en œuvre utilisée :

- `TreeSet` les parcourt dans l'ordre croissant,
- `HashSet` les parcourt dans un ordre arbitraire, qui peut changer d'une exécution à l'autre d'un programme, et même être différent entre deux instances contenant les *mêmes* éléments !

2.5 Mises en œuvres des ensembles

On l'a dit, la bibliothèque Java offre deux mises en œuvre principales des ensembles. Avant de les examiner et de les comparer, posons-nous toutefois la question de leur utilité. Ne serait-il pas possible d'utiliser simplement des listes (sans doublons) afin de représenter les ensembles ?

En théorie, oui, et cela est même relativement simple sachant que la seule différence entre une liste « normale » et une liste représentant un ensemble est que cette dernière ne contient pas de doublons. Pour garantir cette propriété, il suffit d'utiliser la méthode `contains` fournie par l'interface `Collection` afin de s'assurer de l'absence d'un élément avant de l'ajouter à la liste.

Malheureusement, représenter un ensemble au moyen d'une liste est extrêmement coûteux, car les principales opérations (ajout, test d'appartenance, etc.) ont une complexité de $O(n)$. Intuitivement, cela est dû au fait que chacune de ces opérations nécessite un parcours de la totalité des éléments de la liste.

D'autres mises en œuvre, plus efficaces, sont donc fournies dans la bibliothèque Java. Néanmoins, chacune d'entre elles exige que certaines opérations puissent être effectuées sur les éléments de l'ensemble, afin de pouvoir les organiser en mémoire. Les deux mises en œuvre que nous examinerons, et leurs exigences concernant les éléments, sont :

- `TreeSet`, qui exige que les éléments de l'ensemble puissent être triés,
- `HashSet`, qui exige que les éléments de l'ensemble puissent être « hachés », notion examinée plus bas.

`TreeSet` doit son nom au fait qu'elle stocke les éléments de l'ensemble dans un **arbre binaire de recherche** (*binary search tree*), tandis que `HashSet` doit le sien au fait qu'elle les stocke dans une **table de hachage** (*hash table*). Ces concepts seront examinés ultérieurement, mais il importe déjà de savoir que grâce à eux, `TreeSet` peut mettre en œuvre les opérations principales sur les ensembles (ajout, test d'appartenance, etc.) en $O(\log n)$, tandis que `HashSet` fait encore mieux et les met en œuvre en $O(1)$, ce qui est remarquable !

Malgré ses performances moindres, `TreeSet` offre néanmoins un avantage par rapport à `HashSet`, déjà mentionné plus haut : étant donné qu'elle stocke les éléments de l'ensemble sous forme triée, ceux-ci sont parcourus dans cet ordre. `HashSet`, quant à celle, ne donne aucune garantie concernant l'ordre de parcours. Dès lors, malgré ses meilleures performances, `HashSet` n'est pas forcément toujours préférable à `TreeSet`.

Règle `HashSet` / `TreeSet` : Utilisez `HashSet` comme mise en œuvre des ensembles en Java, sauf lorsqu'il est utile de parcourir les éléments en ordre croissant, auquel cas vous pourrez lui préférer `TreeSet`.

3 Exigences concernant les éléments

Comme cela a été mentionné ci-dessus, les mises en œuvre `TreeSet` et `HashSet` exigent chacune qu'il soit possible d'effectuer certaines opérations sur les éléments de l'ensemble, qu'il convient d'examiner en détail.

Avant cela, il faut toutefois se rendre compte que les ensembles eux-mêmes sont plus exigents que les listes concernant les éléments qu'ils contiennent. En effet, si les éléments d'une liste peuvent être quelconques, celle-ci se contentant de les stocker, les éléments d'un ensemble doivent au moins être dotés d'une notion d'égalité ! Pourquoi ? Car un ensemble ne peut pas contenir de doublons, or pour déterminer si un élément est un doublon d'un autre, il faut une notion d'égalité.

Commençons donc par examiner la notion d'égalité et sa mise en œuvre dans la bibliothèque Java.

3.1 Egalité

La notion d'égalité peut sembler évidente au premier abord, mais elle est loin de l'être en pratique.

Pour illustrer les problèmes qu'elle peut poser, considérons deux billets de banque neufs et de même valeur. Sont-ils égaux ? Comme il s'agit de deux billets distincts, portant


```
  @Override
  public int hashCode() {
    return Objects.hash(firstName, lastName, birthDate);
  }
}
```

La règle ci-dessus admet quelques exceptions dans des cas particuliers :

1. une classe ne possédant qu'un seul attribut peut utiliser la valeur de hachage de cet attribut comme sa propre valeur de hachage, sans passer par la méthode `hash`,
2. une classe ne possédant qu'un seul attribut de type entier, p.ex. `int`, peut directement utiliser sa valeur comme valeur de hachage.

3.3.3 `HashSet`

La classe `HashSet` met en œuvre les ensembles d'éléments en les distribuant en mémoire selon leur valeur de hachage, afin de pouvoir y accéder plus rapidement. Une conséquence de cette technique de mise en œuvre est que l'ordre dans lequel les éléments d'un tel ensemble est parcouru est quelconque.

3.4 Résumé

Les exigences placées par les listes et les ensembles (et leurs mises en œuvre) en Java sont résumées par la table ci-dessous. Pour chaque type de collection, elle montre les méthodes qui doivent être fournies (correctement !) par les éléments pour qu'on puisse les stocker dans la collection en question. Etant donné que `TreeSet` offre deux possibilités pour déterminer l'ordre des éléments, cette collection apparaît deux fois dans la table.

Collection	Méthodes requises
`List<E>`	*aucune*
`Set<E>`	`equals`
`HashSet<E>`	`equals` et `hashCode`
`TreeSet<E>`	`equals` et `compareTo`
`TreeSet<E>`	`equals` et `compare`

4 Références

- Java Generics and Collections de Maurice Naftalin et Philip Wadler, en particulier :
  - le chapitre 13, *Sets* sur les ensembles.
- *Effective Java (3rd ed.)* de Joshua Bloch, en particulier :

3.3.2 Hachage en Java

Les concepteurs de Java ont fait le choix — discutable — de fournir dans la classe `Object` la méthode `hashCode` qui retourne, sous la forme d'un entier de type `int`, une valeur de hachage de l'objet auquel on l'applique.

La mise en œuvre par défaut de cette méthode — héritée par toute classe qui ne la redéfinit pas — retourne une valeur qui dépend de l'identité de l'objet. Par défaut, deux objets distincts ont donc *généralement* une valeur de hachage distincte. Attention toutefois : cela n'est pas garanti !

Il est absolument fondamental que deux objets considérés comme égaux par `equals` aient la même valeur de hachage d'après `hashCode`, faute de quoi `hashCode` ne définit pas une fonction de hachage au sens mathématique. En d'autres termes, la propriété suivante doit être satisfaite pour toute paire d'objets `x` et `y` :

$$\texttt{x.equals(y)} \Rightarrow \texttt{x.hashCode() == y.hashCode()}$$

Les méthodes `hashCode` et `equals` d'une classe donnée sont dites **compatibles** si cette condition est satisfaite.

> **Règle de compatibilité `hashCode` / `equals` :** Si vous redéfinissez `hashCode` dans une classe, redéfinissez également `equals` — et inversement — afin que ces deux méthodes restent compatibles.

L'écriture de fonctions de hachage de qualité étant très difficile, il est préférable de laisser cette tâche à des spécialistes. Heureusement, depuis peu la bibliothèque Java offre dans la classe `Objects` (avec un *s* !) du paquetage `java.util` la méthode (statique) `hash` permettant de calculer une valeur de hachage pour une combinaison arbitraire d'objets :

- `int hash(Object... values)`

> **Règle de mise en œuvre de `hashCode` :** Lorsque vous redéfinissez `hashCode`, utilisez la méthode statique `hash` de la classe `Objects` pour la mettre en œuvre, en lui passant tous les attributs à hacher.
>
> Cette règle admet quelques exceptions, présentées plus bas.

Par exemple, pour une classe représentant une personne, la méthode `hashCode` pourrait être redéfinie ainsi :

```
public final class Person {
  private final String firstName, lastName;
  private final Date birthDate;

  // … constructeur et autres méthodes
```


un numéro de série différent, on pourrait être tenté de répondre que non. Mais il est bien clair que dans la quasi totalité des situations, ils sont parfaitement substituables l'un à l'autre. Dès lors, dans la plupart des cas, il paraît assez logique de les considérer comme égaux.

Comme cet exemple simple l'illustre, il n'y a pas (en général) de notion absolue d'égalité, et déterminer quelle notion d'égalité utiliser dans un contexte donné n'est pas toujours facile.

3.1.1 Egalité en Java

En programmation, des difficultés similaires à celle de l'exemple ci-dessus se posent. Pour l'illustrer, considérons l'extrait de programme suivant, qui crée deux instances de `Integer`, chacune représentant l'entier 5 :

```
Integer i1 = new Integer(5);
Integer i2 = new Integer(5);
```

Les objets référencés par `i1` et `i2` sont-ils égaux ou non ? La réponse dépend du point de vue que l'on adopte, comme pour l'exemple des billets de banque.

Les objets référencés par `i1` et `i2` sont des objets distincts, dans le sens où ils occupent une position différente en mémoire. En conséquence, s'il était possible de changer l'entier stocké dans une instance de la classe `Integer` (ce qui n'est pas le cas, cette classe étant immuable), il serait possible de changer le contenu de l'un des deux objets sans que le contenu de l'autre ne soit affecté. De ce point de vue, on peut donc considérer que ces objets ne sont pas égaux.

Cela dit, même si les objets référencés par `i1` et `i2` sont distincts, leur contenu est identique. De cet autre point de vue, on peut donc les considérer comme égaux.

Dès lors, suivant le point de vue adopté, on peut dire que les objets référencés par `i1` et `i2` sont égaux ou non. Les deux points de vue mentionnés ci-dessus correspondent à deux notions d'égalité que l'on retrouve dans beaucoup de langages de programmation, à savoir :

1. l'égalité **par référence** (ou **par identité**), qui considère deux objets égaux si et seulement si il s'agit d'un seul et même objet,

2. l'égalité **par structure** (ou **structurelle**), qui considère deux objets égaux si et seulement si leur contenu est identique.

L'égalité par référence est la plus discriminante : deux objets égaux par référence sont forcément égaux par structure, mais deux objets égaux par structure ne sont pas forcément égaux par référence. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, les objets référencés par `i1` et `i2` ne sont pas égaux par référence mais le sont par structure.

En Java, l'égalité par référence est prédéfinie sous la forme de l'opérateur `==`. De plus, la méthode `equals` définie dans `Object` — et donc héritée par toute classe qui ne la redéfinit pas — effectue une comparaison par référence.

L'égalité structurelle n'est par contre pas prédéfinie en Java. Pour que les instances d'une classe soient comparées par structure, il faut que celle-ci redéfinisse la méthode `equals` et mette en œuvre l'égalité structurelle. De manière générale, il est conseillé de le faire pour les classes immuables, et pour elles seulement, étant donné que l'identité de leurs instances n'a aucune importance.

Règle de l'égalité et de l'immuabilité : Lors de la définition d'une classe immuable, redéfinissez la méthode `equals` afin que ses instances soient comparées par structure. Ne le faites pas lors de la définition d'une classe non immuable.

Notez que, malheureusement, beaucoup de classes de la bibliothèque Java violent cette règle, à commencer par toutes les collections qui ne sont pas immuables mais néanmoins comparées par structure.

3.2 Ordre

Après la notion d'égalité, la seconde notion qu'il convient d'examiner en détail est celle d'ordre. En effet, même s'il n'est pas indispensable de pouvoir ordonner des éléments pour les stocker dans un ensemble (une simple notion d'égalité suffit, comme on l'a vu), cette possibilité permet de fournir une mise en œuvre assez efficace. Intuitivement, cela paraît logique : chercher le nom d'une personne dans une longue liste, par exemple, est beaucoup plus rapide si celle-ci est triée par ordre alphabétique que si elle ne l'est pas.

3.2.1 Ordre en Java

En Java, il existe deux moyens de spécifier comment ordonner les instances d'une classe donnée :

1. en lui faisant implémenter l'interface `Comparable` et donc fournir une méthode permettant de comparer une instance donnée avec une autre,
2. en utilisant un comparateur, qui est un objet externe à la classe, implémentant l'interface `Comparator` et sachant comparer deux instances de celle-ci.

Ces deux options sont décrites ci-après.

3.2.2 L'interface `Comparable`

L'interface `Comparable` du paquetage `java.lang` peut être implémentée par toute classe dont les instances sont comparables entre elles. Elle permet d'attacher une notion d'ordre aux instances de la classe en question.

L'interface `Comparable` contient une seule méthode, `compareTo`, qui compare l'objet auquel on l'applique (le récepteur) à un autre objet passé en argument. L'entier retourné par cette méthode est négatif si le récepteur est strictement inférieur à l'argument, nul si les deux sont égaux, et positif sinon.

fonction de hachage (*hash function*) qui, appliquée à une donnée, produit l'entier qui lui correspond, que l'on nomme sa **valeur de hachage** (*hash value*).

Un exemple de fonction de hachage sur les chaînes de caractères composées uniquement des 26 lettres non accentuées de l'alphabet latin est :

$$h(c) = \sum_{i=1,\ldots,n} \text{pos}(c_i) \bmod 100$$

où pos retourne la position d'une lettre dans l'alphabet — *a* étant à la position 1, *b* à la position 2, etc. Par exemple :

$$\begin{aligned} h(\text{chien}) &= (3+8+9+5+14) \bmod 100 = 39 \\ h(\text{niche}) &= (14+9+3+8+5) \bmod 100 = 39 \\ h(\text{zoologie}) &= (26+15+15+12+15+7+9+5) \bmod 100 = 4 \end{aligned}$$

Le hachage est une technique fondamentale en informatique qui rencontre de nombreuses applications, p.ex. en cryptographie. Ici, nous n'examinerons que son utilisation dans le cadre des collections.

Une fonction de hachage est une fonction mathématique, au sens où lorsqu'on l'applique à deux valeurs égales, elle produit la même valeur de hachage. En d'autres termes, toute fonction de hachage h satisfait la propriété suivante :

$$\forall x, y : x = y \Rightarrow h(x) = h(y)$$

L'implication inverse n'est vraie que pour le cas — très rare en pratique — des fonctions de hachage parfaites.

Une fonction de hachage h est dite **parfaite** si elle fait correspondre une valeur de hachage différente à chaque donnée à laquelle on peut l'appliquer, c-à-d si :

$$\forall x, y : x \neq y \Rightarrow h(x) \neq h(y)$$

ce qui est équivalent à :

$$\forall x, y : h(x) = h(y) \Rightarrow x = y$$

En termes mathématiques, une fonction de hachage est parfaite ssi elle est injective.

En pratique, cette condition n'est que rarement satisfaite. Selon le principe des tiroirs (*pigeonhole principle*), elle ne peut d'ailleurs pas l'être si le nombre de données possibles est plus grand que le nombre de valeurs de hachage possibles, ce qui est fréquemment le cas.

Les fonctions de hachage ne pouvant généralement pas être parfaites, elle doivent être conçues pour distribuer aussi bien que possible les valeurs rencontrées en pratique. Cette condition est malheureusement très difficile à spécifier et à garantir, la définition de bonnes fonctions de hachage étant plus un art qu'une science.

Lorsque deux données distinctes possèdent la même valeur de hachage, c-à-d lorsque $x \neq y$ mais $h(x) = h(y)$, on dit qu'il y a **collision de hachage** (*hashing collision*).

```
}

Collections.sort(l, new IntInvComparator());
System.out.println(l); // imprime [8,7,6,5,4,3,2,1]
```

3.2.5 TreeSet

La classe `TreeSet` met en œuvre les ensembles d'éléments en les triant en mémoire, afin de pouvoir y accéder plus rapidement. Une conséquence intéressante de cette organisation est que, lors d'un parcours, les éléments sont toujours fournis triés en ordre croissant.

Par défaut, une instance de `TreeSet` utilise l'ordre naturel des éléments qu'elle contient pour les trier. Ainsi, l'extrait de programme suivant affiche les éléments de l'ensemble construit (tous les entiers de 1 à 8) dans l'ordre croissant :

```
Set<Integer> s = new TreeSet<>();
s.addAll(Arrays.asList(1,3,5,7,2,4,6,8));
for (int i: s)
  System.out.println(i); // imprime 1, puis 2, …, puis 8
```

Il est également possible de créer une instance de `TreeSet` triant ses éléments selon l'ordre d'un comparateur donné explicitement. Celui-ci doit être passé lors de la construction de l'ensemble. La variante ci-dessous de l'extrait de programme précédent passe un comparateur qui trie les éléments de l'ensemble du plus grand au plus petit (une instance de la classe `IntInvComparator` définie plus haut), et ils sont donc affichés dans cet ordre :

```
Set<Integer> s = new TreeSet<>(new IntInvComparator());
s.addAll(Arrays.asList(1,3,5,7,2,4,6,8));
for (int i: s)
  System.out.println(i); // imprime 8, puis 7, …, puis 1
```

3.3 Hachage

Après les notions d'égalité et d'ordre, il convient d'examiner une troisième notion très utile (entre autres) dans la mise en œuvre des ensembles : le hachage. Cette notion permet de mettre en œuvre les ensembles de manière plus efficace encore que l'ordre, mais pour des raisons peut-être moins faciles à comprendre intuitivement.

3.3.1 Hachage

Le **hachage** (*hashing*) consiste à transformer une donnée quelconque en un entier, généralement compris dans un intervalle borné. Cette transformation est faite par une


```
public interface Comparable<T> {
  int compareTo(T that);
}
```

Le fait que l'interface `Comparable` soit générique peut surprendre. A quoi sert son paramètre de type ?

Pour répondre à cette question, il faut constater qu'il donne le type de l'argument de la méthode `compareTo`. Pour comprendre pourquoi cela peut être utile, prenons un cas concret, par exemple celui de la classe `Integer`. De quel type devrait être l'argument la méthode `compareTo` de cette classe ? Logiquement, ce type devrait être `Integer` également, car le seul type d'objets avec lequel il est sensé de comparer une instance de `Integer` est une autre instance de `Integer`…

```
public final class Integer {
  private final int value;

  // … autres attributs et méthodes

  public int compareTo(Integer that) {
    // … compare this.value et that.value
  }
}
```

Dès lors, lorsqu'elle implémente l'interface `Comparable`, la classe `Integer` doit lui passer *son propre type* en argument :

```
public final class Integer implements Comparable<Integer>{
  private final int value;

  // … autres attributs et méthodes

  @Override
  public int compareTo(Integer that) {
    // … compare this.value et that.value
  }
}
```

De manière générale, toute classe qui implémente l'interface `Comparable` lui passe son propre type en paramètre.

En résumé, la raison pour laquelle l'interface `Comparable` est générique est que cela permet d'assurer que le type de l'argument passé à la méthode `compareTo` est le même que le type du récepteur. Cette utilisation particulière de la généricité est une petite astuce qu'il est bon de connaître, car elle est utile et se rencontre fréquemment en pratique.

Une classe implémentant l'interface `Comparable` possède deux manières de tester l'égalité de deux de ses instances :

1. via la méthode `equals` héritée (ou redéfinie) de `Object`,
2. via la méthode `compareTo` de `Comparable`.

Bien entendu, il est important que ces deux méthodes s'accordent sur l'ensemble des objets qui sont égaux, ce qui est énoncé par la règle suivante :

Règle de compatibilité `compareTo` / `equals` : Lorsque vous définissez une classe qui implémente l'interface `Comparable`, assurez-vous que sa méthode `compareTo` soit compatible avec sa méthode `equals`.

Les méthode `compareTo` et `equals` d'une classe donnée sont compatibles ssi elles considèrent exactement les mêmes couples d'objets comme étant égaux, donc si, pour toutes paires d'instances `o1` et `o2` de cette classe, on a :

`o1.equals(o2)` ⇔ `o1.compareTo(o2) == 0`

3.2.3 L'interface `Comparator`

Il est évident qu'en Java, une classe donnée ne peut avoir qu'une seule version de la méthode `compareTo`, puisque celle-ci appartient directement à la classe. L'ordre qui est ainsi « attaché » à une classe via sa méthode `compareTo` est appelé **l'ordre naturel** (*natural order*) de cette classe.

Par exemple, l'ordre lexicographique (du dictionnaire) a été choisi par les concepteurs de la classe `String` comme étant l'ordre naturel des chaînes de caractères.

Parfois, plusieurs notions d'ordres peuvent être utiles pour un même type, et il est donc important d'avoir un moyen d'ordonner des valeurs qui soit externe à leur classe. C'est le but de la notion de comparateur.

L'interface `Comparator` du paquetage `java.util` décrit un comparateur, c-à-d un objet capable de comparer deux autres objets d'un type donné. Le paramètre de type de cette interface spécifie le type des objets que le comparateur sait comparer :

```
public interface Comparator<T> {
  int compare(T o1, T o2);
}
```

La méthode `compare` doit retourner un entier négatif si le premier objet est inférieur au second, nul si les deux sont égaux et positif dans les autres cas.

3.2.4 `Comparable` et `Comparator`

Les interfaces `Comparable` et `Comparator` ont un rôle similaire mais sont néanmoins différentes : l'interface `Comparable` est implémentée par les objets comparables eux-mêmes, alors que l'interface `Comparator` est implémenté par un objet étranger. Dès lors :

- la méthode `compareTo` de `Comparable` prend *un seul* argument, et compare le récepteur (`this`) avec cet argument,
- la méthode `compare` de `Comparator` prend *deux* arguments, et les compare entre eux.

Par exemple, en Java, la classe `Integer` implémente l'interface `Comparable`. Cela signifie que les entiers « savent » se comparer entre eux. Cette notion d'ordre, directement attachée aux entiers, est leur ordre naturel et correspond à l'ordre habituel en mathématiques.

Il est néanmoins possible de définir d'autres ordres sur les entiers, par exemple pour inverser l'ordre naturel. Pour ce faire, on définit un comparateur, qui est un objet séparé des entiers eux-mêmes, qui implémente l'interface `Comparator` et qui compare les entiers selon l'inverse de l'ordre naturel.

On peut illustrer l'utilité d'avoir à la fois l'interface `Comparable` et l'interface `Comparator` au moyen des variantes de la méthode de tri de liste de la classe `Collections` :

1. la première variante ne prend qu'un seul argument — la liste à trier — et la trie selon l'ordre naturel de ses éléments, qui doivent donc en posséder un :
   - `<T> void sort(List<T> l)`
2. la seconde variante prend deux arguments — la liste à trier et un comparateur — et la trie selon l'ordre du comparateur :
   - `<T> void sort(List<T> l, Comparator<T> c)`

Cette seconde variante est utilisable que les éléments aient un ordre naturel ou pas, car seul le comparateur est utilisé !

L'extrait de programme ci-dessous utilise ces deux variantes pour trier une liste d'entiers d'abord dans l'ordre naturel des entiers (donc sans fournir de comparateur), puis dans l'ordre inverse, en utilisant un comparateur inversant :

```
List<Integer> l = new ArrayList<>();
l.addAll(Arrays.asList(1,3,5,7,2,4,6,8));

Collections.sort(l);
System.out.println(l); // imprime [1,2,3,4,5,6,7,8]

class IntInvComparator implements Comparator<Integer> {
  @Override
  public int compare(Integer i, Integer j) {
    return Integer.compare(j, i);
  }
```