

## TD Listes (Correction)

Étant donné que ce sujet nécessite l'utilisation d'éléments et propriétés très différents des langages orientés objet, et en particulier du langage JAVA, cette correction est découpée en plusieurs parties :

1. la première propose une façon d'implémenter les listes chaînées, sans prendre en compte les itérateurs ;
2. la seconde propose une implémentation des itérateurs, sans prendre en compte le «fail-fast» ;
3. enfin, la dernière propose la correction complète du sujet.

### 1 Première partie de la correction

Cette première partie propose une façon d'implémenter les listes chaînées, sans prendre en compte les itérateurs.

#### 1.1 Qu'est ce qu'une liste chaînée ?

Une liste chaînée est une liste, dont les éléments sont organisés de manière similaire à une chaîne. Chaque élément de la liste (*i.e.* un maillon) est relié à un autre, de sorte que la liste forme une chaîne d'éléments.

Le sujet propose une définition récursive dont l'interprétation directe est fournie sur la figure 1. Dans ces exemples, le maillon de tête est le rectangle le plus englobant (par exemple le maillon contenant le chiffre 34 dans la figure 1(c)), et le maillon en queue est le rectangle contenant le texte «Liste Vide».

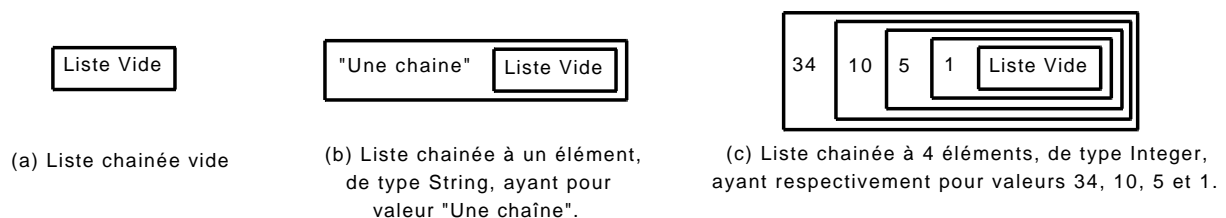


FIG. 1: Illustration de la définition récursive d'une liste chaînée. Chaque rectangle correspond à un objet différent, dont la classe est «ListeChaînée».

Une telle représentation est correcte, mais pose toutefois problème pour la définition de listes vides. Cette correction utilise donc plutôt une représentation explicite des maillons (la figure 2 en présente des exemples). Les

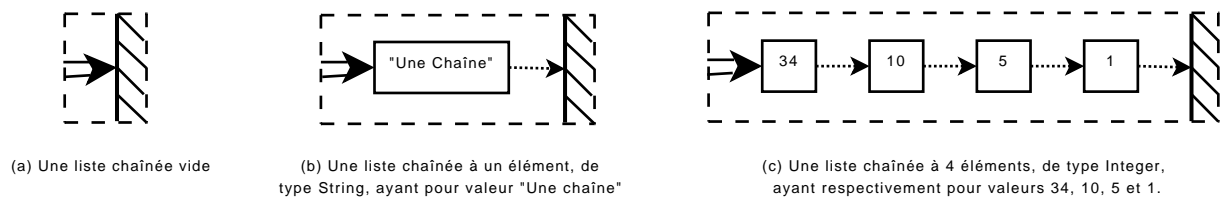


FIG. 2: Illustration de la définition d'une liste chaînée faisant apparaître le concept de maillon. Un rectangle en tirets correspond à un objet dont la classe est «ListeChaînée». Un rectangle en traits pleins correspond à un objet dont la classe est «Maillon».

rectangles pleins y représentent un maillon, le rectangle en tirets y représente la liste. La double flèche le début de liste, la partie droite du rectangle en tirets représente sa fin.

#### 1.2 Identification des différentes classes et attributs

L'observation de la figure 2 permet d'identifier les différentes classes et attributs nécessaires à la création de listes chaînées. En effet, une liste chaînée est caractérisée par :

- une tête, qui pointe vers le premier maillon. Pour la représenter, il faut donc ajouter aux instances de la classe «ListeChaînée» un attribut de type «Maillon» ;
- un ensemble de maillons, qu'il est possible de connaître en suivant la chaîne qui commence au maillon de tête. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter un attribut aux instances de la classe «ListeChaînée» pour la représenter ;

Un maillon est caractérisé par :

- la valeur qu’il contient. Pour la représenter, il faut donc ajouter un attribut aux instances de la classe «Maillon» ;
- le maillon qui le suit dans la chaîne. Pour le représenter, il faut donc ajouter aux instances de la classe «Maillon» un attribut de type «Maillon» ;

Le type de la valeur enregistrée dans les maillons peut *a priori* être n’importe quelle classe. Ainsi, à l’image de l’interface *List* de java, les classes «Maillon» et «ListeChainée» seront paramétrées par un **type générique**.

### 1.3 Classe interne

Un des principes des listes est de pouvoir accéder à leurs éléments sans avoir à savoir comment ces dernières sont implémentées. En effet, à l’aide des méthodes `head()` et `iterator()`, il est possible d’avoir accès à tous leurs éléments. Ainsi, il n’est pas nécessaire que les utilisateurs aient connaissance de l’existence de la classe «Maillon» (ils n’auront jamais à manipuler eux-mêmes cette classe). Elle sera donc cachée au sein de notre classe «ListeChainée»<sup>1</sup>. Pour cela, elle est déclarée comme une **classe interne** privée.

Le modificateur *privé* implique que la classe «Maillon» ne pourra être utilisée et manipulée que dans les méthodes déclarées dans la classe «ListeChainée» (la classe «Maillon» a une visibilité locale).

Le diagramme UML de notre solution correspond alors à celui de la figure 3.

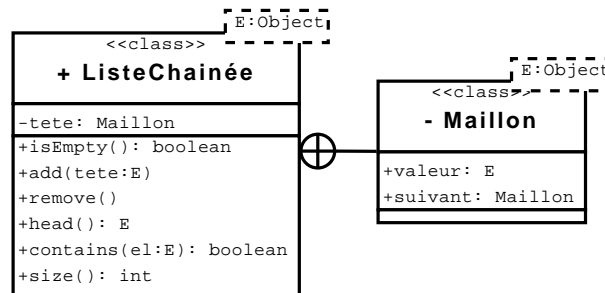


FIG. 3: Diagramme UML de la solution à la première partie du TD.

### 1.4 Implémentation

Voici le code des différentes classes définies plus haut :

```

1 package mylist;
2 /**
3  * Début de la classe qui permet la représentation
4  * de listes sous forme de listes chaînés
5  */
6 public class ListeChainée<E>{
7     /**
8      * Déclaration de la classe interne
9      * privée Maillon.
10     */
11     private class Maillon{
12         public E valeur;
13         public Maillon suivant;
14         public Maillon(E val, Maillon suiv){
15             this.valeur = val;
16             this.suivant = suiv;
17         }
18     }
19     // La tete de la liste.
20     private Maillon tete;
21
22     /**
23      * Constructeur créant une liste vide.
24      */
25     public ListeChainée(){
26         this.tete = null;
27     }
28
29     public boolean isEmpty(){
30         // La liste est vide si elle n'a pas d'éléments, et
31         // donc si ça tête vaut null.
32         return this.tete == null;
33     }
34     public void add(E e1){
35         // Création du nouveau maillon de la liste.
36         // Ce maillon sera la nouvelle tête de la liste.
37         // L'élément suivant ce maillon est donc l'ancienne
38         // tête de liste.
39         this.tete = new Maillon(e1, this.tete);
40     }
41
42     public void remove() throws IllegalStateException {
43         if(this.tete == null){
44             // Si la liste est vide, il est impossible d'y
45             // supprimer un élément.
46             throw new IllegalStateException();
47         } else {
48             this.tete = this.tete.suivant;
49         }
50     }
51
52     public E head(){
53         return this.tete;
54     }
55
56     public boolean contains(E e1){
57         Maillon courant = this.tete;
58         while(courant != null){
59             if(courant.valeur.equals(e1.valeur)){
60                 return true;
61             } else {
62                 courant = courant.suivant;
63             }
64         }
65         return false;
66     }
67
68     public int size(){
69         Maillon courant = this.tete;
70         int nombre = 0;
71         while(courant != null){
72             courant = courant.suivant;
73             nombre = nombre + 1;
74         }
75         return nombre;
76     }
77 }
  
```

<sup>1</sup>Ce principe est aussi utilisé dans la classe java *LinkedList*, pour laquelle la classe du maillon est une classe interne appelée *Entry*

## 2 Seconde partie de la correction

Cette seconde partie propose une implémentation des itérateurs sans prendre en compte le «fail-fast».

### 2.1 Qu'est ce qu'un itérateur ?

Un itérateur est un objet contenant une «flèche», qui pointe vers un élément de la liste. Au départ, cette «flèche» pointe sur la gauche du premier élément de la liste. Les itérateurs permettent de

- déplacer la «flèche» vers la droite (méthode `next()`);
- savoir si la «flèche» peut encore être déplacée sur la droite (méthode `hasNext()`).

Une illustration de leur principe de fonctionnement est fournie sur la figure 4.

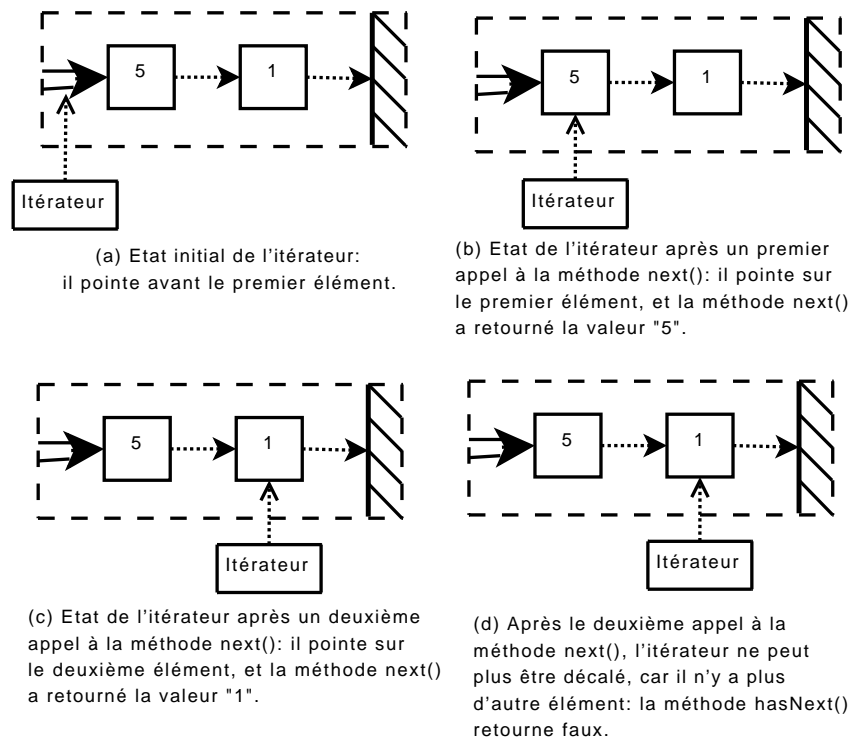


FIG. 4: Illustration du mode de fonctionnement d'un itérateur sur une liste chaînée.

Bien évidemment, la «flèche» est implémentée différemment selon les listes :

- une *ArrayList* mémorise des valeurs à l'aide d'un tableau. L'itérateur contiendra donc un nombre entier, correspondant à l'indice dans le tableau ;
- une liste chaînée mémorise les valeurs en les chaînant à l'aide de maillons. L'itérateur contiendra donc un pointeur vers un maillon.

Ainsi, chaque liste dispose de sa propre classe d'itérateur.

### 2.2 Analyse

L'interface `JAVA java.lang.Iterable` spécifie que la liste dispose d'une méthode itérateur. Ainsi, la classe «ListeChaînée» devra implémenter cette interface. Initialement, la flèche pointe à gauche du premier élément de la liste, ce que nous représenterons par une valeur `null`.

La suppression de l'élément pointé par la flèche (méthode `remove()` de l'itérateur) pose problème. En effet, comment garantir que le maillon qui précédait la flèche ne pointe plus sur la flèche, mais sur le maillon qui la suit ? Pour pallier à ce problème, une deuxième flèche sera utilisée, pointant sur l'élément précédant la flèche dans la liste.

De plus, la méthode `remove()` de l'itérateur ne peut être appelée qu'une seule fois entre deux appels de la méthode `next()`. En effet, d'après la spécification de l'interface *Iterator*, la méthode `remove()` supprime uniquement le dernier maillon pointé par la flèche. Il faudra donc lancer une exception lorsqu'il y a deux appels successifs à cette méthode.

## 2.3 Classe interne

L'utilisateur n'a, encore une fois, pas besoin de savoir quelle classe concrète implémente l'itérateur, étant donné qu'il n'utilisera que les deux méthodes `next()` et `hasNext()`, fournies par l'interface *Iterator*. L'itérateur dédié à notre classe «ListeChaînée» sera donc aussi une classe interne<sup>2</sup>.

## 2.4 Implémentation

Voici le code à ajouter au sein de la classe «ListeChaînée» prenant en compte les itérateurs :

```
1 package mylist;
2
3 import java.lang.Iterable;
4 import java.util.Iterator;
5 import java.util.NoSuchElementException;
6
7 /**
8  * Début de la classe qui permet la représentation
9  * de listes sous forme de listes chaînées.
10  * L'interface "Iterable" spécifie que la liste dispose
11  * d'une méthode iterator().
12  */
13 public class ListeChaînée<E> implements Iterable<E> {
14     (...)
15
16     // Methode de la classe "ListeChaînée" permettant de
17     // récupérer un itérateur.
18     public Iterator<E> iterator(){
19         return new ListeChaînéeIterator(this);
20     }
21
22     /**
23      * Classe d'itérateurs dédiée au type de liste
24      * "ListeChaînée".
25      */
26     private class ListeChaînéeIterator implements Iterator<E>{
27         // "Flèche" pointant vers un maillon de la liste.
28         private Maillon fleche;
29         // "Flèche" vers le maillon qui précède la fleche.
30         // Cet élément va être nécessaire dans la méthode
31         // remove().
32         private Maillon flechePrecedente;
33
34         public ListeChaînéeIterator(){
35             // La flèche vaut null lorsqu'elle pointe à gauche
36             // du premier élément de la liste.
37             this.fleche = null;
38             this.flechePrecedente = null;
39         }
40
41         public boolean hasNext(){
42             // "ListeChaînée.this" permet de connaître la liste
43             // chaînée qui a créé l'itérateur.
44             if(ListeChaînée.this.isEmpty()){
45                 // Si la liste est vide, il n'y a pas de prochain
46                 // élément.
47                 return false;
48             } else {
49                 if(this.fleche == null){
50                     // Cas où la flèche pointe à gauche du
51                     // premier élément, et que la liste n'est
52                     // pas vide: il y a un prochain élément
53                     // (le premier de la liste).
54                     return true;
55                 } else {
56                     // Cas où la flèche pointe sur un élément.
57                     // Il y a un prochain élément si l'élément
58                     // a un suivant.
59                     return this.fleche.suivant != null;
60                 }
61             }
62         }
63
64         public E next() throws NoSuchElementException {
65             // S'il n'y a pas d'élément suivant, l'utilisateur
66             // n'a pas le droit d'utiliser la méthode next().
67             // On lève donc une exception.
68             if(! this.hasNext()){
69                 throw new NoSuchElementException();
70             } else {
71                 if(this.fleche == null){
72                     // Cas où la flèche pointe sur la gauche
73                     // du premier élément. Elle pointe
74                     // maintenant sur le premier élément.
75                     this.fleche = ListeChaînée.this.head();
76                 } else {
77                     // Sinon, on bouge la flèche sur le
78                     // prochain élément.
79                     this.flechePrecedente = this.fleche;
80                     this.fleche = this.fleche.suivant;
81                 }
82                 // On retourne l'élément pointé par la flèche.
83                 return this.fleche.valeur;
84             }
85         }
86
87         // Cette méthode supprime l'élément pointé par
88         // la flèche.
89         public void remove() throws NoSuchElementException {
90             // Si la flèche ne pointe vers aucun élément, alors il
91             // est impossible de supprimer cet élément: il y a
92             // erreur.
93             if(this.fleche == null){
94                 throw new NoSuchElementException();
95             } else
96                 if(this.flechePrecedente.suivant == this.fleche.suivant){
97                     // Cas où un appel à remove() a déjà eu lieu, et où
98                     // il n'y a pas eu de nouvel appel à next(): il n'est
99                     // pas possible d'appeler la méthode remove().
100                     throw new NoSuchElementException();
101                 } else {
102                     // Si l'élément supprimé est le premier de la liste,
103                     // la tête de la liste change
104                     if(this.flechePrecedente == null){
105                         ListeChaînée.this.tete = this.fleche.suivant;
106                     } else {
107                         // L'élément précédent pointe vers le suivant
108                         // de l'élément courant
109                         this.flechePrecedente.suivant = this.fleche.suivant;
110                         // La flèche pointe vers l'élément précédent.
111                         this.fleche = this.flechePrecedente;
112                     }
113                 }
114             }
115         }
116     }
117 }
```

## 3 Troisième partie de la correction

Cette partie propose une implémentation des itérateurs prenant en compte la fonctionnalité de «fail-fast» des listes.

### 3.1 A quoi sert le fail-fast ?

La solution proposée ci-dessus fournit toutes les fonctionnalités permettant d'utiliser une liste chaînée. Toutefois, dans certains cas, des erreurs peuvent survenir.

En effet, supposons que l'itérateur pointe sur un maillon de la liste. Que se passe-t-il si ce maillon est retiré de la liste (appel à la méthode `remove()` de la classe «ListeChaînée») avant le déplacement de l'itérateur ? Dans un tel cas, l'itérateur ne permet plus de se déplacer correctement dans la liste. La figure 5 illustre ce problème.

Le rôle du fail-fast est de détecter ce genre de situations au niveau de l'itérateur et de retourner une exception s'il y a eu modification de la liste entre le moment où l'itérateur est créé, et le moment où sa méthode `next()` est appelée.

<sup>2</sup>Pour information, la classe *LinkedList* de JAVA dispose aussi d'une implémentation interne de l'interface *Iterator*, dont le nom est *ListItr*

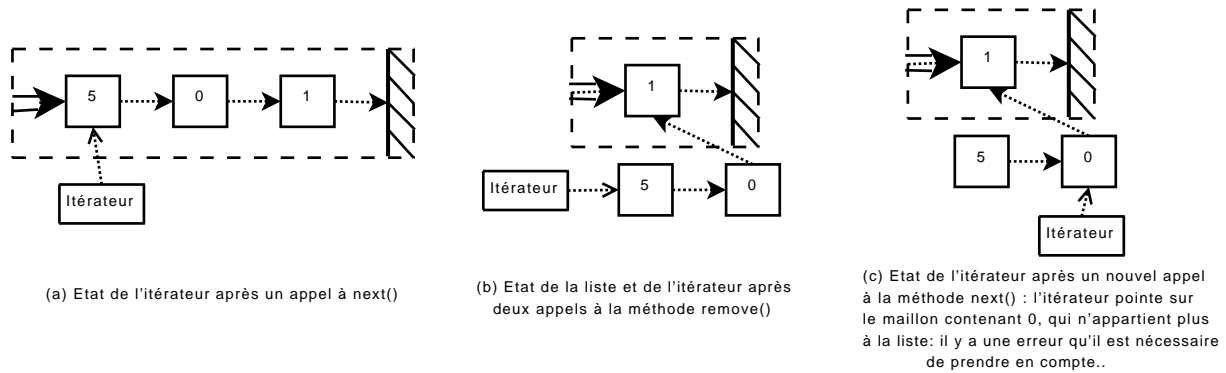


FIG. 5: Illustration du problème de modification concurrente d'une liste chaînée.

## 3.2 Implémentation

La méthode la plus simple permettant de savoir s'il y a eu modification de la liste est de vérifier le nombre d'ajouts et suppressions ayant eu lieu entre la création de l'itérateur et l'appel à la méthode `next()`. Pour cela, nous nous basons sur le nombre total de modifications (ajouts et suppressions d'éléments) ayant eu lieu dans la liste depuis sa création.

Ce nombre est mémorisé par chaque itérateur lors de sa création. Si jamais lors d'un appel à la méthode `next()`, le nombre de modifications de la liste est différent du nombre mémorisé par l'itérateur, alors cela signifie que la liste a été modifiée entre temps. L'itérateur n'est donc plus valide : il faudra retourner une exception si il y a utilisation des méthodes `next()` et `remove()`.

De même, un appel à la méthode `remove()` de l'itérateur modifie la liste, qui doit donc mettre à jour son nombre de modifications. L'itérateur ayant fait cette suppression peut adapter ses pointeurs (ses attributs `fleche` et `flechePrecedente`), et donc rester valide. Néanmoins, ce n'est pas le cas des autres itérateurs : ils ne doivent plus pouvoir être utilisés. Pour cela, lors de la suppression d'un élément avec la méthode `remove()` de l'itérateur, il est nécessaire d'incrémenter à la fois le compteur de modifications dans la liste, mais aussi dans celui de l'itérateur ayant effectué la suppression.

Le code complet de la classe «ListeChaînée» est donc (les parties dont le fond est gris sont des ajouts par rapport aux solutions présentées dans les partie 1 et 2) :

```

1 package mylist;
2
3 import java.lang.Iterable;
4 import java.util.Iterator;
5 import java.util.NoSuchElementException;
6 import java.util.ConcurrentModificationException;
7
8 /**
9  * Début de la classe qui permet la représentation de listes
10  * sous forme de listes chaînées
11  */
12 public class ListeChaînée<E> implements Iterable<E>{
13     /**
14      * Déclaration de la classe interne
15      * privée Maillon.
16      */
17     private class Maillon{
18         public E valeur;
19         public Maillon suiv;
20         public Maillon(E val, Maillon suiv){
21             this.valeur = val;
22             this.suiv = suiv;
23         }
24     }
25     // La tête de la liste.
26     private Maillon tete;
27
28     // Le nombre total de modifications ayant eu lieu
29     // depuis la création de la liste.
30     private int nombreModifications;
31
32     /**
33      * Constructeur créant une liste vide.
34      */
35     public ListeChaînée(){
36         this.tete = null;
37         nombreModifications = 0;
38     }
39
40     public boolean isEmpty(){
41         // La liste est vide si elle n'a pas d'éléments, et
42         // donc si ça tête vaut null.
43         return this.tete == null;

```

```

43     }
44
45     public void add(E el){
46         // Création du nouveau maillon de la liste.
47         // Ce maillon sera la nouvelle tête de la liste.
48         // L'élément suivant ce maillon est donc l'ancienne
49         // tête de liste.
50         this.tete = new Maillon(el, this.tete);
51         this.nombreModifications++;
52     }
53
54     public void remove() throws IllegalStateException {
55         if(this.tete == null){
56             // Si la liste est vide, il est impossible d'y
57             // supprimer un élément.
58             throw new IllegalStateException();
59         } else {
60             this.tete = this.tete.suivant;
61             this.nombreModifications++;
62         }
63     }
64
65     public E head(){
66         return this.tete;
67     }
68
69     public boolean contains(E el){
70         Maillon courant = this.tete;
71         while(courant != null){
72             if(courant.valeur.equals(el.valeur)){
73                 return true;
74             } else {
75                 courant = courant.suivant;
76             }
77         }
78         return false;
79     }
80
81     public int size(){
82         Maillon courant = this.tete;
83         int nombre = 0;
84         while(courant != null){
85             courant = courant.suivant;
86             nombre = nombre + 1;
87         }
88         return nombre;
89     }
90
91     // Methode de la classe "ListeChaînée" permettant de
92     // récupérer un itérateur.
93     public Iterator<E> iterator(){
94         return new ListeChaînéeIterator(this);
95     }
96
97     /**
98      * Classe d'itérateurs dédiée au type de liste "ListeChaînée".
99      */
100    private class ListeChaînéeIterator implements Iterator<E>{
101        // "Flèche" pointant vers un maillon de la liste.
102        private Maillon fleche;
103        // "Fleche" vers le maillon qui précède la fleche.
104        // Cet élément va être nécessaire dans la méthode remove().
105        private Maillon flechePrecedente;
106
107        // Le nombre total de modifications subies par la liste
108        // lors de la création de l'itérateur.
109        private int nombreModificationsListe;
110
111        public ListeChaînéeIterator(){
112            // La flèche vaut null lorsqu'elle pointe à gauche
113            // du premier élément de la liste.
114            this.fleche = null;
115            this.flechePrecedente = null;
116            this.nombreModificationsListe = ListeChaînée.this.nombreModifications;
117        }
118
119        public boolean hasNext() throws ConcurrentModificationException {
120            if(this.nombreModificationsListe != ListeChaînée.this.nombreModifications){
121                // Cas où la liste a été modifiée depuis la création de l'itérateur.
122                throw new ConcurrentModificationException();
123            }
124            // "ListeChaînée.this" permet de connaître la liste chaînée qui
125            // a créé l'itérateur.
126            if(ListeChaînée.this.isEmpty()){
127                // Si la liste est vide, il n'y a pas de prochain élément.
128                return false;
129            } else {
130                if(this.fleche == null){
131                    // Cas où la flèche pointe à gauche du premier

```

```

131         // élément, et que la liste n'est pas vide: il y a
132         // un prochain élément (le premier de la liste).
133         return true;
134     } else {
135         // Cas où la flèche pointe sur un élément.
136         // Il y a un prochain élément si l'élément a
137         // un suivant.
138         return this.fleche.suivant != null;
139     }
140 }
141
142
143 public E next() throws NoSuchElementException, ConcurrentModificationException {
144     if (this.nombreModificationsListe != ListeChaînée.this.nombreModifications){
145         // Cas où la liste a été modifiée depuis la création de l'itérateur.
146         throw new ConcurrentModificationException();
147     }
148     // S'il n'y a pas d'élément suivant, l'utilisateur
149     // n'a pas le droit d'utiliser la méthode next().
150     // On lève donc une exception.
151     if (! this.hasNext()){
152         throw new NoSuchElementException();
153     } else {
154         if (this.fleche == null){
155             // Cas où la flèche pointe sur la gauche du
156             // premier élément. Elle pointe maintenant
157             // sur le premier élément.
158             this.fleche = ListeChaînée.this.head();
159         } else {
160             // Sinon, on bouge la flèche sur le prochain
161             // élément.
162             this.flechePrecedente = this.fleche;
163             this.fleche = this.fleche.suivant;
164         }
165         // On retourne l'élément pointé par la flèche.
166         return this.fleche.valeur;
167     }
168 }
169
170 // Cette méthode supprime l'élément pointé par
171 // la flèche.
172 public void remove() throws NoSuchElementException {
173     if (this.nombreModificationsListe != ListeChaînée.this.nombreModifications){
174         // Cas où la liste a été modifiée depuis la création de l'itérateur.
175         throw new ConcurrentModificationException();
176     }
177     // Si la flèche ne pointe vers aucun élément, alors il est
178     // impossible de supprimer cet élément: il y a erreur.
179     if (this.fleche == null){
180         throw new NoSuchElementException();
181     } else if (this.flechePrecedente.suivant == this.fleche.suivant){
182         // Cas où un appel à remove() a déjà eu lieu, et où
183         // il n'y a pas eu de nouvel appel à next(): il n'est pas
184         // possible d'appeler la méthode remove().
185         throw new NoSuchElementException();
186     } else {
187         // Si l'élément supprimé est le premier de la liste,
188         // la tête de la liste change
189         if (this.flechePrecedente == null){
190             ListeChaînée.this.tete = this.fleche.suivant;
191         } else {
192             // L'élément précédent pointe vers le suivant de
193             // l'élément courant
194             this.flechePrecedente.suivant = this.fleche.suivant;
195             // La flèche pointe vers l'élément précédent.
196             this.fleche = this.flechePrecedente;
197         }
198         // Mise à jour du nombre de modifications subies par la
199         // liste. Puisque cette modification est prise en compte
200         // par cet itérateur, il faut aussi mettre à jour son attribut
201         // nombreModifications.
202         ListeChaînée.this.nombreModifications++;
203         this.nombreModifications++;
204     }
205 }
206 }
207 } // fin de la classe "ListeChaînée"

```