# Semaine 5 : Complément sur les listes



# Réduction de listes

Une autre opération commune sur les listes est de combiner les éléments d'une liste avec un opérateur donné.

Par exemple :

$$\begin{array}{ll} sum\,(List\,(x_1,\,...,\,x_n\,)\,) & = \; 0 + x_1 + ... + x_n \\ product\,(List\,(x_1,\,...,\,x_n\,)\,) & = \; 1 * x_1 * ... * x_n \end{array}$$

On peut implanter cela en utilisant le schéma récursif habituel :

```
def sum(xs: List[int]): int = xs match {
  case Nil ⇒ 0
  case y :: ys ⇒ y + sum(ys)
}

def product(xs: List[int]): int = xs match {
  case Nil ⇒ 1
  case y :: ys ⇒ y * product(ys)
}
```

La méthode générique *reduceLeft* insère une opérateur binaire donné entre deux éléments adjacents.

Par ex.

$$List(x_1, ..., x_n).reduceLeft(op) \quad = \quad (...(x_1\ op\ x_2)\ op\ ...\ )\ op\ x_n$$

Il est maintenant possible d'écrire plus simplement :

```
def sum(xs: List[int])     = (0 :: xs) reduceLeft {(x, y) ⇒ x + y}
def product(xs: List[int]) = (1 :: xs) reduceLeft {(x, y) ⇒ x * y}
```



# Implantation de ReduceLeft

Comment peut-on implanter *reduceLeft* ?

```
abstract class List[a] { ...
  def reduceLeft(op: (a, a) ⇒ a): a = this match {
    case Nil  ⇒  error("Nil.reduceLeft")
    case x :: xs  ⇒  (xs foldLeft x)(op)
  }

  def foldLeft[b](z: b)(op: (b, a) ⇒ b): b = this match {
    case Nil ⇒ z
    case x :: xs ⇒ (xs foldLeft op(z, x))(op)
  }
}
```

La fonction *reduceLeft* est définie en termes d'une autre fonction souvent utile, *foldLeft*.

*foldLeft* prend comme paramètre additionnel un *accumulateur* $z$, qui est retourné pour les listes vides.

Autrement dit,

$$(List(x_1, ..., x_n)\ foldLeft\ z)(op) \quad = \quad (...(z\ op\ x_1)\ op\ ...\ )\ op\ x_n$$

*sum* et *product* peuvent alors aussi être définies comme suit.

$$\begin{array}{lcl} \textbf{def}\ sum(xs\colon List[int]) & = & (xs\ foldLeft\ 0)\ \{(x, y) \Rightarrow x + y\} \\ \textbf{def}\ product(xs\colon List[int]) & = & (xs\ foldLeft\ 1)\ \{(x, y) \Rightarrow x * y\} \end{array}$$



# FoldRight et ReduceRight

Les applications de *foldLeft* et *reduceLeft* se déplient en arbres qui penchent vers la gauche :

Elles ont deux fonctions duales, foldRight et reduceRight, qui produisent des arbres qui penchent vers la droite. C.-à-d. :

$$\begin{array}{lcl} List(x_1, ..., x_n).reduceRight(op) & = & x_1\ op\ (\ ...\ (x_{n-1}\ op\ x_n)...\ ) \\ (List(x_1, ..., x_n)\ foldRight\ acc)(op) & = & x_1\ op\ (\ ...\ (x_n\ op\ acc)...\ ) \end{array}$$

Elles sont définies ainsi

```
    def reduceRight(op: (a, a) ⇒ a): a = match
      case Nil ⇒ error("Nil.reduceRight")
      case x :: Nil ⇒ x
      case x :: xs ⇒ op(x, xs.reduceRight(op))
    }
    def foldRight[b](z: b)(op: (a, b) ⇒ b): b = match {
      case Nil ⇒ z
      case x :: xs ⇒ op(x, (xs foldRight z)(op))
    }
```

Pour les opérateurs *op* associatifs et commutatifs, *foldLeft* et *foldRight* sont équivalents (même s'il peut y avoir une différence d'efficacité).

Mais parfois, seul l'un des deux opérateurs est approprié ou a le bon type.

**Exemple :** Voici une autre formulation de *concat* :

```
def concat[a](xs: List[a], ys: List[a]): List[a] =
  (xs foldRight ys) {(x, xs) ⇒ x :: xs}
```

Ici il n'est pas possible de remplacer *foldRight* par *foldLeft* (pourquoi ?).



# Retour sur le renversement de listes

Voici une fonction de renversement de liste avec un coût linéaire.

L'idée est d'utiliser l'opération *foldLeft* :

```
def reverse[a](xs: List[a]): List[a] = (xs foldLeft z?)(op?)
```

Il ne reste plus qu'à remplir les parties *z?* et *op?*.

Essayons de les déduire à partir d'exemples.

Tout d'abord,

```
    List()
=   reverse(List())          // par spécification de reverse
=   (List() foldLeft z)(op)  // par définition de reverse
=   z                        // par définition de foldLeft
```

Par conséquent, $z = List()$.

Ensuite,

$$
\begin{aligned}
& List(x) \\
= \; & reverse(List(x)) && \text{// par spécification de reverse} \\
= \; & (List(x)\ foldLeft\ List()\,)(op) && \text{// par déf. de reverse avec } z = List() \\
= \; & op(List(), x) && \text{// par définition de foldLeft}
\end{aligned}
$$

Par conséquent, $op(List(), x) = List(x) = x :: List()$. Cela suggère de prendre pour $op$ l'opérateur :: en échangeant ses opérandes.

On arrive donc à l'implantation suivante de *reverse*.

```
def reverse[a](xs: List[a]): List[a] =
  (xs foldLeft List[a]())((xs, x) ⇒ x :: xs)
```

Remarque : le paramètre de type dans $List[a]()$ est nécessaire pour l'inférence de types.

Q : Quelle est la complexité de cette implantation de *reverse* ?



# Complément sur Fold et Reduce

**Exercice :** Complétez les définitions suivantes, basées sur l'utilisation de *foldRight*, qui introduisent des opérations de base pour manipuler les listes.

```
def mapFun[a, b](xs: List[a], f: a ⇒ b): List[b] =
  (xs foldRight List[b]())( ?? )

def lengthFun[a](xs: List[a]): int =
  (xs foldRight 0)( ?? )
```

# Traitements imbriqués sur les listes

On peut étendre l'utilisation des fonctions d'ordre supérieur sur les listes à de nombreux calculs qui sont habituellement exprimés à l'aide de boucles imbriquées.

**Exemple :** Étant donné un entier positif $n$, trouver tous les couples d'entiers positifs $i$ et $j$, avec $1 \leq j < i < n$ tels que $i + j$ soit premier.

Par exemple, si $n = 7$, les couples recherchés sont

| $i$ | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $j$ | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 5 |
| $i+j$ | 3 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 11 |



Une manière naturelle de faire cela consiste à :

- Générer la suite de tous les couples d'entiers $(i, j)$ tels que $1 \leq j < i < n$.
- Filtrer les couples pour lesquels $i + j$ est premier.

Une manière naturelle de générer la suite des couples est de :

- Générer tous les entiers $i$ compris entre $1$ et $n$ (exclu). Cela peut être réalisé par la fonction

  ```
  def range(from: int, end: int): List[int] =
    if (from ≥ end) scala.Predef.List()
    else from :: range(from + 1, end);
  ```

  qui est prédéfinie dans le module *List*.
- Pour chaque entier $i$, générer la liste des couples $(i, 1)$, ..., $(i, i-1)$. On peut y arriver en combinant *range* et *map* :

  ```
  List.range(1, i) map (x ⇒ Pair(i, x))
  ```
- Finalement, combiner toutes les sous-listes en utilisant *foldRight* avec :::.

En rassemblant les morceaux on obtient l'expression suivante :

```
List.range(1, n)
  .map(i ⇒ List.range(1, i).map(x ⇒ Pair(i, x)))
  .foldRight(List[Pair[int, int]]()) {(xs, ys) ⇒ xs ::: ys}
  .filter(pair ⇒ isPrime(pair._1 + pair._2))
```



# La fonction *flatMap*

La combinaison consistant à appliquer une fonction aux éléments d'une liste puis à concaténer les résultats est si commune que l'on a introduit une méthode spéciale pour cela dans *List.scala* :

```
abstract class List[a] { ...
  def flatMap[b](f: a ⇒ List[b]): List[b] = match {
    case Nil ⇒ Nil
    case x :: xs ⇒ f(x) ::: (xs flatMap f)
  }
}
```

Avec *flatMap*, on aurait pu écrire une expression plus concise :

```
List.range(1, n)
  .flatMap(i ⇒ List.range(1, i).map(x ⇒ Pair(i, x)))
  .filter(pair ⇒ isPrime(pair._1 + pair._2))
```

Q : Trouvez une manière concise de définir *isPrime* ? (Indice : utilisez *forall* définie dans *List*).

# La fonction *zip*

La méthode *zip* dans la classe *List* combine deux listes en une liste de couples.

```
abstract class List[a] { ...
  def zip[b](that: List[b]): List[Pair[a,b]] =
    if (this.isEmpty || that.isEmpty) Nil
    else Pair(this.head, that.head) :: (this.tail zip that.tail);
```

**Exemple :** En utilisant *zip* et *foldLeft*, on peut définir le produit scalaire de deux listes de la manière suivante.

```
def scalarProduct(xs: List[Double], ys: List[Double]): Double =
  (xs zip ys)
  .map(xy ⇒ xy._1 * xy._2)
  .foldLeft(0.0){(x, y) ⇒ x + y}
```



# Résumé

- Nous avons vu que les listes étaient une structure de données fondamentale en programmation fonctionnelle.
- Les listes sont définies par des classes paramétrées et sont manipulées par des méthodes polymorphes.
- Les listes sont aux langages fonctionnels ce que sont les tableaux aux langages impératifs.
- Mais contrairement aux tableaux, on n'accède généralement pas aux éléments d'une liste par leur indice.
- On préfère traverser les listes récursivement ou via des combinateurs d'ordre supérieur tels que *map*, *filter*, *foldLeft* ou *foldRight*.

# Raisonnement sur les listes

Rappelons nous l'opération de concaténation pour les listes :

```
class List[a] {
  ...
  def ::: (that: List[a]): List[a] =
    if (isEmpty) that
    else head :: (tail ::: that)
}
```

On aimerait vérifier que la concaténation est associative, et qu'elle admet la liste vide $List()$ comme élément neutre à gauche et à droite :

$$\begin{array}{lcll} (xs ::: ys) ::: zs & = & xs ::: (ys ::: zs) & \\ xs ::: List() & = & xs & = List() ::: xs \end{array}$$

Q : Comment peut-on prouver des propriétés comme celles-ci ?

R : Par induction structurelle sur les listes.



# Rappel : Induction naturelle (ou récurrence)

Rappelons le principe des preuves par induction naturelle :

Pour montrer une propriété $P(n)$ pour tous les entiers $n \geq b$,

1. montrer qu'on a $P(b)$ (cas de base),
2. pour tout entier $n \geq b$ montrer que :

   si l'on a $P(n)$, alors on a aussi $P(n+1)$

   (étape d'induction).

Exemple : Étant donné

```
def factorial(n: int): int =
  if (n == 0) 1
  else n * factorial(n-1)
```

montrer que, pour tout $n \geq 4$,

$$factorial(n) \geq 2^n$$

**Case** $4$ est établi par simples calculs de $factorial\,(4) = 24$ et $2^4 = 16$.

**Case** $n{+}1$ On a pour $n \geq 4$ :

$$
\begin{array}{ll}
 & factorial\,(n+1) \\
= & \text{(par la deuxième clause de factorial (*))} \\
 & (n+1) * factorial\,(n) \\
\geq & \text{(par calcul)} \\
 & 2 * factorial\,(n) \\
\geq & \text{(par hypothèse d'induction)} \\
 & 2 * 2^n.
\end{array}
$$

Remarquez que dans une preuve on peut librement appliquer des étapes de réduction comme (*) à l'intérieur d'un terme.

Ça fonctionne parce que les programmes fonctionnels purs n'ont pas d'effets de bord ; si bien qu'un terme est équivalent au terme en lequel il se réduit.

Ce principe est appelé *transparence référentielle*.



# Induction structurelle

Le principe d'induction structurelle est analogue à l'induction naturelle :

Dans le cas des listes, il a la forme suivante :

Pour prouver une propriété $P(xs)$ pour toutes les listes $xs$,

1. montrer que $P\,(List\,(\,)\,)$ est vrai (cas de base),
2. pour une liste $xs$ et un élément $x$ quelconques, montrer que :

   si $P(xs)$ est vrai, alors $P(x :: xs)$ l'est aussi

   (étape d'induction).

# Exemple

Nous allons montrer que $(xs ::: ys) ::: zs = xs ::: (ys ::: zs)$ par induction structurelle sur $xs$.

**Case** $List\,()$ Pour le côté gauche on a :

$$\begin{array}{ll} & (List\,() ::: ys) ::: zs \\ = & \textit{(par la première clause de :::)} \\ & ys ::: zs \end{array}$$

Pour le côté droit on a :

$$\begin{array}{ll} & List\,() ::: (ys ::: zs) \\ = & \textit{(par la première clause de :::)} \\ & ys ::: zs \end{array}$$

Ce cas est donc établi.



**Case** $x :: xs$

Pour le côté gauche on a :

$$\begin{array}{ll} & ((x :: xs) ::: ys) ::: zs \\ = & \textit{(par la seconde clause de :::)} \\ & (x :: (xs ::: ys)) ::: zs \\ = & \textit{(par la seconde clause de :::)} \\ & x :: ((xs ::: ys) ::: zs) \\ = & \textit{(par hypothèse d'induction)} \\ & x :: (xs ::: (ys ::: zs)) \end{array}$$

Pour le côté droit on a :

$$\begin{array}{ll} & (x :: xs) ::: (ys ::: zs) \\ = & \textit{(par la seconde clause de :::)} \\ & x :: (xs ::: (ys ::: zs)) \end{array}$$

Si bien que ce cas-ci (et avec lui la propriété) est établi.

**Exercice :** Montrez par induction sur $xs$ que $xs ::: List\,() = xs$.

# Exemple (2)

A titre d'exemple plus difficile, considérons la fonction

```
abstract class List[a] { ...
  def reverse: List[a] = match {
    case List() ⇒ List()
    case x :: xs ⇒ xs.reverse ::: List(x)
  }
}
```

On aimerait prouver la proposition suivante

$$xs.reverse.reverse \;=\; xs \;\;.$$

On procède par induction sur *xs*. Le cas de base est facile à établir :

$$\begin{array}{ll} & List().reverse.reverse \\ = & \text{(par la première clause de } reverse\text{)} \\ & List().reverse \\ = & \text{(par la première clause de } reverse\text{)} \\ & List() \end{array}$$



Pour l'étape d'induction on essaie :

$$\begin{array}{ll} & (x :: xs).reverse.reverse \\ = & \text{(par la seconde clause de } reverse\text{)} \\ & (xs.reverse ::: List(x)).reverse \end{array}$$

On ne peut rien faire de plus avec cette expression, on se tourne donc vers le membre droit :

$$\begin{array}{ll} & x :: xs \\ = & \text{(par hypothèse d'induction)} \\ & x :: xs.reverse.reverse \end{array}$$

Les deux côtés se sont simplifiés en des expressions différentes.

On doit donc encore montrer que

$$(xs.reverse ::: List(x)).reverse \;=\; x :: xs.reverse.reverse$$

Essayer de le prouver directement par induction ne marche pas.

On doit plutôt essayer de *généraliser* l'équation :

$$(ys ::: List(x)).reverse \;=\; x :: ys.reverse$$

Cette équation peut être prouvée par un second argument d'induction sur $ys$. (Voir tableau).

**Exercice :** Est-il vrai que $(xs\ drop\ m)\ at\ n = xs\ at\ (m + n)$ pour tous entiers $m$, $n$ et toute liste $xs$ ?



# Induction structurelle sur les arbres

L'induction structurelle ne se limite pas aux listes ; elle s'applique à n'importe quelle structure d'arbre.

Le principe général d'induction est le suivant :

Pour montrer la propriété $P(t)$ pour tous les arbres d'un certain type,

- montrer $P(l)$ pour toutes les feuilles $l$ de l'arbre,
- pour chaque noeud interne $t$ avec sous-arbres $s_1$, ..., $s_n$, montrer que $P(s_1) \wedge ... \wedge P(s_n) \Rightarrow P(t)$.

**Exemple :** Rappelons notre définition de *IntSet* avec les opérations *contains* et *incl* :

```
abstract class IntSet {
  abstract def incl(x: int): IntSet
  abstract def contains(x: int): boolean
}
```

```
case class Empty extends IntSet {
  def contains(x: int): boolean = false
  def incl(x: int): IntSet = NonEmpty(x, Empty, Empty)
}
case class NonEmpty(elem: int, left: Set, right: Set) extends IntSet {
  def contains(x: int): boolean =
    if (x < elem) left contains x
    else if (x > elem) right contains x
    else true
  def incl(x: int): IntSet =
    if (x < elem) NonEmpty(elem, left incl x, right)
    else if (x > elem) NonEmpty(elem, left, right incl x)
    else this
}
```

(Avec ajouts de ***case*** pour pouvoir utiliser les fonctions de construction au lieu de ***new***).

Que signifie prouver la correction de cette implantation ?



# Les lois de IntSet

Une moyen pour définir et montrer la correction d'une implantation consiste à prouver des lois qu'elle respecte.

Dans le cas de *IntSet*, nous avons les trois lois suivantes :

Pour tout ensemble $s$, et éléments $x$ et $y$ :

$$\begin{array}{lll} \mathit{Empty}\ \mathit{contains}\ x & = & \textbf{\textit{false}} \\ (s\ \mathit{incl}\ x)\ \mathit{contains}\ x & = & \textbf{\textit{true}} \\ (s\ \mathit{incl}\ x)\ \mathit{contains}\ y & = & s\ \mathit{contains}\ y \qquad \mathit{si}\ x \neq y \end{array}$$

(En fait, on peut montrer que ces lois caractérisent complètement le type de donnée désiré).

Comment peut-on prouver ces lois ?

Proposition 1: *Empty contains* $x =$ ***false***.

Preuve : D'après la définition de *contains* dans *Empty*.

Proposition 2: $(xs\ incl\ x)\ contains\ x = \textbf{\textit{true}}$

Preuve :

**Case** *Empty*

$$
\begin{array}{ll}
 & (Empty\ incl\ x)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après définition de } incl \text{ dans } Empty\text{)} \\
 & NonEmpty\,(x,\ Empty,\ Empty)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après la définition de } contains \text{ dans } NonEmpty\text{)} \\
 & \textbf{\textit{true}}
\end{array}
$$

**Case** $NonEmpty\,(x,\ l,\ r)$

$$
\begin{array}{ll}
 & (NonEmpty\,(x,\ l,\ r)\ incl\ x)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après la définition de } incl \text{ dans } NonEmpty\text{)} \\
 & NonEmpty\,(x,\ l,\ r)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après la définition de } contains \text{ dans } NonEmpty\text{)} \\
 & \textbf{\textit{true}}
\end{array}
$$



**Case** $NonEmpty\,(y,\ l,\ r)$ avec $y < x$

$$
\begin{array}{ll}
 & (NonEmpty\,(y,\ l,\ r)\ incl\ x)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après la définition de } incl \text{ dans } NonEmpty\text{)} \\
 & NonEmpty\,(y,\ l,\ r\ incl\ x)\ contains\ x \\
= & \text{(d'après la définition de } contains \text{ dans } NonEmpty\text{)} \\
 & (r\ incl\ x)\ contains\ x \\
= & \text{(par hypothèse d'induction)} \\
 & \textbf{\textit{true}}
\end{array}
$$

**Case** $NonEmpty\,(y,\ l,\ r)$ avec $y > x$ est analogue.

Proposition 3 : Si $x \neq y$ alors $xs\ incl\ y\ contains\ x\ =\ xs\ contains\ x$.

Preuve : Voir tableau.

# Exercice

Supposons qu'on ajoute une fonction *union* à *IntSet* :

```
class IntSet { ...
    def union(other: IntSet): IntSet
}
class Expty extends IntSet { ...
    def union(other: IntSet) = other
}
class NonEmpty(x: int, l: IntSet, r: IntSet) extends IntSet { ...
    def union(other: IntSet): IntSet = l union r union other incl x
}
```

La correction de *union* peut alors se traduire par la loi suivante :

Proposition 4: *(xs union ys) contains x = xs contains x || ys contains x.*

Est-ce vrai ? Quelle hypothèse manque ? Trouvez un contre-exemple.

Montrez la proposition 4 en utilisant une induction structurelle sur *xs*.