

X2012 — INF421

Examen du 6 novembre 2013

L'énoncé est composé de 3 parties indépendantes, que vous pourrez traiter dans n'importe quel ordre (en revanche, merci de clairement numéroter les réponses). Vous pourrez, quand vous traiterez une question, considérer comme déjà traitées les questions précédentes de la même partie.

Le correcteur prêtera attention à la qualité de la rédaction et vous remercie d'avance d'écrire lisiblement. Merci également de numéroter vos copies en indiquant leur nombre total.

1 Filtres de Bloom

Il est parfois utile de pouvoir tester l'appartenance à un sous-ensemble \mathcal{E} d'un type de données \mathcal{X} de façon approchée : une réponse négative veut dire que l'élément testé n'appartient pas à l'ensemble, mais une réponse positive veut dire que l'élément testé peut ou non lui appartenir. Nous désirons de plus que la probabilité (dans un sens que nous expliciterons plus loin) d'obtenir une réponse positive alors que l'élément n'appartient pas à l'ensemble soit faible. Enfin, nous souhaitons une réponse très rapide et une structure de données compacte en mémoire.

Une telle structure peut, par exemple, servir en préalable à l'interrogation par clef d'une base de données plus lente : on peut répondre très rapidement par la négative à la plupart des demandes d'éléments n'appartenant pas à l'ensemble, et on n'interroge la base de données que pour les clefs effectivement existantes et une faible proportion des clefs absentes.

Les *filtres de Bloom* sont une telle structure de données. Il s'agit d'une variante des tables de hachage. Par souci de simplicité, nous nous intéresserons au cas où le filtre de Bloom représente un ensemble de chaînes de caractères ($\mathcal{X} = \text{String}$).

Un filtre de Bloom se compose d'un tableau de m bits (indexés de 0 à $m - 1$) et d'une famille de n fonctions de hachage $h_k : \mathcal{X} \rightarrow \{0, \dots, m - 1\}$, pour $0 \leq k < n$. Pour le moment, nous ne prendrons pas d'hypothèses supplémentaires sur les fonctions de hachage par rapport à ce qui a été dit dans le cours et dans le poly.

On ajoute un élément x dans un filtre de Bloom en mettant à 1 les bits du tableau d'indices $h_k(x)$ pour $0 \leq k < n$. On teste sa présence en vérifiant si tous les bits $h_k(x)$ ($0 \leq k < n$) sont mis à 1, auquel cas on répond « peut-être », et sinon on répond « non ».

1.1 Hachage

Les n fonctions de hachage h_k sont implantées par une unique fonction Java `public static int hash(int k, int m, String x)`. On se propose d'utiliser la fonction de hachage suivante, semblable à celle donnée dans le poly (on pourra supposer qu'on l'appelle sur $m > 0$) :

```
1 public static int hash(int k, int m, String x) {
2     if (k < 0 || k >= PRIMES.length)
3         throw new ArrayIndexOutOfBoundsException();
4     long h=0, p = PRIMES[k];
5     for(int i=0; i<x.length(); i++) {
6         h = h*p + x.charAt(i);
7     }
8     h *= p;
9     h = h%m;
10    return h;
11 }
```

La différence avec celle vue dans le poly est qu'au lieu d'utiliser un multiplieur premier fixé, celui-ci dépend de k .¹

Nous rappelons que l'opération $a\%b$ est, pour $b > 0$ et $a \geq 0$, le reste de la division euclidienne de a par b , et pour $b > 0$ et $a < 0$, l'opposé du reste de la division euclidienne de $-a$ par b . Ainsi, $(-7)\% 4$ s'évalue en -3 .

Question 1.1. *Cette fonction ne compile pas : le compilateur proteste à la ligne 10. Pourquoi ?*

Question 1.2. *Cette fonction est censée renvoyer un nombre dans $0, \dots, m-1$. Est-ce bien le cas ? Sinon, proposez un correctif.*

1.2 Tableau de bits

Il nous serait bien entendu possible de représenter un tableau de m bits par un objet de type `boolean[]`, mais, avec la plupart des machines virtuelles Java, un `boolean` (1 bit) occupe la même place qu'un `byte` (8 bits). Nous proposons donc d'utiliser un tableau de `long`, chaque élément étant utilisé comme un vecteur de 64 bits.

```
1 class Bitvector {
2     final int size;
3     final long[] tab;
4     final static int WORD_SIZE = 64;
5
6     public int size() {
7         return size;
8     }
9 }
```

1. Pour nos essais pour préparer l'énoncé, nous avons mis dans le tableau PRIMES les 5 premiers nombres premiers suivant 2^{40} , mais cela n'a aucune importance pour la résolution du problème.

```

8     }
9
10    public Bitvector(int n) {
11        if (n < 0) throw new ArrayIndexOutOfBoundsException
12            ();
13        size = n;
14        tab = new long[(n+(WORD_SIZE-1))/WORD_SIZE];
15    }
16
17    public boolean test(int k) {
18        if (k < 0 || k >= size)
19            throw new ArrayIndexOutOfBoundsException();
20        return ((tab[k/WORD_SIZE] >>> (k%WORD_SIZE)) & 1)
21            != 0;
22    }
23
24    public void set(int k) {
25        if (k < 0 || k >= size)
26            throw new ArrayIndexOutOfBoundsException("set_" +
27                k + "_in_" + size);
28        tab[k/WORD_SIZE] = tab[k/WORD_SIZE] | (1 << (k%
29            WORD_SIZE));
30    }

```

Rappelons que $a \ll b$ où a de type **int** (resp. **long**) renvoie un **int** (resp. **long**) égal à a décalé de b bits vers la gauche. Par exemple, $3 \ll 4$ vaut 48 : l'entier 3 s'écrit

0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0011

(32 chiffres binaires) et le décalage de 4 bits vers la gauche donne

0000 0000 0000 0000 0000 0000 0011 0000

c'est-à-dire 48 écrit en binaire. Si l'on avait eu affaire à un **long**, on aurait travaillé sur 64 chiffres binaires. Lorsqu'il n'y a pas de dépassement de capacité (c'est-à-dire : des bits à 1 qui finissent par disparaître à gauche de l'entier, faute d'emplacements disponibles : 32 chiffres pour un **int**, 64 pour un **long**), cela correspond à une multiplication par 2^b . De même, $a \gg b$ renvoie a décalé de b bits vers la droite.

Question 1.3. *La ligne 25 contient un bug. Sauriez-vous dire lequel ? Et comment le corriger ?*

1.3 Le filtre !

```

1 class BloomFilter {
2     /* hash() est définie ici */
3

```

```

4     final Bitvector v;
5     final int n;
6
7     public BloomFilter(int m, int n) {
8         v = new Bitvector(m);
9         this.n = n;
10    }
11
12    public void add(String val) {
13        final int m = v.size();
14        for(int k=0; k<=n; k++) {
15            v.set(hash(k, m, val));
16        }
17    }
18
19    public boolean test(String val) {
20        final int m = v.size();
21        for(int k=0; k<n; k++) {
22            if (v.test(hash(k, m, val))) return false;
23        }
24        return true;
25    }
26 }

```

La fonction `add` est censée ajouter un élément x dans le filtre, en marquant les bits d'indices $h_k(x)$ pour $0 \leq k < n$. La fonction `test` est censée tester la présence d'un élément x , en renvoyant **true** (« peut-être ») si tous les $h_k(x)$ sont vrais, et **false** sinon.

Question 1.4. *La fonction `add` contient un bug. Lequel et comment le corriger ?*

Question 1.5. *La fonction `test` contient un bug. Lequel et comment le corriger ?*

Question 1.6. *Justifiez que si la procédure `test` corrigée répond **true** alors `val` peut être ou ne pas être dans l'ensemble représenté par le filtre. (Ici, on ne supposera rien sur les fonctions de hachage et vous pouvez notamment prendre des m, n quelconques et $h_k(x)$ fonctions quelconques vous permettant de construire un contre-exemple.)*

Question 1.7. *Supposons que calculer `hash(k, m, v)` prend un temps proportionnel à la longueur $|v|$ de la chaîne v . Quelle est la complexité du `test` ?*

1.4 Analyse probabiliste

Nous allons maintenant faire une hypothèse très forte : les fonctions $(h_k)_{1 \leq k \leq n}$ sont aléatoires, chaque $h_k(x)$ (pour $x \in \mathcal{X}$ et $0 \leq k < n$) étant une variable aléatoire indépendante uniformément distribuée dans $0 \dots m-1$.

Autrement dit, nous allons raisonner probabilistiquement comme si chaque $h_k(x)$ était tirée d'un immense tableau indexé par x , dont chaque case serait, au début de l'exécution du programme, choisie uniformément distribuée dans $\{0, \dots, m-1\}$ indépendamment des autres. Notons que, dans une exécution donnée, $h_k(x)$ a une valeur précise (deux appels à h avec les mêmes paramètres k et x renvoient la même valeur) : l'aspect probabiliste intervient parce que l'on considère la distribution de probabilité induite sur les exécutions du programme et donc ses résultats finaux.

Question 1.8. *Quelle est la probabilité $p(m, n, f)$ qu'un filtre de Bloom, avec un tableau de m bits, n fonctions de hachage et f éléments dans \mathcal{E} (l'ensemble approximativement représenté), renvoie « peut-être » quand il est interrogé sur un élément x qui n'est pas dans l'ensemble ? Justifiez.*

Question 1.9. *Montrez que $p(m, n, f) \simeq (1 - \exp(-fn/m))^n$ quand m est grand devant fn .*

2 Recherche de plus courts chemins sur une carte

Nous nous intéressons ici au problème suivant : étant donné une carte routière, représentée par un graphe orienté dont les arêtes portent des poids positifs ou nuls (par exemple, distance par route, ou temps de trajet), et deux sommets a et b , calculer le trajet le plus court entre ces deux points (c'est-à-dire le chemin partant de a et finissant sur b de plus faible poids total). Les arêtes et poids ne sont pas forcément symétriques (il peut y avoir des sens uniques, des routes que l'on ne parcourt pas à la même vitesse dans les deux sens, etc.).

Dans la suite du problème, sauf précision, nous entendrons par « distance » $d(a, b)$ entre deux points a et b le poids d'un chemin de poids minimal entre a et b (ou $+\infty$ s'il n'existe pas de tel chemin), quelque soit le sens donné aux poids. Nous noterons $\delta(v, w)$ le poids d'une arête de v à w ($+\infty$ si pas d'arête).

2.1 Dijkstra

La première idée pour le résoudre est l'algorithme de Dijkstra, qui parcourt les nœuds du graphe par distance depuis a croissante, jusqu'à arriver sur b ou avoir parcouru tous les nœuds accessibles depuis a (dans ce dernier cas, cela veut dire qu'il n'y a pas de chemin de a à b).

Nous supposerons les types suivants :

```

1 class Edge {
2     double value;
3     int target;
4
5     Edge(int target, double value) {
```

```

6         this.target = target;
7         this.value = value;
8     }
9 }
10
11 class Point {
12     double x, y;
13
14     Point(double x, double y) {
15         this.x = x;
16         this.y = y;
17     }
18
19     static double sqr(double x) {
20         return x*x;
21     }
22
23     double distance(Point b) {
24         return Math.sqrt(sqr(b.x-this.x)+sqr(b.y-this.y));
25     }
26 }
27
28 class Node {
29     String name;
30     Point position;
31     List<Edge> outgoing;
32
33     Node(String name, Point position) {
34         this.name = name;
35         this.position = position;
36         outgoing = new Vector<Edge>();
37     }
38 }
39
40 class Item implements Comparable<Item> {
41     double distance;
42     int node;
43
44     Item(int node, double distance) {
45         this.distance = distance;
46         this.node = node;
47     }
48
49     public int compareTo(Item y) {
50         double d1 = distance, d2 = y.distance;
51         if (d1 < d2) return -1;
52         else if (d1 > d2) return 1;
53         else return 0;
54     }

```

```

55 }
56
57 class ValuedGraph {
58     Node[] nodes;
59
60     ValuedGraph(int nbNodes) {
61         this.nodes = new Node[nbNodes];
62     }
63 }

```

Les nœuds seront identifiés à leur indice dans le tableau `nodes`. Notez que la structure du graphe n'est pas donnée par une table d'adjacence : chaque sommet, de type `Node`, contient la liste de ses arêtes sortantes dans le champ `outgoing`.

La bibliothèque standard Java dispose d'une classe `PriorityQueue<T>`, représentant une file de priorité, munie notamment d'un constructeur sans paramètre et des méthodes suivantes :

- **void** `add(T)` : ajoute un élément dans la liste ;
- `T poll()` : renvoie **null** si la file ne contient aucun élément, ou sinon renvoie l'élément minimal *et le supprime de la file*.

Le type `T` doit être muni d'une opération de comparaison ; nous avons proposé ci-dessus le type `Item`, qui contient un indice de nœud `node` et un champ `distance`, tel que les nœuds sont ordonnés par `distance` croissante.

Question 2.1. *Programmez dans la classe `ValuedGraph` une méthode **double** `shortestPath(int a, int b)` qui calcule le poids total d'un chemin de plus court poids du nœud `a` au nœud `b`, en utilisant `PriorityQueue<Item>`.*

Question 2.2. *Modifiez cette fonction pour renvoyer le chemin, sous la forme d'un tableau d'entiers contenant les indices des nœuds du chemin de `a` à `b` inclus. Il pourra être utile de modifier le type `Item` pour lui rajouter des champs.*

Vous pouvez indiquer vos modifications sans réécrire toute la fonction.

2.2 A*

Un défaut de l'algorithme de Dijkstra est qu'il ne tire pas partie des informations géographiques globales. Par exemple, si l'on recherche un plus court chemin de Paris à Marseille, il va parcourir toutes les villes par distances croissantes depuis Paris, y compris Lille (qui est au nord de Paris) alors que l'on cherche un chemin vers une ville très au sud. Un humain rechercherait plutôt en priorité des chemins en direction de la ville de destination (donc, grossièrement vers le sud) et aurait plutôt tendance à spontanément chercher un trajet passant par Lyon (Fig. 1).

L'algorithme A* est une modification de l'algorithme de Dijkstra où l'on parcourt les nœuds v du graphe par valeurs croissantes de $f(v)$ définie comme



FIGURE 1 – L’algorithme de Dijkstra, partant de Paris, va d’abord parcourir Lille (distance routière depuis Paris : 220 km) avant de parcourir Lyon (465 km). En revanche, A* va d’abord parcourir Lyon (distance routière à Paris + distance à vol d’oiseau à Marseille : 741 km) et ne parcourra pas Lille (distance routière Paris–Marseille : 775 km, inférieure à Lille – Marseille à vol d’oiseau : 837 km).

la somme de la distance $d(a, b)$ de a à v (poids d'un chemin de plus faible poids de a à v) et d'un minorant $e(v, b)$ positif ou nul de la distance entre v et b . Nous exigerons de plus que e vérifie $e(v, b) \leq \delta(v, w) + e(w, b)$.

Par exemple, si les poids sont des distances routières entre villes, on peut prendre comme minorant $e(v, b)$ de la distance sur le graphe entre v et b la distance «à vol d'oiseau» (euclidienne) entre v et b . Si les poids sont des temps de trajet, on peut prendre comme minorant $e(v, b)$ de la distance sur le graphe entre v et b le quotient de la distance «à vol d'oiseau» entre v et b par la vitesse maximale autorisée (puisque un temps de trajet est minoré par le quotient de la distance routière par la vitesse maximale autorisée, et la distance routière est minorée par la distance à vol d'oiseau).

On suppose donnée une méthode `distanceEstimate(int v, int b)` donnant ce minorant.

Question 2.3. *Indiquez des modifications à apporter à `shortestPath` et à la classe `Item` pour implémenter cet algorithme.*

Question 2.4. *(Plus dur) Démontrez la correction de votre algorithme A^* : celui-ci termine forcément, et retourne bien la longueur du plus court chemin de a à b .*

3 Arbres PATRICIA

Nous voulons représenter des fonctions partielles f des `int` dans, par exemple, les `double`. Étant donnée la représentation d'une fonction f , nous voulons obtenir efficacement la représentation des fonctions

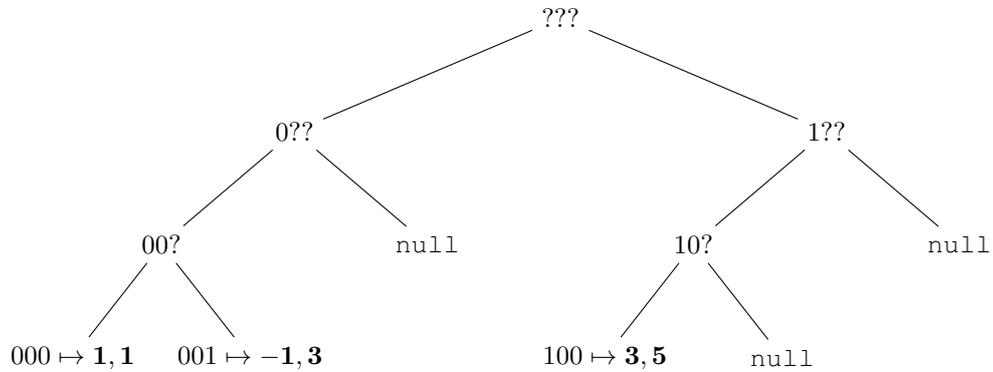
- `update(f, x0, y)`, la fonction qui à x_0 associe y , et à $x \neq x_0$ associe $f(x)$;
- `remove(f, x0)`, la fonction identique à f mais dont on a supprimé la clef x_0 (autrement dit, x_0 n'est plus dans le support de la fonction).

De plus, **on souhaite que, même après calcul de `update(f, x0, y)` ou `remove(f, x0)`, l'ancien f reste valable et non modifié.**

Nous nous limiterons à des x dans l'intervalle $0, \dots, 2^{H+1} - 1$ où $0 \leq H \leq 31$. On se propose d'utiliser la structure de données suivante : un arbre binaire incomplet (certaines branches peuvent valoir `null`) dont les feuilles contiennent un `double` et dont chaque nœud interne correspond à un chiffre de la décomposition de x en binaire (sur H chiffres binaires) en commençant par les chiffres de plus fort poids. Par ailleurs, on ne construit jamais de nœud interne dont les deux branches sont `null` (on met directement `null`).

Un arbre passé en paramètre aux fonctions `update` etc. soit est `null` (fonction définie nulle part) soit est de hauteur exactement H ; notamment les feuilles sont exactement à profondeur H .

Expliquons cela sur un exemple : pour $H = 2$, pour représenter la fonction partielle $\{0 \mapsto 1, 1; 1 \mapsto -1, 3; 4 \mapsto 3, 5\}$, on considère les associations $\{000 \mapsto 1, 1; 001 \mapsto -1, 3; 100 \mapsto 3, 5\}$ et on construit l'arbre



Remarquez que l'on ne peut avoir de feuille qu'au niveau $H + 1$ de l'arbre, 0 étant la racine.

On vous donne le squelette de classe suivant ; vous ne changerez dans aucune des questions suivantes les déclarations des champs et constructeurs. La constante `HIGH_BIT` est H .

```

1 class PTree {
2     final PTree b0, b1;
3     final double leaf;
4
5     PTree(double leaf) {
6         this.leaf = leaf;
7         this.b0 = null;
8         this.b1 = null;
9     }
10
11    PTree(PTree b0, PTree b1) {
12        this.b0 = b0;
13        this.b1 = b1;
14        this.leaf = Double.NaN;
15    }
16
17    public static PTree empty() {
18        return null;
19    }
20
21    final static int HIGH_BIT = 31;
22
23    static boolean getBit(int x, int k) {
24        return (x & (1 << k)) != 0;
25    }
26 }
  
```

`getBit(x, k)` où $0 \leq k \leq H$ retourne le bit numéro k de l'entier x , $k = 0$ donnant le bit de poids faible.

Un nœud interne est représenté par $b_0 \neq \text{null}$ ou $b_1 \neq \text{null}$; dans le cas où $b_0 = b_1 = \text{null}$ c'est qu'on est sur une feuille, dont le contenu est dans `leaf`.

Question 3.1. *Donnez une fonction **static double** `get(PTree t, int x)` qui retourne la valeur en x de la fonction représentée par t , ou la constante `Double.NaN` si x n'est pas dans le support de t (autrement dit, si t n'a pas de valeur en x).*

Vous pourrez programmer une deuxième fonction `getRec(PTree t, int x, int level)`.

Question 3.2. *Donnez une fonction **public static** `PTree update(PTree t, int x, double y)`. Rappel : l'ancien t doit rester inchangé.*

Vous pourrez programmer une deuxième fonction `updateRec(PTree t, int x, double y, int level)`.

Question 3.3. *Donnez une fonction **static** `PTree newNode(PTree b0, PTree b1)` qui construit un nœud interne sauf si b_0 et b_1 sont `null`, auquel cas elle renvoie `null`.*

Question 3.4. *Donnez une fonction **public static** `PTree remove(PTree t, int x)`. Rappel : l'ancien t doit rester inchangé.*

Vous pourrez programmer une deuxième fonction `removeRec(PTree t, int x, int level)`.

Soit maintenant l'interface suivante, représentant une fonction des `double` dans les `double` :

```
1 interface UnaryOp {
2     double op(double a);
3 }
```

Question 3.5. *Donnez une fonction **public static** `PTree map(PTree t, UnaryOp f)` qui retourne la représentation de $f \circ t$.*

Indice : il s'agit d'un arbre avec la même structure que t mais dont on a remplacé les feuilles par leur image par f .