

Tables de hachage

Algorithmique et structures de données, 2023-2024

P. Kunzli (Cloud) et O. Malaspinas (A401), ISC, HEPIA

2024-02-20

En partie inspirés des supports de cours de P. Albuquerque

Les tables de hachage

Tableau vs Table

Tableau

- Chaque élément (ou valeur) est lié à un indice (la case du tableau).

```
annuaire tab[2] = {  
    "+41 22 123 45 67", "+41 22 234 56 78", ...  
};  
tab[1] == "+41 22 123 45 67";
```

Table

- Chaque élément (ou valeur) est lié à une clé.

```
annuaire tab = {  
    // Clé ,      Valeur  
    "Paul",      "+41 22 123 45 67",  
    "Orestis",   "+41 22 234 56 78",  
};  
tab["Paul"]     == "+41 22 123 45 67";  
tab["Orestis"]  == "+41 22 234 56 78";
```

Table

Définition

Structure de données abstraite où chaque *valeur* (ou élément) est associée à une *clé* (ou argument).

On parle de paires *clé-valeur* (*key-value pairs*).

Donnez des exemples de telles paires

Définition

Structure de données abstraite où chaque *valeur* (ou élément) est associée à une *clé* (ou argument).

On parle de paires *clé-valeur* (*key-value pairs*).

Donnez des exemples de telles paires

- Annuaire (nom-téléphone),
- Catalogue (objet-prix),
- Table de valeur fonctions (nombre-nombre),
- Index (nombre-page)
- ...

Opérations principales sur les tables

- Insertion d'élément (`insert(clé, valeur)`), insère la paire clé-valeur
- Consultation (`get(clé)`), retourne la valeur correspondant à clé
- Suppression (`remove(clé)`), supprime la paire clé-valeur

Structure de données / implémentation

Efficacité dépend de différents paramètres:

- taille (nombre de clé-valeurs maximal),
- fréquence d'utilisation (insertion, consultation, suppression),
- données triées/non-triées,
- ...

Consultation séquentielle (sequential_get)

Séquentielle

- table représentée par un (petit) tableau ou liste chaînée,
- types: key_t et value_t quelconques, et key_value_t

```
typedef struct {  
    key_t key;  
    value_t value;  
} key_value_t;
```

- on recherche l'existence de la clé séquentiellement dans le tableau, on retourne la valeur.

Consultation séquentielle (`sequential_get`)

Implémentation? Une idée?

Consultation séquentielle (sequential_get)

Implémentation? Une idée?

```
bool sequential_get(int n, key_value_t table[n], key_t key,
    value_t *value)
{
    int pos = n - 1;
    while (pos >= 0) {
        if (key == table[pos].key) {
            *value = table[pos].value;
            return true;
        }
        pos--;
    }
    return false;
}
```

Consultation séquentielle (sequential_get)

Implémentation? Une idée?

```
bool sequential_get(int n, key_value_t table[n], key_t key,
    value_t *value)
{
    int pos = n - 1;
    while (pos >= 0) {
        if (key == table[pos].key) {
            *value = table[pos].value;
            return true;
        }
        pos--;
    }
    return false;
}
```

Inconvénient?

Consultation séquentielle (`sequential_get`)

Exercice: implémenter la même fonction avec une liste chaînée
Poster le résultat sur matrix.

Consultation dichotomique (`binary_get`)

Dichotomique

- table représentée par un (petit) tableau trié par les clés,
- types: `key_t` et `value_t` quelconques, et `key_value_t`
- on recherche l'existence de la clé par dichotomie dans le tableau, on retourne la valeur,
- les clés possèdent la notion d'ordre (`<`, `>`, `=` sont définis).

Consultation dichotomique (`binary_get`)

Implémentation? Une idée?

Consultation dichotomique (binary_get)

Implémentation? Une idée?

```
bool binary_get1(int n, key_value_t table[n], key_t key, value_t *value) {
    int top = n - 1, bottom = 0;
    while (top > bottom) {
        int middle = (top + bottom) / 2;
        if (key > table[middle].key) {
            bottom = middle+1;
        } else {
            top = middle;
        }
    }
    if (key == table[top].key) {
        *value = table[top].value;
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
```

Consultation dichotomique (binary_get)

Autre implémentation

```
bool binary_get2(int n, key_value_t table[n], key_t key, value_t *value) {
    int top = n - 1, bottom = 0;
    while (true) {
        int middle = (top + bottom) / 2;
        if (key > table[middle].key) {
            bottom = middle + 1;
        } else if (key < table[middle].key) {
            top = middle;
        } else {
            *value = table[middle].value;
            return true;
        }
        if (top < bottom) {
            break;
        }
    }
    return false;
}
```

Quelle est la différence avec le code précédent?

Transformation de clé (hashing)

Problématique: Numéro AVS (13 chiffres)

- Format: 106.3123.8492.13

Numéro AVS	Nom
0000000000000	-----
...	...
1063123849213	Paul
...	...
3066713878328	Orestis
...	...
9999999999999	-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

Transformation de clé (hashing)

Problématique: Numéro AVS (13 chiffres)

- Format: 106.3123.8492.13

Numéro AVS	Nom
0000000000000	-----
...	...
1063123849213	Paul
...	...
3066713878328	Orestis
...	...
9999999999999	-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

- Clé: Numéro AVS, Valeur: Nom.

Nombre de clés? Nombre de citoyens? Rapport?

Transformation de clé (hashing)

Problématique: Numéro AVS (13 chiffres)

- Format: 106.3123.8492.13

Numéro AVS	Nom
0000000000000	-----
...	...
1063123849213	Paul
...	...
3066713878328	Orestis
...	...
9999999999999	-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

- Clé: Numéro AVS, Valeur: Nom.

Nombre de clés? Nombre de citoyens? Rapport?

- 10^{13} clés, 10^7 citoyens, 10^{-5} ($10^{-3}\%$ de la table est occupée) \Rightarrow inefficace.
- Pire: 10^{13} entrées ne rentre pas dans la mémoire d'un ordinateur.

Transformation de clé (hashing)

Problématique 2: Identificateurs d'un programme

- Format: 8 caractères (simplification)

Identificateur		Adresse
aaaaaaaa		-----
...		...
resultat		3aeff
compteur		4fedc
...		...
zzzzzzzz		-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

Transformation de clé (hashing)

Problématique 2: Identificateurs d'un programme

- Format: 8 caractères (simplification)

Identificateur		Adresse
aaaaaaaa		-----
...		...
resultat		3aeff
compteur		4fedc
...		...
zzzzzzzz		-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

- Clé: Identificateur, Valeur: Adresse.

Nombre de clés? Nombre d'identificateur d'un programme?

Rapport?

Transformation de clé (hashing)

Problématique 2: Identificateurs d'un programme

- Format: 8 caractères (simplification)

Identificateur		Adresse
aaaaaaaa		-----
...		...
resultat		3aeff
compteur		4fedc
...		...
zzzzzzzz		-----

Quelle est la clé? Quelle est la valeur?

- Clé: Identificateur, Valeur: Adresse.

Nombre de clés? Nombre d'identificateur d'un programme?

Rapport?

- $26^8 \sim 2 \cdot 10^{11}$ clés, 2000 identificateurs, 10^{-8} ($10^{-6}\%$ de la table est occupée) \Rightarrow *un peu inefficace*.

Fonctions de transformation de clé (hash functions)

- La table est représentée avec un tableau.
- La taille du tableau est beaucoup plus petit que le nombre de clés.
- On produit un indice du tableau à partir d'une clé:

$$h(key) = n, \quad n \in \mathbb{N}.$$

En français: on transforme `key` en nombre entier qui sera l'indice dans le tableau correspondant à `key`.

La fonction de hash

- La taille du domaine des clés est beaucoup plus grand que le domaine des indices.
- Plusieurs indices peuvent correspondre à la **même clé**:
 - Il faut traiter les **collisions**.
- L'ensemble des indices doit être plus petit ou égal à la taille de la table.

Une bonne fonction de hash

- Distribue uniformément les clés sur l'ensemble des indices.

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par troncature

$$h : [0, 9999] \rightarrow [0, 9]$$

$h(key)$ = troisième chiffre du nombre.

Key		Index
0003		0
1123		2 \
1234		3 -> collision.
1224		2 /
1264		6

Quelle est la taille de la table?

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par troncature

$$h : [0, 9999] \rightarrow [0, 9]$$

$h(\textit{key}) =$ troisième chiffre du nombre.

Key		Index
0003		0
1123		2 \
1234		3 -> collision.
1224		2 /
1264		6

Quelle est la taille de la table?

C'est bien dix oui.

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par découpage

Taille de l'index: 3 chiffres.

```
key = 321 991 24 -> 321
                        991
                        + 24
                        ----
                        1336 -> index = 336
```

Devinez l'algorithme?

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par découpage

Taille de l'index: 3 chiffres.

```
key = 321 991 24 -> 321
                      991
                      + 24
                      ----
                      1336 -> index = 336
```

Devinez l'algorithme?

On part de la gauche:

1. On découpe la clé en tranche de longueur égale à celle de l'index.
2. On somme les nombres obtenus.
3. On tronque à la longueur de l'index.

Méthode multiplicative

Taille de l'index: 2 chiffres.

key = 5486 \rightarrow $\text{key}^2 = 30096196 \rightarrow$ index = 96

On prend le carré de la clé et on garde les chiffres du milieu du résultat.

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par division modulo

Taille de l'index: N chiffres.

$$h(\text{key}) = \text{key} \% N.$$

Quelle doit être la taille de la table?

Fonctions de transformation de clés: exemples

Méthode par division modulo

Taille de l'index: N chiffres.

$$h(\text{key}) = \text{key} \% N.$$

Quelle doit être la taille de la table?

Oui comme vous le pensiez au moins N.

Traitement des collisions

La collision

$\text{key1} \neq \text{key2}, h(\text{key1}) == h(\text{key2})$

Traitement (une idée?)

Traitement des collisions

La collision

$key1 \neq key2, h(key1) == h(key2)$

Traitement (une idée?)

- La première clé occupe la place prévue dans le tableau.
- La deuxième (troisième, etc.) est placée ailleurs de façon **déterministe**.

Dans ce qui suit la taille de la table est `table_size`.

La méthode séquentielle

Comment ça marche?

- Quand l'index est déjà occupé on regarde sur la position suivante, jusqu'à en trouver une libre.

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + 1) % table_size; // attention à pas dépasser  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Problème?

La méthode séquentielle

Comment ça marche?

- Quand l'index est déjà occupé on regarde sur la position suivante, jusqu'à en trouver une libre.

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + 1) % table_size; // attention à pas dépasser  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Problème?

- Regroupement d'éléments (clustering).

Comment ça marche?

- Comme la méthode séquentielle mais on “saute” de k .

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + k) % table_size; // attention à pas dépasser  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Quelle valeur de k éviter?

Comment ça marche?

- Comme la méthode séquentielle mais on “saute” de k .

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + k) % table_size; // attention à pas dépasser  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Quelle valeur de k éviter?

- Une valeur où `table_size` est multiple de k .

Cette méthode répartit mieux les regroupements au travers de la table.

Méthode du double hashing

Comment ça marche?

- Comme la méthode linéaire, mais $k = h_2(\text{key})$ (variable).

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + h2(k)) % table_size; // attention à pas dépasser  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Quelle propriété doit avoir h_2 ?

Exemple

```
h2(key) = (table_size - 2) - key % (table_size - 2)
```

Méthode pseudo-aléatoire

Comment ça marche?

- Comme la méthode linéaire mais on génère k pseudo-aléatoirement.

```
index = h(key);  
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {  
    index = (index + random_number) % table_size;  
}  
table[index].key = key;  
table[index].state = OCCUPIED;
```

Comment s'assurer qu'on va bien retrouver la bonne clé?

Méthode pseudo-aléatoire

Comment ça marche?

- Comme la méthode linéaire mais on génère k pseudo-aléatoirement.

```
index = h(key);
while (table[index].state == OCCUPIED && table[index].key != key) {
    index = (index + random_number) % table_size;
}
table[index].key = key;
table[index].state = OCCUPIED;
```

Comment s'assurer qu'on va bien retrouver la bonne clé?

- Le germe (seed) de la séquence pseudo-aléatoire doit être le même.
- Le germe à choisir est l'index retourné par $h(key)$.

```
srand(h(key));
while {
    random_number = rand();
}
```

Méthode quadratique

- La fonction des indices de collision est de degré 2.
- Soit $J_0 = h(key)$, les indices de collision se construisent comme:

```
J_i = J_0 + i^2 % table_size, i > 0,  
J_0 = 100, J_1 = 101, J_2 = 104, J_3 = 109, ...
```

Problème possible?

Méthode quadratique

- La fonction des indices de collision est de degré 2.
- Soit $J_0 = h(key)$, les indices de collision se construisent comme:

```
J_i = J_0 + i^2 % table_size, i > 0,  
J_0 = 100, J_1 = 101, J_2 = 104, J_3 = 109, ...
```

Problème possible?

- Calculer le carré peut-être “lent”.
- En fait on peut ruser un peu.

Méthode quadratique

```
J_i = J_0 + i^2 % table_size, i > 0,  
J_0 = 100
```

```
      \  
      d_0 = 1  
     / \  
J_1 = 101      Delta = 2  
     \  
     d_1 = 3  
    / \  
J_2 = 104      Delta = 2  
     \  
     d_2 = 5  
    / \  
J_3 = 109      Delta = 2  
     \  
     d_3 = 7  
    /  
J_4 = 116
```

```
J_{i+1} = J_i + d_i,  
d_{i+1} = d_i + Delta, d_0 = 1, i > 0.
```

Méthode de chaînage

Comment ça marche?

- Chaque index de la table contient un pointeur vers une liste chaînée contenant les paires clés-valeurs.

Un petit dessin

Méthode de chaînage

Exemple

On hash avec la fonction $h(\text{key}) = \text{key} \% 11$ (key est le numéro de la lettre de l'alphabet)

U		N		E		X		E		M		P		L		E		D		E		T		A		B		L		E
10		3		5		2		5		2		5		1		5		4		5		9		1		2		1		5

Comment on représente ça? (à vous)

Méthode de chaînage

Exemple

On hash avec la fonction $h(\text{key}) = \text{key} \% 11$ (key est le numéro de la lettre de l'alphabet)

U		N		E		X		E		M		P		L		E		D		E		T		A		B		L		E
10		3		5		2		5		2		5		1		5		4		5		9		1		2		1		5

Comment on représente ça? (à vous)

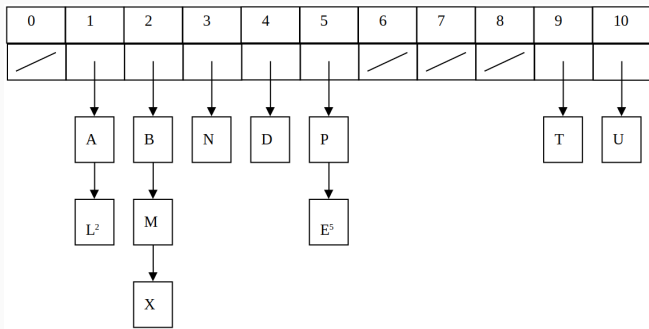


Figure 1: La méthode de chaînage

Méthode de chaînage

Avantages:

- Si les clés sont grandes l'économie de place est importante (les places vides sont NULL).
- La gestion des collisions est conceptuellement simple.
- Pas de problème de regroupement (clustering).

Exercice 1

- Construire une table à partir de la liste de clés suivante: R, E, C, O, U, P, A, N, T
- On suppose que la table est initialement vide, de taille $n = 13$.
- Utiliser la fonction $h_1(k) = k \bmod 13$ où k est la k -ème lettre de l'alphabet et un traitement séquentiel des collisions.