

Conteneurs, réalisation en langage C

M Billaud

2021-07-17

Table des matières

1	Objectifs du document	1
2	Rappels	2
2.1	Les données en mémoire	2
2.1.1	Taille des données, opérateur <code>sizeof()</code>	2
2.1.2	Structures en mémoire	3
2.1.3	Adresse des données, opérateur “&”	3
2.1.4	Tableaux et adresses	4
2.2	Pointeurs	4
2.2.1	Déclaration des pointeurs	4
2.2.2	Pointeurs non-typés, conversions	5
2.2.3	Indirection, opérateur “*”	5
2.2.4	Le pointeur <code>NULL</code>	5
2.2.5	Pointeurs de structures, notation “->”	5
2.3	Passage de paramètres	6
2.3.1	Pointeur pour le passage par référence	6
2.3.2	Pointeur pour éviter de copier	6
2.3.3	Parcours de tableau, arithmétique des pointeurs	6
2.4	Allocation dynamique	7
2.4.1	Attention, danger	7
2.4.2	Fonctions <code>malloc()</code> et <code>free()</code>	7
2.4.3	Exercice :	8
2.4.4	Réallocation (<code>realloc</code>)	8
3	Conteneurs	8
3.1	Tableaux extensibles	8
3.1.1	Choix d’une API, exemple d’utilisation	9
3.1.2	L’implémentation	10
3.1.3	Stratégie de doublement de la capacité	11
3.2	Ensemble de chaînes, hachage	11
3.2.1	Opérations de base	12
3.2.2	Idée générale	13
3.2.3	Agrandissement par doublement	13
3.2.4	Doublement et redistribution	13
3.2.5	Détails d’implémentation	14
3.2.6	Choix de la fonction de hachage	14
3.2.7	Code source	14

1 Objectifs du document

Ce document montre les principes de fonctionnement de divers **conteneurs** (tableau extensible, listes chaînées, dictionnaire, ...) en allant jusqu’aux détails d’implémentation.

Pour aller au niveau le plus bas que permet la portabilité, l’implémentation est réalisée en C.

Inconvénient du langage C : il ne permet pas la *généricité*. C'est-à-dire que si on a écrit le code d'un tableau extensible d'entiers, il faut tout recommencer pour avoir un tableau extensible de chaînes, par exemple.

Mais l'objectif ici n'est pas d'obtenir une implémentation "professionnelle" des conteneurs. En pratique on utilisera des langages de plus haut niveau, ou des bibliothèques existantes, mais ça ne dispense pas de comprendre comment ça marche.

2 Rappels

2.1 Les données en mémoire

Un programme C contient généralement des variables. Pendant l'exécution, chaque variable est stockée en mémoire quand elle n'est pas éliminée par le compilateur (ce qui arrive quand il détecte que la variable est inutile, ou suffisamment temporaire pour être rangée dans un registre du processeur), dans un **emplacement en mémoire** formé d'octets consécutifs.

2.1.1 Taille des données, opérateur `sizeof()`

Le nombre d'octets (la **taille**) dépend du type de la variable. On la détermine en appliquant l'opérateur `sizeof()` à une variable ou à un type.

Le listing ci-dessous montre un programme qui fait afficher les tailles de quelques types.

```
/**
 * Affichage des tailles de divers types de base.
 *
 * Les tailles dépendent du compilateur,
 * sauf pour pour char (toujours 1).
 */
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("char\t%zu\n",    sizeof(char));
    printf("int\t%zu\n",     sizeof(int));
    printf("long\t%zu\n",    sizeof(long));
    printf("float\t%zu\n",   sizeof(float));
    printf("double\t%zu\n",  sizeof(double));
    return 0;
}
```

Le résultat dépend des choix d'implémentation du compilateur que vous utilisez, sauf pour le type `char` qui correspond **toujours**¹ à un octet exactement.²

Exécution du programme :

type	taille
----	-----
char	1
int	4
long	8
float	4
double	8

Par exemple, un `int` occupe *en général* 4 octets sur une machine 32 bits, et 8 octets sur une machine 64 bits.

Remarques :

1. `sizeof()` retourne un `size_t`, type qui correspond à un entier non signé assez grand pour stocker une taille. L'implémentation de `size_t` (`unsigned int`, `unsigned long`, ...) est dépendante de l'architecture.

¹Presque toujours. Il y a des complications sur les machines dont les mots sont de 36 bits, etc.

²Il a été nommé `char` à une époque où le codage d'un caractère tenait toujours sur un octet (codages ANSI, EBCDIC, ...). Si c'était à refaire, ce type s'appellerait certainement `byte`.

2. Portabilité : utilisez la spécification de format `%zu` pour le type `size_t`.

2.1.2 Structures en mémoire

Rappel : une structure contient un ou plusieurs membres (champs) qui peuvent être de types différents. Exemple de définition d'un type et d'une variable :

```
struct Employe {
    char nom[40];
    int age;
};

struct Employe cuistot = { "Maurice", 63 };
```

Exercice : Écrivez un programme montrant un exemple de structure dont la taille n'est pas *égale* à la somme des tailles des champs.

2.1.3 Adresse des données, opérateur “&”

Le programme ci-dessous fait afficher les adresses de quelques variables pendant l'exécution, obtenues en leur appliquant l'opérateur “&” (address-of)³ du langage C.

```
/**
 * Affichage d'adresses de variables.
 */
#include <stdio.h>

int glob1 = 12;
float glob2 = 34;

int main()
{
    int loc1 = 33;
    float loc2 = 3.14;
    printf("var.\tadresse\n----\t-----\n");
    printf("glob1\t%p\n", (void *) & glob1);
    printf("glob2\t%p\n", (void *) & glob2);
    printf("loc1\t%p\n", (void *) & loc1);
    printf("loc2\t%p\n", (void *) & loc2);
    return 0;
}
```

Résultat de l'exécution

var.	adresse
----	-----
glob1	0x5594b04a9038
glob2	0x5594b04a903c
loc1	0x7ffa1c515fc
loc2	0x7ffa1c515f8

Les adresses sont des données typées : par exemple l'adresse d'une variable de type `int` est de type `int*`. L'affichage se fait avec la spécification “%p” (pour *pointer*) en les convertissant en “adresses non-typées” (`void *`).

Remarques :

- Les variables globales du programme et les variables locales de la fonction `main()` sont dans des “segments” dont les adresses diffèrent considérablement : le segment de données pour les variables globales, et le segment de pile pour les autres⁴.

³Il s'agit ici des *adresses virtuelles*, dans l'espace mémoire où le système a chargé le processus.

⁴Sur une machine qui supporte la notion de segmentation, évidemment. Ce n'est pas le cas des petits micro-contrôleurs dans le domaine de l'informatique embarquée

- Sur les systèmes d’exploitation modernes, les adresses virtuelles qui s’affichent changent à chaque exécution⁵.

Exercice : Reprenez l’exemple de structure dont la taille est supérieure à la somme des tailles des champs, et définissez une variable de ce type. Faites afficher l’adresse et la taille de la structure et de chacun de ses champs. Conclusion ?

2.1.4 Tableaux et adresses

Le programme ci-dessous fait afficher l’adresse d’un tableau et de ses éléments.

```
/**
 * Affichage d'adresses tableaux / éléments
 */
#include <stdio.h>

int main()
{
    int tab[4] = { 11, 22, 33, 44 };

    printf("var.\tadresse\n----\t-----\n");
    printf("tab\t%p\n", (void *) tab);
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        printf("tab[%d]\t%p\n", i, (void *) & tab[i]);
    }
    return 0;
}
```

Résultat :

```
var.      adresse
----      -
tab 0x7ffd7b053230
tab[0] 0x7ffd7b053230
tab[1] 0x7ffd7b053234
tab[2] 0x7ffd7b053238
tab[3] 0x7ffd7b05323c
```

Remarque : En C, une variable de type tableau désigne en fait l’*adresse* de l’emplacement qui a été réservé en mémoire pour placer les éléments. Il n’y a donc pas besoin de mettre un “&” devant `tab` dans le `printf`.

On constate qu’à l’exécution, les éléments se suivent en mémoire, et l’adresse du tableau correspond à celle du premier élément.

2.2 Pointeurs

On appelle **pointeur**⁶ une donnée qui contient une adresse, c’est-à-dire la position d’une (autre) donnée en mémoire.

On emploie les pointeurs pour diverses raisons, en particulier :

- le passage de paramètres,
- le parcours de tableaux,
- la manipulation des données allouées dynamiquement.

2.2.1 Déclaration des pointeurs

Pour **déclarer** un pointeur destiné à contenir des adresses d’objets de type T, on précède son nom par une étoile. Exemples :

```
int *pi;           // pointeur sur un int
struct Personne *pp; // pointeur sur struct Personne
```

⁵C’est une mesure de sécurité pour éviter l’exploitation de “débordements de tampon” et autres erreurs de programmation. Lors du chargement d’un programme, le système d’exploitation choisit des adresses aléatoires pour placer les segments dans l’espace mémoire virtuel du processus.

⁶Ce terme est aussi (hélas) souvent employé par extension pour désigner les adresses elles-mêmes. Nous essaierons d’éviter ce regrettable manque de rigueur, source de confusions, qui permettrait d’écrire qu’un pointeur (au sens de variable) *contient* un pointeur (au sens d’adresse)...

Pour déclarer un tableau de pointeurs, le nom du tableau est précédé par une étoile :

```
char *noms[10]; // tableau de 10 pointeurs de caractères
```

La règle générale est qu'en C, la déclaration d'une variable ressemble à son usage (voir l'indirection ci-dessous).

2.2.2 Pointeurs non-typés, conversions

Les pointeurs non-typés sont déclarés avec `void *`.

```
int entier = 123;
void *adresse = &entier; // pointeur non typé
printf("valeur=%d, adresse=%p\n",
      entier,      adresse);
```

Remarque : l'expression "`&entier`" de la seconde ligne est de type `int *`, mais il y a une **conversion implicite** entre les adresses typées et non-typées.

2.2.3 Indirection, opérateur "*"

L'opérateur "*" fournit un accès à la donnée dont l'adresse est contenue dans un pointeur **typé**. Exemple :

```
int nombre = 12;
int *p = &nombre; // pointeur typé (entiers)

*p = 33; // modif. à travers p
printf("= %d\n", *p); // accès indirect
```

Terminologie : on dit que

- la variable `nombre` est **pointée** par `p`.
- on fait une **indirection** pour, à partir d'un pointeur, accéder à la donnée qu'il pointe.
- on **dé-référence** le pointeur.

***Remarque :** dans l'exemple d'un tableau de pointeurs de caractères vu plus haut,

- `noms[2]` est le troisième⁷ pointeur ;
- `*noms[2]` est le `char` désigné par ce pointeur.

Et puisque `*noms[i]` est un `char`, dans la logique de C, il n'est pas anormal que la déclaration d'un tableau de pointeurs

```
char *noms[10];
```

ressemble fortement à l'usage qu'on a des éléments.

2.2.4 Le pointeur NULL

La constante `NULL` est une valeur conventionnelle (de type `void*` que l'on affecte à un pointeur pour indiquer qu'il **ne contient pas**, à un moment donné, l'adresse d'un objet en mémoire. Le pointeur ne pointe sur rien.⁸

Quand un pointeur contient `NULL`, tenter de le dé-référencer est un **comportement indéfini**, qui provoque généralement un arrêt brutal de l'exécution :

```
int *p = NULL;
*p = 12; // crash
```

2.2.5 Pointeurs de structures, notation "->"

Selon les règles de priorités d'opérateurs de C, "`*a.b`" se lit "`*(a.b)`".

La notation **pointeur->champ** facilite la désignation d'un champ d'une structure dont on a l'adresse dans un pointeur. Exemple :

⁷le premier a l'indice 0...

⁸Ne pas confondre avec un pointeur non-initialisé, qui contient une valeur aléatoire

```

struct Point {
    float x, y;
};
...
struct Point *p; // p pointeur de point

p->x = 0.0;        // au lieu de (*p).x = 0.0
p->y = 0.0;

```

2.3 Passage de paramètres

Le langage C ne connaissant que le passage de paramètres **par valeur**, on utilise des pointeurs pour simuler le “passage de référence” dans deux situations :

1. l'action que l'on veut coder modifie un objet qu'on lui indique,
2. les objets que l'on souhaite transmettre sont assez gros, et pour des raisons de performance, on veut éviter la copie inhérente à un passage par valeur.

2.3.1 Pointeur pour le passage par référence

Exemple : une action consistant à échanger les nombres contenus dans deux variables. On la traduit par une fonction à qui on passe les **adresses** des variables à modifier.

```

void echanger(int *pa, int *pb) {
    int tmp = *pa;
    *pa = *pb;
    *pb = tmp;
}

// usage
int a = 34, b = 23;
echanger( &a, &b);

```

2.3.2 Pointeur pour éviter de copier

Exemple: affichage d'une structure.

```

struct Personne {
    char nom[100];
    char prenom[100];
    ...
};

void afficher_personne(const struct Personne *p) {
    printf("nom = %s\n", p->nom);
    ...
}

```

Le mot-clé **const** annonce nos intentions. La déclaration de paramètre se lit de droite à gauche : **p** est un pointeur vers une structure **Personne** qu'on ne modifie pas.

2.3.3 Parcours de tableau, arithmétique des pointeurs

Une chaîne de caractères est un tableau d'octets terminé par un caractère nul.

```

char test[] = "abc"; // tableau de 4 octets

```

Pour parcourir une chaîne, on peut⁹ utiliser un pointeur qui va désigner tour à tour chaque octet :

```

void affiche_codes(const char chaine[]) {
    char *p = chaine;

```

⁹à la place d'un indice

```

while (*p != '\0') {
    printf("-> %d\n", *p);
    p++;
}
}

```

Remarques

1. Un tableau déclaré en paramètre est en réalité un pointeur.
2. l'incrément d'un pointeur (`p++`) modifie ce pointeur pour qu'il désigne l'élément suivant¹⁰

2.4 Allocation dynamique

L'**allocation dynamique de mémoire** est un ensemble de fonctionnalités mises à la disposition du programmeur d'application par la bibliothèque standard C.

Elle lui permet de gérer de l'espace mémoire supplémentaire (en plus de la pile d'exécution et du segment de données) pour y placer des données, en spécifiant le nombre d'octets voulu. Elle permet aussi de libérer un espace alloué dont on n'a plus besoin.

2.4.1 Attention, danger

L'usage de l'allocation dynamique impose un soin très attentif au programmeur qui est guetté par deux dangers :

- **la fuite mémoire** si un programme alloue en boucle des zones mémoires, sans les libérer quand il n'en n'a plus besoin. L'espace mémoire du programme s'agrandit indéfiniment, ce qui finit mal.
- **la corruption des données** si un programme utilise par erreur une zone qui a été libérée.

C'est une difficulté typique de la programmation en C.

2.4.2 Fonctions `malloc()` et `free()`

Nous utilisons essentiellement deux fonctions, définies dans `stdlib.h` :

- `malloc()` pour obtenir de l'espace mémoire supplémentaire,
- `free()` pour restituer (libérer) de l'espace obtenu par `malloc()`,

et occasionnellement `realloc()` qui agrandit ou rétrécit un espace qu'on a obtenu, quitte à le déménager ailleurs.

Le listing ci-dessous montre l'utilisation d'un tableau de structures alloué dynamiquement.

```

/**
 * Allocations et libérations. A compléter
 * Un tableau de personnes
 */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

struct Employe {
    char prenom[20];
    int bureau;
};

struct Employe *nouveauTableau(int nb)
{
    struct Employe *t
        = malloc(nb * sizeof(struct Employe));
    if (t == NULL) {
        fprintf(stderr, "échec d'allocation");
        exit (EXIT_FAILURE);
    }
}

```

¹⁰la valeur numérique du pointeur - celle qu'on voit avec `printf` - est augmentée de la taille du type pointé (ici 1, parce que c'est un `char`).

```

    return t;
}

int main()
{
    int nbEmployes;
    printf("Combien d'employés ? ");
    scanf("%d", & nbEmployes);

    struct Employe *tableau = nouveauTableau(nbEmployes);

    for (int i = 0; i < nb; i++) {
        lire_employe( & tableau[i]);
    }
    for (int i = 0; i < nb; i++) {
        afficher_employe( & tableau[i]);
    }

    free(tableau); // libération
    exit (EXIT_SUCCESS);
}

```

Pour l'allocation par `malloc()`, on indique en paramètre la taille (nombre d'octets) souhaitée. La fonction retourne l'adresse (non typée) de la zone allouée, ou `NULL` en cas d'échec..

Pour libérer une zone, on fournit son adresse à la fonction `free`.

2.4.3 Exercice :

Écrire les fonctions manquantes.

2.4.4 Réallocation (`realloc`)

Si on veut ajouter un employé supplémentaire, il faut agrandir le tableau. Pour cela on fait un appel à `realloc()` en indiquant

- l'adresse de la zone que l'on veut redimensionner (ici `tableau`),
- la nouvelle taille

et `realloc` retournera l'adresse de la nouvelle zone :

```

nbElements += 1;
tableau = realloc(tableau,
                  nbElements * sizeof(struct Employe));

```

À savoir :

- si le premier paramètre de `realloc` est `NULL`, la fonction se comporte comme `malloc()`,
- vous l'aviez deviné : en cas d'échec, `realloc()` retourne `NULL`.

Exercice

Écrivez un programme qui

- part d'un tableau vide,
- fait une boucle, en demandant si on veut en ajouter d'autres,
- les affiche tous à la fin.

3 Conteneurs

3.1 Tableaux extensibles

Nous appelons *tableau extensible* une structure de données qui sert à stocker des éléments, et qui

- comme un tableau ordinaire, permet de désigner un élément par sa position (première = 0, seconde = 1, etc.), pour le modifier ou le consulter.
- à la différence des tableaux, permet d'ajouter des éléments à la fin sans limite de taille¹¹.

Ici nous allons prendre l'exemple des tableaux extensibles d'entiers.

3.1.1 Choix d'une API, exemple d'utilisation

- Le type "tableau extensible d'entiers" se matérialise par une structure appelée `tab_int`.
- Une famille de fonctions, dont le nom est préfixé par "ti" représentera les actions qui agissent dessus.
- Le premier paramètre de ces fonctions sera toujours l'adresse du tableau concerné.¹²

Le programme suivant montre l'emploi d'un tel tableau :

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include "tab_int.h"

void afficher(const char *m, const struct tab_int *a);

int main()
{
    struct tab_int tableau;
    ti_init(& tableau);

    // 10, 20 ... 100
    for (int v = 10; v <= 100; v += 10) {
        ti_ajouter(& tableau, v);
    }

    afficher("avant", & tableau);
    ti_changer(& tableau, 3, 421);
    afficher("après", & tableau);

    ti_detruire(& tableau);

    exit (0);
}

/**
 * affiche un message et le contenu d'un tableau
 * @param m : chaîne
 * @param a : adresse du tableau
 */
void afficher(const char *m,
              const struct tab_int *a)
{
    printf("%s: ", m);
    int taille = ti_taille(a);
    for (int i = 0; i < taille; i++) {
        printf("%d ", ti_valeur(a, i));
    }
    printf("\n");
}
```

¹¹autre que les limitations de l'allocation dynamique

¹²pour les deux raisons évoquées plus haut : - c'est obligatoire pour les fonctions qui modifient le tableau - c'est souhaitable pour les autres, pour éviter de faire des copies. Dans ce cas on mettra un `const`.

Il remplit un tableau avec des valeurs de 10 en 10, et modifie l'une d'elles. Affichage des résultats avant et après modification :

```
avant: 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
après: 10 20 30 421 50 60 70 80 90 100
```

3.1.2 L'implémentation

3.1.2.1 Données Un tableau extensible est représenté par

- un **tableau** alloué dynamiquement, pouvant accueillir un certain nombre d'éléments (sa **capacité**),
- un entier indiquant le nombre d'éléments utilisés, au début du tableau (sa **taille**)

```
#ifndef TAB_INT_H
#define TAB_INT_H

struct tab_int {
    int  taille;
    int  capacite;
    int *elements;
};

void ti_init      (      struct tab_int *a);
void ti_ajouter   (      struct tab_int *a, int valeur);
void ti_detruire  (      struct tab_int *a);
int  ti_taille   (const struct tab_int *a);
int  ti_valeur   (const struct tab_int *a, int indice);
void ti_changer  (      struct tab_int *a, int indice, int valeur);
#endif
```

3.1.2.2 Code Le code comporte quelques choix d'implémentation :

- la capacité initiale, lorsqu'on initialise un tableau extensible (ici, 4 éléments)
- la stratégie d'agrandissement en cas de débordement. Ici on double : l'ajout du 5ième élément ré-alloue le tableau avec une capacité de 8, et l'ajout du 8ième porte la capacité à 16. Cette stratégie est justifiée plus loin.

```
#include <stdlib.h>
#include "tab_int.h"

#define CAPACITE_MINIMALE 4

void ti_init (struct tab_int *a)
{
    a->taille = 0;
    a->capacite = CAPACITE_MINIMALE;
    // NOTE : on devrait vérifier le résultat de malloc
    a->elements = malloc(a->capacite * sizeof(int));
}

void ti_ajouter(struct tab_int *a, int valeur)
{
    // si plein, agrandir
    if (a->taille == a->capacite) {
        a->capacite *= 2;
        // NOTE : on devrait vérifier le résultat de realloc
        a->elements = realloc(a->elements,
                             a->capacite * sizeof(int));
    }
    // ajout à la fin
    a->elements[a->taille] = valeur;
```

```

    a->taille += 1;
}

void ti_detruire(struct tab_int *a)
{
    a->taille = 0;
    a->capacite = 0;
    free(a->elements);
    a -> elements = NULL;
}

int ti_taille(const struct tab_int *a)
{
    return a->taille;
}

// les indices doivent être entre 0 et a->taille - 1

int ti_valeur(const struct tab_int *a, int indice)
{
    return a->elements[indice];
}

void ti_changer(struct tab_int *a, int indice,
               int valeur)
{
    a->elements[indice] = valeur;
}

```

3.1.3 Stratégie de doublement de la capacité

Lorsque le tableau est plein, on le ré-alloue avec une capacité supérieure.

La stratégie de doublement de cette capacité est, contrairement à ce que suggère l'intuition (souvent trompeuse pour ce genre de choses), **très efficace** en terme de nombre de copies : au cours du remplissage, chaque élément a été copié **au plus une fois** en moyenne.

Raisonnement pour s'en convaincre :

1. Imaginons qu'à un moment le *vector* ait grandi jusqu'à 500 éléments. Comme le tableau grandit en doublant de taille, sa capacité est la première puissance de 2 supérieure à 500, soit 512.
2. Le tableau sera agrandi (et ré-alloué) en ajoutant le 513ième, sa capacité passera à 1024 éléments, et pour cela il faudra ré-allouer ce qui provoquera la copie des 512 éléments existants. Coût : 512, si on prend comme unité de compte la copie d'un élément.
3. Mais pour arriver à 513, il avait fallu copier 256 éléments. Et pour arriver à 257, en copier 128.
4. Si on fait le total, si on en est au 513-ième élément ajouté (et jusqu'au 1024-ième) on a fait en tout $256 + 128 + 64 + \dots$ copies d'éléments, ce qui est plus petit que 512.

Conclusion : Dans le pire des cas (ajout du 513 ième), le coût moyen d'ajout d'un élément est inférieur à $512/513$: il y a donc eu **moins d'une copie par élément**.

Exercice : En général la première idée qui vient est d'augmenter d'une unité la capacité à chaque ajout. Évaluez le coût de cette stratégie.

3.2 Ensemble de chaînes, hachage

Dans cette partie, nous montrons comment représenter **efficacement** un ensemble¹³ de chaînes de caractères en utilisant une **fonction de hachage**.

¹³fini, donné par extension

3.2.1 Opérations de base

Les opérations de base sur cet ensemble :

- l'initialiser,
- y ajouter un élément (si il n'y est pas déjà),
- savoir combien il y a d'éléments dans l'ensemble,
- tester si un élément est présent,
- enlever un élément,
- libérer les ressources utilisées.

Ci-dessous un exemple d'utilisation où l'on ajoute une suite de mots (éventuellement en plusieurs exemplaires) et on fait afficher la taille (qui doit être 10).

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include "ens_chaines.h"

int main()
{
    struct ens_chaines ensemble;
    ec_init(& ensemble);

    char *mots[] = {
        "un", "deux", "trois", "un",
        "quatre", "deux", "cinq", "six",
        "sept", "trois", "huit", "neuf",
        "dix", "trois", "sept",
        NULL
    };
    for (int i = 0; mots[i] != NULL; i++) {
        ec_ajouter(& ensemble, mots[i]);
    }

    printf("-> taille %d (attendu = 10)\n",
           ec_taille(& ensemble));

    ec_dump(& ensemble);
    ec_liberer(& ensemble);

    return EXIT_SUCCESS;
}
```

Le programme affiche également le contenu interne de l'ensemble de chaînes, ce qui nous facilitera les explications.

```
-> taille 10 (attendu = 10)
0 ->
1 ->  "trois" (10282497)
2 ->  "quatre" (170727922)
3 ->  "un" (2099)
4 ->  "six" (35140)
5 ->  "dix" (30805)
6 ->  "deux" (522598)
7 ->
8 ->
9 ->
10 -> "huit" (546666)
11 -> "cinq" (518715)
```

```
12 -> "sept" (596204)
13 ->
14 -> "neuf" (571710)
15 ->
```

Nous ne présenterons que quelques opérations, les autres sont laissées en exercice.

3.2.2 Idée générale

3.2.2.1 Répartition en alvéoles

- les chaînes de caractères qui font partie de l'ensemble sont réparties dans des "alvéoles".
- les alvéoles forment un tableau, ce qui permet un accès rapide par indice.
- le numéro de l'alvéole dans laquelle se trouve (ou devrait se trouver) une chaîne de caractères est calculé à partir du contenu de cette chaîne, par ce qu'on appelle une **fonction de hachage**.
- plus précisément, le numéro d'alvéole s'obtient comme reste (opération modulo) de la division de la valeur du hachage par le nombre d'alvéoles.

Intérêt : La répartition en alvéoles permet de diviser le nombre de comparaisons nécessaires pour tester la présence d'une chaîne : on ne regarde que celles présentes dans son alvéole.

Dans l'idéal, la fonction de hachage serait parfaite, et conduirait à une alvéole où ne se trouve qu'une chaîne.

En pratique, on pourra avoir plusieurs chaînes dans certaines alvéoles. On va donc :

- prévoir qu'une alvéole contient une **liste** de chaînes,
- avoir un grand nombre d'alvéoles de façon à avoir statistiquement peu de chaînes par alvéole.

3.2.3 Agrandissement par doublement

La stratégie choisie est de doubler le nombre d'alvéoles quand le nombre de chaînes présentes dans l'ensemble atteint certain seuil ($3/4$ du nombre d'alvéoles). Les chaînes sont alors redistribuées entre les alvéoles.

Le respect de ce seuil garantit qu'il y a au maximum 0.75 chaînes par alvéole. Il y aura donc peu d'alvéoles avec plus d'une chaîne.

Comme pour les tableaux extensibles, la stratégie de doublement fait qu'en moyenne chaque alvéole est copiée au plus une fois.

3.2.4 Doublement et redistribution

Le doublement a une autre propriété intéressante. Quand on redistribue les chaînes d'une alvéole,

- soit elles restent dans la même alvéole,
- soit elles vont dans une alvéole "jumelle" qui vient d'être ajoutée.

Exemple : pour la chaîne "dix", la fonction de hachage vaut 30805.

- Si il y a 4 alvéoles, elle se trouve dans l'alvéole $30805 \% 4 = 1$.
- En passant à 8 alvéoles, elle va dans la nouvelle alvéole $30805 \% 8 = 5 = 4 + 1$.
- En passant à 16, elle reste en $30805 \% 16 = 5$.
- En passant à 32, elle va en $30805 \% 32 = 21 = 16 + 5$.
- etc.

Ceci nous autorise à redistribuer les chaînes en traitant les anciennes alvéoles une par une : on est sûr de ne pas avoir à déplacer chaque chaîne plus d'une fois.

3.2.5 Détails d'implémentation

3.2.5.1 Sémantique de valeur pour les chaînes Lorsqu'on appelle la fonction qui sert à ajouter une chaîne, ce qu'on veut c'est ajouter le contenu de la chaîne. Pour cela on ne peut pas se contenter de stocker l'adresse de la chaîne reçue, il faut en faire une copie.

Ci-dessous une erreur classique de programmation en C : si on fait ensuite afficher le tableau, on s'aperçoit qu'il ne contient pas ce qu'on pense y avoir mis :

```
char *joueurs[10];
char nom[100];
for (int i=0; i < 10; i++) {
    printf("donnez un nom :");
    scanf("%s", nom);
    joueurs[i] = nom;          // une erreur de débutant
}
```

puisqu'on a stocké 10 fois l'adresse de la même variable locale `nom`...

Lors de l'ajout d'une chaîne, on stocke donc en réalité *une copie* obtenue par `strdup()`. Cette copie est une ressource appartenant à l'ensemble, et sera libérée quand

- on retire une chaîne de l'ensemble
- on libère l'ensemble

3.2.5.2 Structure des alvéoles Nous choisissons de représenter les alvéoles, qui en principe ne contiendront que peu d'éléments (moins de 0.75 en moyenne), par des **listes chaînées non ordonnées**.

3.2.6 Choix de la fonction de hachage

Une fonction de hachage retourne un nombre non signé, parce qu'elle sert à calculer un indice (entier positif ou nul) comme reste d'une division entière.

Ce modulo (par une puissance de 2) fait qu'on utilise comme indice les bits de poids faible de la valeur retournée. Il est important que ces bits soient, autant que possible, dépendants de tous les caractères de la chaîne.

Un contre-exemple pour illustrer cette notion. Si le hachage était calculé ainsi

```
unsigned int hash = 0;
for (const char *c = chaine; *c != '\0'; c++) {
    hash = 16 * hash + *c;          // mauvais
}
```

à cause du décalage produit par la multiplication par 16, les 4 bits de droite ne dépendraient que du dernier caractère de la chaîne; les 8 bits de droite des deux derniers, etc. Les chaînes "**sept**" et "**huit**" se retrouveraient toujours dans la même alvéole, pour les ensembles qui ont moins de 256 alvéoles. Idem pour "**six**" et "**dix**". Et à partir d'une certaine taille, les premiers octets de la chaîne seront sans influence sur le résultat (ils seront perdus dans le débordement).

La multiplication par 17 ($= 16 + 1$) garantit que chaque octet de la chaîne a une influence sur les bits de poids faible du résultat de la fonction de hachage.

3.2.7 Code source

Entête

```
// ens_chaines.h

#ifndef ENS_CHAINE_H
#define ENS_CHAINE_H

struct ens_alveole;          // prédéclaration

struct ens_chaines {
    int nb_alveoles;
```

```

    int nb_elements;
    struct ens_alveole *alveoles;
};

void ec_init    (struct ens_chaines *e);
void ec_ajouter(struct ens_chaines *e,
               const char *chaine);

int ec_taille  (const struct ens_chaines *e);
void ec_dump   (const struct ens_chaines *e);

void ec_liberer(struct ens_chaines *e);

#endif

```

Code

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

#include "ens_chaines.h"

struct ens_cellule {
    char * chaine;
    struct ens_cellule *suivant;
};

struct ens_alveole {
    struct ens_cellule *premier;
};

#define NOMBRE_MIN_ALVEOLES 4

void ec_init(struct ens_chaines *e)
{
    e->nb_elements = 0;
    e->nb_alveoles = NOMBRE_MIN_ALVEOLES;
    e->alveoles = malloc(e->nb_alveoles
                        * sizeof (struct ens_alveole));
}

static unsigned int ec_hash(const char * chaine)
{
    unsigned int hash = 0;
    for (const char *c = chaine; *c != '\0'; c++) {
        hash = 17 * hash + *c;
    }
    return hash;
}

static void ec_doubler_nb_alveoles(struct ens_chaines *e)
{
    int na = e->nb_alveoles; // avant agrandissement
    e->nb_alveoles *= 2;
}

```

```

int taille =
e->nb_alveoles * sizeof (struct ens_alveole);
e->alveoles = realloc(e->alveoles, taille);

// initialisation de nouvelles alvéoles
for (int i = na; i < e->nb_alveoles; i++) {
    e->alveoles[i].premier = NULL;
}

// reclassement des éléments des anciennes alvéoles
for (int i = 0; i < na; i++) {
    struct ens_cellule *premier
    = e->alveoles[i].premier;
    e->alveoles[i].premier = NULL;

    while (premier != NULL) {
        struct ens_cellule *c = premier;
        premier = premier->suivant;
        int num_alveole
        = ec_hash(c->chaine) % (e->nb_alveoles);
        struct ens_alveole *a
        = &( e->alveoles[num_alveole] );
        c->suivant = a->premier;
        a->premier = c;
    }
}

void ec_ajouter(struct ens_chaines *e, const char *chaine)
{
    int num_alveole = ec_hash(chaine) % (e->nb_alveoles);
    struct ens_alveole * a = &(e->alveoles[num_alveole]);

    // sortie si déjà present
    for (struct ens_cellule *c = a->premier;
        c != NULL;
        c = c->suivant) {
        if (strcmp(c->chaine, chaine) == 0) {
            return;
        }
    }

    // Ajout nouvelle cellule avec copie de chaîne
    struct ens_cellule *nc
    = malloc(sizeof (struct ens_cellule));
    nc->chaine = strdup(chaine);
    nc->suivant = a->premier;
    a->premier = nc;
    e->nb_elements += 1;

    // besoin d'agrandir ?
    if (e->nb_elements >= (3 * e->nb_alveoles) / 4) {
        ec_doubler_nb_alveoles(e);
    }
}

void ec_liberer(struct ens_chaines *e)

```



```

{
    for (int i = 0; i < e->nb_alveoles; i++) {
        struct ens_cellule *premier
        = e->alveoles[i].premier;
        while (premier != NULL) {
            struct ens_cellule *c = premier;
            premier = premier->suivant;
            free(c->chaine);
            free(c);
        }
    }
    free(e->alveoles);
    // par précaution
    e->nb_alveoles = 0;
    e->nb_elements = 0;
    e->alveoles = NULL;
}

int ec_taille(const struct ens_chaines *e)
{
    return e->nb_elements;
}

void ec_dump(const struct ens_chaines *e)
{
    for (int i = 0; i < e->nb_alveoles; i++) {
        printf("%d ->", i);
        for (struct ens_cellule *c = e->alveoles[i].premier;
             c != NULL; c = c->suivant) {
            printf("\t\t\"%s\" (%u)",
                c->chaine,
                ec_hash(c->chaine));
        }
        printf("\n");
    }
}

```