

CRO TD4

Arbres binaires

Outils de débogage : `gdb`, `ddd`, `nemiver`

1 séance sur machine, 1^{er} avril 2026

1 Arbres binaires en C

Les arbres binaires que vous avez vu dans le cours ALG, sont implémentés en C par une combinaison de pointeur et de structure, comme le sont les listes. On commencera avec la définition de type suivante pour un noeud d'un arbre binaire d'entier (un arbre étant simplement un pointeur vers un noeud). Ici encore l'absence de fils est encodée par la valeur 0 pour le pointeur (on utilise plutôt la macro `NULL`, définie dans `<stdlib.h>`).

Les pointeurs seront étudiés plus en détail avec les listes. Pour l'instant il suffit de comprendre que l'opérateur "*" dans la définition de type ci-dessous signifie *pointeur vers* (l'équivalent des *références* vues en Algo).

On définit donc un noeud (type `NOEUD`) comme une structure avec 3 champs, un champs entier `val` et deux champs qui sont les pointeurs vers les fils droit et fils gauche. On définit aussi le type `ARBRE` comme un pointeur vers un noeud (les champs `filsGauche` et `filsDroit` sont donc de type `ARBRE` aussi).

```
struct model_noeud
{
    int val;
    struct model_noeud *filsGauche ;
    struct model_noeud *filsDroit ;
} ;
```

```
typedef struct model_noeud NOEUD;
```

```
typedef NOEUD *ARBRE;
```

QUESTION 1 ► Créez les fichiers `arbre_type.h`, `arbre.c`, et `arbre.h` ainsi que le fichier `Makefile` permettant de compiler le fichier `arbre.c` (même si il est vide initialement). A ce stade, le fichier `Makefile` ne sert qu'à générer le fichier `arbre.o`

QUESTION 2 ► Définir la fonction `creerArbre`, donc le prototype est :

```
ARBRE creerArbre(int val, ARBRE filsGauche, ARBRE filsDroit)
```

Pour cela vous aurez besoin d'*allouer* la mémoire nécessaire pour stocker les informations du noeud. Cela se fait avec la fonction `malloc` **void * malloc(size_t size)** qui *alloue* une zone mémoire de taille *size* et renvoie un pointeur vers la zone alloué.

Comme la fonction `malloc` ne sait pas ce que vous allez stocker dans la zone mémoire, elle renvoie un `void *` (pointeur sur `void` le type `null`). Il faut donc *caster* (ou *transtyper*) son résultat en un pointeur vers un noeud (type `NOEUD *`) ou de manière équivalente vers un arbre. Enfin, pour connaître la taille de ce qu'on veut allouer, il faut utiliser la fonction `sizeof`. Donc, après avoir déclaré un nouvel arbre `new`, la ligne d'allocation que vous allez écrire ressemble donc à :

```
new = (ARBRE)malloc(sizeof(NOEUD));
```

Attention, vous allez avoir besoin d'utiliser la fonction `malloc` et donc d'inclure les headers de la librairie standard standard : `<stdlib.h>`.

QUESTION 3 ► Créer un fichier `main.c` qui appelle cette fonction pour créer un arbre avec (au moins) trois noeuds.

QUESTION 4 ► Définir la fonction *récursive* `afficheArbre` qui utilise, par exemple, un parcours infixe pour afficher tous les noeuds de l'arbre. Tester cette fonction sur votre arbre.

QUESTION 5 ► Définir la fonction `hauteurArbre` qui calcule la hauteur d'un arbre. Tester cette fonction sur un arbre ayant des branches de longueurs différentes.

2 Outils de débogage : GDB

Le débogage de programme C est un art en soi. Le travail le plus important se fait lors de la conception par la structuration en modules et fonctions ainsi que lors du choix de la structure de donnée. La programmation et le test de chaque module indépendamment permet aussi de gagner beaucoup de temps sur l'ensemble du projet. Malgré cela, il reste souvent des bugs difficiles à trouver rapidement. Nous allons étudier un outil fondamental du développement sous unix : `gdb`¹, débogueur indispensable pour comprendre certaines erreurs.

QUESTION 6 ► Rajouter l'option `-g` à vos règles de Makefile qui produisent les fichiers `.o`. par exemple :

```
arbre.o: arbre.c arbre.h arbre_type.h
gcc -c -g arbre.c -o arbre.o
```

Recompilez votre programme et lancez la commande (en supposant que votre binaire exécutable s'appelle `main`) :

```
gdb main
```

Vous devez avoir une invite `gdb`.

- Tapez la commande `break main`, puis `run`.
- Tapez alors la commande `layout src` qui vous permet de voir le code source en même temps.
- La commande `backtrace` permet à tout moment de connaître l'enchaînement d'appels de fonctions successifs qui ont amené à cet instruction.
- La commande `step` avance d'une instruction C, c'est à dire qu'à l'appel d'une fonction, elle entre dans le corps du code de la fonction.
- La commande `next` a le même comportement mais elle n'entre pas dans les fonctions appelées, elle les exécute d'un seul coup.

1. Sur MAC OS, on préférera `lldb` qui est le débogueur du compilateur `llvm` qui est compatible avec le code généré par `gcc`. On pourra aussi utiliser une interface graphique pour `gdb` : `nemiver` ou `ddd`

GDB

gdb est un *debugger symbolique*, c'est-à-dire un utilitaire Unix permettant de contrôler le déroulement de programmes C. Il permet (entre autres) de mettre des points d'arrêt dans un programme, de visualiser l'état de ses variables, de calculer des expressions, d'appeler interactivement des fonctions, etc.

nemiver ou ddd sont des interfaces graphiques qui facilitent l'utilisation de gdb sous X-Window, mais gdb ne nécessite aucun système de fenêtrage, il peut s'exécuter sur un simple terminal shell (mode *console*). Il est indispensable de comprendre le fonctionnement en mode gdb pour pouvoir utiliser les ddd.

Lorsque l'on lance gdb avec la commande `gdb unexecutable.exe`, gdb a chargé l'exécutable, il attend alors une commande gdb, comme par exemple `run` (pour exécuter le programme), `break` (pour mettre un point d'arrêt dans le programme), `step` (pour avancer d'une instruction dans le programme), etc. Il y a donc une *invite* gdb.

Les points d'arrêt peuvent se positionner au début des fonctions (`break main`, par exemple), ou à une certaine ligne (`break 6`, par exemple), ou lorsqu'une variable change de valeur (`watch i`, par exemple).

Les commandes importantes (et leur raccourci) à connaître pour utiliser gdb sont les suivantes :

- `r` est équivalent à `run`
- `b main` est équivalent à `break main`
- `p var` est équivalent à `print var`
- `d var` est équivalent à `display var`
- `s` est équivalent à `step`
- `n` est équivalent à `next`
- `c` est équivalent à `continue`
- La commande `run` peut prendre des arguments, le programme est alors exécuté avec les arguments donnés
- la commande `info` permet d'afficher des informations sur l'état du programme dans le debugger. Par exemple `info b` liste les points d'arrêt.
- La commande `help` est l'aide en ligne de gdb

QUESTION 7 ► Mettez un point d'arrêt à la fonction `main`, entrez la commande `run`. Lorsque gdb vous rend la main, avancez pas à pas en tapant la commande `step` (raccourci `s`). Assez rapidement vous devez avoir un message d'erreur comme quoi gdb ne trouve pas le code source, pourquoi ?

QUESTION 8 ► relancer le débugeage (commande `run`), ajouter un point d'arrêt à la fonction `afficher_arbre`, continuer l'exécution avec la commande `continue` (raccourci : `c`). Afficher la valeur de l'arbre, par exemple si la variable `arbre` s'appelle `a` :

```
print a
```

A quoi correspond cette valeur ?

Affichez maintenant l'objet pointé par `a`, c'est à dire le noeud racine de votre arbre :

```
print *a
```

Affichez le fils gauche de la racine :

```
print *(a->filsGauche)
```

Expérimentez l'option `/x` de `print` :

```
print/x *(a->filsGauche)
```

Qu'est ce qui change ?

QUESTION 9 ► À quelle adresse est stockée votre arbre de référence ?

QUESTION 10 ► Affichez les 10 valeurs consécutives stockées en mémoire à partir de l’adresse de votre arbre en utilisant l’opérateur @ de gdb (voir `help print` dans gdb). Par exemple, si l’adresse à laquelle est stockée votre arbre est 0x602050, tapez :

```
print/x *( 0x602050)@10
```

Est ce que vous retrouvez vos éléments?

3 Outil d’aide pour les fuites mémoire : Valgrind

valgrind est un outil de vérification de code à l’exécution. Le code est exécuté dans une machine virtuelle qui vérifie les appels, adresses mémoires, etc. valgrind est essentiellement utilisé pour découvrir tous les problèmes mémoires : “fuites mémoire” (memory leak : mémoire allouée mais non libérée) et accès en dehors des bornes des tableaux. Les fuites mémoires ont peu d’importance pour les programmes qui terminent car l’espace alloué est libéré par le système d’exploitation, mais lorsque le programme est utilisé comme librairie dynamique, les fuites répétées peuvent rapidement saturer la mémoire.

valgrind est extrêmement simple d’utilisation, si votre programme se lance avec la commande :

```
monProg arg1 arg2
```

il suffit d’exécuter :

```
valgrind [option] monProg arg1 arg2
```

ou [option] indique ce que l’on désire mesurer avec valgrind. L’option par défaut (pas d’option) exécute memcheck qui vérifie l’essentiel des problèmes mémoire comme l’accès en dehors des bornes des tableaux, l’utilisation de mémoire après libération ou de mémoire non initialisée et les fuites mémoire. Le rapport donné par valgrind n’est pas très convivial.

QUESTION 11 ► Téléchargez le le programme valgrindEx.c sur Moodle et visualisez le, repérez les erreurs de la fonction f.

— Compiler ce fichier pour valgrind :

```
gcc valgrindEx.c -o valgrindEx
```

— Exécutez ce programme : > ./valgrindEx

— Exécutez ce programme avec valgrind : valgrind ./valgrindEx

Repérez dans le rapport de valgrind les erreurs que vous avez notés. Exécutez ce programme avec valgrind en mettant l’option permettant de visualiser ou la fuite mémoire a lieu.

4 Pour aller plus loin (facultatif) : Interface graphique du debugger

Note : Depuis quelques années, l’arrivée du codage UTF-8 a rendu obsolète un certain nombre d’interface graphique de gdb, nous essayons cette année sans garantie, en cas d’incohérence de comportement, toujours préférer l’interface textuelle de gdb.

L’interface graphique du debugger permet de faire les mêmes manipulations, mais dans un environnement plus convivial. Il existe deux interfaces graphiques installées sur les machines du département : ddd et nemiver. ddd n’est plus maintenu, mais nemiver est moins intuitif, on commencera par utiliser ddd.

Lancer ddd, par exemple, si votre exécutable s’appelle main, lancez :

```
ddd main
```

L’interface graphique est notamment utilisée pour se balader dans facilement dans les structures.

— Apprenez à vous balader dans les sources, chargez arbre.c, mettez un point d’arrêt sur la fonction afficher_arbre.

— Après le premier arrêt, exécutez le programme pas à pas, lorsque vous êtes dans la fonction afficher_arbre, afficher votre arbre de manière permanente, par exemple, si votre variable locale à la fonction afficher_arbre s’appelle a, tapez la commande :

```
graph display a
```

Ou utilisez le menu de ddd pour cela.

— Déroulez la structure en cliquant sur les champs `filGauche`, `filDroit`

5 Pour aller plus loin (facultatif) : Arbres Binaires de recherche

Dans cette exercice facultatif on utilisera toujours le même type `ARBRE` donné en page 1, mais pour stocker un arbre binaire de recherche (ABR). On rappelle que ce sont des arbres binaires de valeurs avec les propriétés :

- Tous les nœuds du sous-arbre gauche d'un nœud ont une valeur inférieure (ou égale) à la sienne
- Tous les nœuds du sous-arbre droit d'un nœud ont une valeur supérieure (ou égale) à la sienne

Pour chacune des fonctions suivantes, testez-les avec la fonctions `afficherArbre` programmée précédemment.

QUESTION 12 ► Écrire une fonction :

`ARBRE ajouterABR (ARBRE a, int val)`

qui prend en argument une valeur entière ainsi qu'un ABR et renvoie l'ABR `a` auquel on aura ajouté un noeud avec la valeur `val` (en respectant les règles ABR bien sûr).

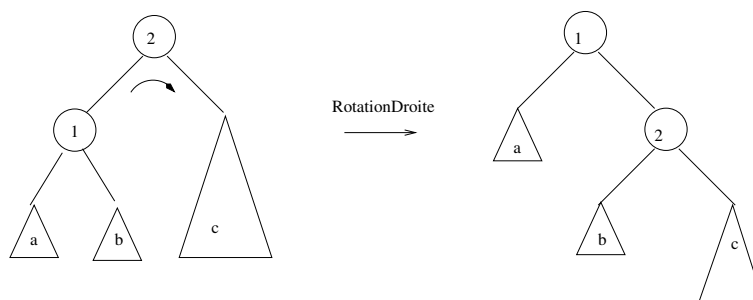


FIGURE 1 – Illustration de la transformation “rotation droite” sur un arbre

QUESTION 13 ► Écrire une fonction :

`ARBRE supprimerABR (ARBRE a, int val)`

qui prend en argument une valeur entière ainsi qu'un ABR et renvoie l'ABR `a` auquel on aura *supprimé* la valeur `val`, l'arbre en résultant doit toujours respectant les règles ABR bien sûr.

QUESTION 14 ► La transformation de *rotationDroite* est illustrée sur la figure 1, elle conserve le caractère ABR d'un arbre. Écrire une fonction

`ARBRE rotationDroite (ARBRE a)`

qui applique une rotation droite sur la racine de l'ABR `a` (si elle est possible). Ajoutez dans le main une utilisation de cette fonction.