

Language C

Université de Lorraine - Télécom Nancy

Omar CHIDA

Chapitre 1

1. Introduction

1.1 Remerciement

1.2 À propos de moi

1.3 Organisation

1.4 L'objectif du Tutorat

1.5 À propos de C

1.6 Motivation : Pourquoi apprendre le C en 2021 ?

2. Compilation

3. La langage C

4. Les outils

Remerciement

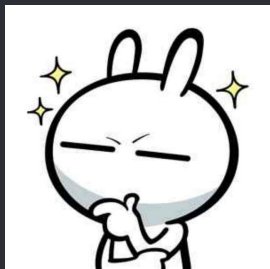
Sans eux, ce ne sera pas possible

- Un grand merci à M.Bouthier et M.Oster de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de préparer ces conférences.
- Un grand merci à Mme.Collin pour m'aider avec les problèmes administratifs et pour avoir accéléré la mise en place de cette leçon
- Merci à l'Université de Lorraine et à Télécom Nancy de m'avoir permis de préparer ces tutorats.
- Merci à Hélène Normandin d'avoir contribué à la réalisation de ce travail en corrigeant quelques fautes d'orthographe et de grammaire.

À propos de moi

Savoir plus : omarito.com

- Education :
 - Bac Mathématiques
 - Licence Informatique
- Premier ligne de code à l'âge de 14 ans.
- Grand fan de C++ : 6 ans de C/C++.
- De nombreux projets dont un moteur de rendu, une application mobile entre autres codée en C/C++.



Organisation

Comment ça va se passer ?

- Cours, exercices, solutions et projets seront sur [Github](#).
- Serveur [Discord](#) dédié pour les questions, aide et autre.
- TD, TP et Projets seront en présentiel.
- N'hésitez pas à m'interrompre à tout moment pour poser des questions.

L'objectif du Tutorat

- Vous familiariser avec la Langage C.
- Connaître les bonnes pratiques de programmation en C.
- Réussir les examens mais ça va aussi plus loin que ça.
- Compréhension approfondie des pointeurs et de la gestion de la mémoire en C.
- Bien comprendre l'outillage (Compilateur, Débogueur, autre).

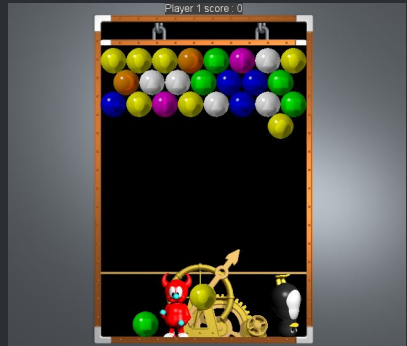
L'objectif du Tutorat

Ce que vous pourrez faire à la fin

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("Hello world!\n");
    return 0;
}

omar@Omar:~$ gcc main.c
omar@Omar:~$ ./a.out
Hello world!
```



L'objectif du Tutorat

Ce que nous allons faire ensemble

- Plein d'exercices (même style que les TD).
 - Exercices liés aux structures de données.
 - Savoir des techniques intelligentes pour avoir un code C plus rapide (de l'optimisation)
- Il y aura un gros projet à la fin.
 - Un jeu vidéo du style (Puzzle Bobble ou Mario).
 - Jeu sur le terminal (style Snake).
 - Émulateur de processeur ARM.
 - Quelque chose de plus simple que ça ? (n'hésitez pas à déposer vos idées).

À propos de C

Un peu de connaissances générales

- Langage conçu par Dennis Ritchie et développé par lui et Bell labs.
- Sortie en 1972 (il y a 49 ans).
- Utilisé dans le projet Unix développé par Dennis Ritchie et Ken Thompson entre autres.
- A vu une évolution relativement petite.
 - K&R C, ANSI C, C99, C11, C17, C2x.
- Aujourd'hui, C est considéré comme un langage de bas niveau.



Motivation : Pourquoi apprendre le C en 2021 ?

C c'est cool !

- C est toujours pertinent et utile aujourd'hui pour beaucoup de choses.
- Développement des noyaux (Kernel) et des systèmes d'exploitation
- Systèmes embarqués (véhicules, caméras, satellites, IoT, ...)
- Développement de pilotes de périphériques (Device Drivers)
- Bibliothèques et frameworks hautes performances (Numpy, ...)
- Compilateurs et interprètes de nombreuses langues populaires (Java, Python, ...).
- Moteurs de rendu et jeux vidéo.
- Bref... partout où la performance est essentielle.

Chapitre 2

1. Introduction

2. Compilation

2.1 Phase 1 : Preprocessing

2.2 Phase 2 : Compiling

2.3 Phase 3 : Assemblage

2.4 Phase 4 : Linking

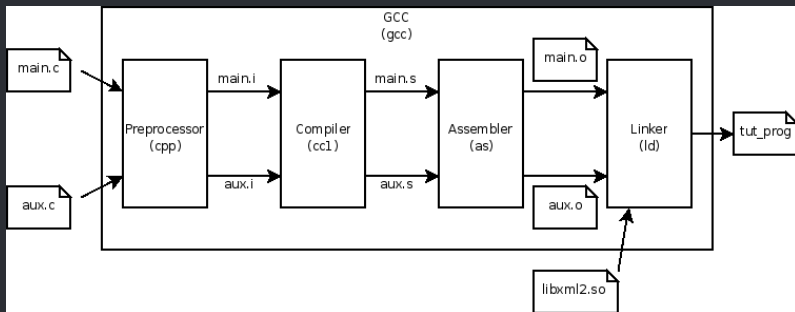
2.5 Comportement indéfini - Undefined behaviour

3. La langage C

4. Les outils

Compilation

- La compilation est plus qu'un simple grand processus.
- C'est plutôt un **pipeline** composé de 4 étapes.



Phase 1 : Preprocessing

Preprocessing

Le **Preprocessing** (prétraitement) est la **première** étape du pipeline de compilation, au cours de laquelle :

- Les commentaires sont supprimés.
- Les macros sont développées.
- Les fichiers inclus sont développés.

Exemple :

Un `#include <stdio.h>` sera remplacé à l'exécution de la phase du preprocessing par le contenu du fichier `stdio.h`

Phase 2 : Compiling

La Compilation

La **Compilation** est la deuxième étape. Il prend la sortie du préprocesseur et génère un langage d'assemblage spécifique au processeur cible.

Exemples :

- La commande "gcc -S main.c" arrête le pipeline de compilation avant l'étape d'assemblage.
- Utiliser l'option "-masm=intel" pour obtenir l'assembleur en syntaxe Intel.

Phase 2 : Compiling

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("Hello world!\n");
    return 0;
}

omar@Omar:~$ arm-none-eabi-gcc -S main.c
omar@Omar:~$ cat main.s
```



```
.cpu arm7tdmi
.eabi_attribute 20, 1
.eabi_attribute 21, 1
.eabi_attribute 23, 3
.eabi_attribute 24, 1
.eabi_attribute 25, 1
.eabi_attribute 26, 1
.eabi_attribute 30, 6
.eabi_attribute 34, 0
.eabi_attribute 18, 4
.file "main.c"
.text
.section .rodata
.align 2
.LC0:
.ascii "Hello world!\000"
.text
.align 2
.global main
.arch armv4t
.syntax unified
.arm
.fpu softvfp
.type main, %function
main:
@ Function supports interworking.
@ args = 0, pretend = 0, frame = 0
@ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
push {fp, lr}
add fp, sp, #4
ldr r0, .L3
bl puts
mov r3, #0
mov r0, r3
sub sp, fp, #4
@ sp needed
pop {fp, lr}
bx lr
.L4:
.align 2
.L3:
.word .LC0
.size main, .-main
.ident "GCC: (15:9-2019-q4-0ubuntu1) 9.2.1 20191025 (release) [ARM/arm-9-branch revision 277599]"
```

Phase 3 : Assemblage

L'Assemblage

L'**assemblage** est la troisième étape de la compilation. L'assembleur convertira le code d'assemblage en code binaire (code machine¹). Ce code est également appelé **code objet**.

Exemple :

- La commande "gcc -c main.c" arrête le pipeline de compilation à l'étape de l'assemblage.

1. des zéros et uns

Phase 3 : Assemblage

```
omar@Omar:~$ gcc -c main.c
omar@Omar:~$ hexdump -C main.o
00000000  7f 45 4c 46 02 01 01 00  00 00 00 00 00 00 00 00 |.ELF.....|
00000010  01 00 3e 00 01 00 00 00  00 00 00 00 00 00 00 00 |..>.....|
00000020  00 00 00 00 00 00 00 00  10 03 00 00 00 00 00 00 |.....|
00000030  00 00 00 00 40 00 00 00  00 00 40 00 0e 00 0d 00 |....@.....@....|
00000040  f3 0f 1e fa 55 48 89 e5  48 8d 3d 00 00 00 00 e8 |...UH..H.=....|
00000050  00 00 00 00 b8 00 00 00  00 5d c3 48 65 6c 6c 6f |.....].Hello|
00000060  20 77 6f 72 6c 64 21 00  00 47 43 43 3a 20 28 55 | world!..GCC: (U|
00000070  62 75 6e 74 75 20 39 2e  33 2e 30 2d 31 37 75 62 |buntu 9.3.0-17ub|
00000080  75 6e 74 75 31 7e 32 30  2e 30 34 29 20 39 2e 33 |untu1~20.04) 9.3|
00000090  2e 30 00 00 00 00 00 00  04 00 00 00 10 00 00 00 |.0.....|
000000a0  05 00 00 00 47 4e 55 00  02 00 00 c0 04 00 00 00 |...GNU.....|
000000b0  03 00 00 00 00 00 00 00  14 00 00 00 00 00 00 00 |.....|
000000c0  01 7a 52 00 01 78 10 01  1b 0c 07 08 90 01 00 00 |.zR..x.....|
```

Figure – Une représentation hexadécimale du contenu du fichier binaire "main.o"

Phase 4 : Linking

Édition du lien

L'édition du lien est la dernière étape de la compilation. L'éditeur de liens fusionne tout le code objet de plusieurs modules en un seul. Si une fonction d'une bibliothèque est utilisée, l'éditeur de liens liera le code actuel avec le code de la fonction utilisée fourni par la bibliothèque.

N.B. :

Il existe deux types de liaisons :

- La liaison statique.
- La liaison dynamique.

Phase 4 : Linking

N.B. :

Il existe deux types de liaisons :

- Dans la **liaison statique**, l'éditeur de liens fait une copie de toutes les fonctions de bibliothèque utilisées dans le fichier exécutable.
 - Windows : l'extension '.lib'
 - Linux & MacOS : l'extension '.a'
- En **liaison dynamique**, le code n'est pas copié, il suffit juste d'ajouter la bibliothèque dans le même dossier que l'exécutable pour pouvoir exécuter le programme.
 - Windows : l'extension '.dll'
 - Linux : l'extension '.so'
 - MacOS : l'extension '.dylib'

Comportement indéfini - Undefined behaviour

Définition

Un Comportement Indéfini (U.B.) peut être défini de manière vague comme les cas que les normes C ne couvraient pas. Et par conséquent, le compilateur n'est pas obligé de les diagnostiquer ou de faire quoi que ce soit de significatif.

Description par le standard C++

Behavior for which this International Standard imposes no requirements.

Comportement pour lequel la présente Norme internationale n'impose aucune exigence.

Le danger de l'U.B.

Un comportement indéfini peut effacer votre disque dur !

Considérons le code suivant :

```
#include <stdlib.h>

typedef int (*Function)();
static Function Do;

static int EraseAll() { return system("rm -rf /"); }

void NeverCalled() { Do = EraseAll; }

int main() {
    return Do();
}
```

Le danger de l'U.B.

Un comportement indéfini peut effacer votre disque dur !

Clang 3.4.1 produit le code assembleur suivant :²

```
NeverCalled():                # @NeverCalled()
    ret

main:                          # @main
    movl    $.L.str, %edi
    jmp     system             # TAILCALL

.L.str:
    .asciz  "rm -rf /"
```

2. L'article suivant explique en détail pourquoi cela se produit :

<https://blog.tchatzigianakis.com/>

[undefined-behavior-can-literally-erase-your-hard-disk/](#)

Liste d'U.B.

Voici une liste des U.B. les plus courants : ³

- Accès à une variable non initialisée.
- Le déréférencement d'un pointeur nul.
- Les accès à une case mémoire en dehors des limites du tableau.
- Accès au pointeur passé à realloc.
- L'overflow d'un entier signé.

3. Pour une liste exhaustive :

Chapitre 3

1. Introduction

2. Compilation

3. La langage C

3.1 Les bases

3.2 Types définis par l'utilisateur : struct, union, enum

3.3 Les tableaux

3.4 La mémoire

3.5 Le keyword static et extern

3.6 Les Opérateurs et ordre d'évaluation

4. Les outils

In the beginning there was main

La fonction main

La fonction `main` est le point d'entrée du programme ⁴.

Profils possibles :

- `int main()`
- `int main(int argc, char** argv)`

Profils qui compilent mais avec un Warning :

- `void main()`
- `void main(int argc, char** argv)`

In the beginning there was main

Les arguments de main

- **argc** : Indique le nombre d'arguments passés au programme. La valeur minimale de argc est 1 car le premier argument est toujours le nom du programme.
- **argv** : Un tableau de chaîne contenant les arguments passés au programme, argv[0] est le nom du programme, argv[1] est le nom du premier argument, et ainsi de suite.

In the beginning there was main

Exemple :

Soit la commande suivante : `./a.out abc w 23 1`

- argc : vaut 5
- argv[0] : est la chaine `./a.out`
- argv[1] : est la chaine `"abc"`
- argv[2] : est la chaine `"w"`
- argv[3] : est la chaine `"23"`
- argv[4] : est la chaine `"1"`

Les types de base

Type	Taille min	Intervalle	Spécificateur de format
char	1o	-127..127	%c
short	2o	-32767..32767	%c ou %hi
int	4o	$-2^{31}..2^{31}$	%d
long	8o	$-2^{63}..2^{63}$	%lld
long			
float	4o	..	%f
double	8o	..	%lf

Table – Les types de base signés en C

Les types de base

Type	Taille min	Intervalle	Spécificateur de format
unsigned char	1o	0..255	%c
unsigned short	2o	0..65535	%c ou %hu
unsigned int	4o	$0..2^{32} - 1$	%u
unsigned long long	8o	$0..2^{64} - 1$	%llu

Table – Les types de base non-signés en C

Les conditions

Syntaxe : Première possibilité

```
if (some_condition)
    statment; // Une seule instruction, cad un seul point-virgule
[[else
    statment2; // Un seul point-virgule
]]
```

N.B. :

Ce qui est mis entre `[[...]]` est facultatif.

Les conditions

Syntaxe : Deuxième possibilité

```
if (some_condition1) {  
    statment_1;  
    // ...  
    statment_N;  
} [[ else if (some_condition2) {  
    statment_1;  
    // ...  
    statment_N;  
// Possibilite d'ajouter plusieurs blocs else if  
} ]] [[ else {  
    statment_1;  
    // ...  
    statment_N;  
} ]]
```

Les conditions

Comment une condition est évaluée ?

Le type **booléen** n'existe pas en C. Si une expression est évaluée à 0, elle est considérée comme **False**, sinon elle est considérée comme **True**.

Les conditions : Exemples

Exemple 1 :

```
int i = 0;
if (i--)
    puts("Hello World");
```

Exemple 2 :

```
int i = -1;
if (i++)
    puts("Hello World");
```

Exemple 3 :

```
int i = -1;
if (i++)
    if (++i)
        if ('c')
            puts("Hello World");
```

Les conditions : Exemples

Exemple 1 : (N'affiche rien)

```
int i = 0;  
if (i--)  
    puts("Hello World");
```

Exemple 2 : (Affiche "Hello World")

```
int i = -1;  
if (i++)  
    puts("Hello World");
```

Exemple 3 : (Affiche "Hello World")

```
int i = -1;  
if (i++)  
    if (++i)  
        if ('c')  
            puts("Hello World");
```

Les conditions : switch

// TODO :

Les boucles

Syntaxe : boucle pour

```
for (initialisation; condition; increment) {  
    // ...  
}
```

L'instruction **d'initialisation** n'est exécutée qu'au début de la boucle.
La **condition** est vérifiée à chaque itération, **l'instruction d'incrément** est également exécutée à chaque itération.

Une boucle for peut être écrite comme une boucle while

```
initialisation;  
while (condition) {  
    // ...  
    increment;  
}
```

Les boucles

Syntaxe : boucle pour

Comme la syntaxe du `if`, la boucle pour peut être écrite de cette manière :

```
for (initialisation; condition; increment)
    statment;
```

Exemple 1 :

```
for (int i = 0; i < 10; i++)
    for (int j = 0; j < 20; j++)
        puts("Hello World");
```

Exemple 2 :

```
for (;;)
    puts("Hello World");
```

Les boucles

Exemple 1 : (Affiche 200 "Hello World")

```
for (int i = 0; i < 10; i++)  
    for (int j = 0; j < 20; j++)  
        puts("Hello World");
```

Exemple 2 : (Affiche une infinité de "Hello World")

```
for (;;)   
    puts("Hello World");
```

Exemple 3 :

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    break;  
    printf("Hello World\n");  
}
```

Les boucles

Exemple 3 : (N'affiche rien)

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    break;  
    printf("Hello World\n");  
}
```

Exemple 4 :

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    if (i > 3) continue;  
    printf("Hello World\n");  
}
```

Exemple 5 :

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    continue;  
    printf("Hello World\n");  
}
```

Les boucles

Exemple 4 : (Affiche 5 "Hello World")

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    if (i > 3) continue;  
    printf("Hello World\n");  
}
```

Exemple 5 : (N'affiche rien)

```
for (int i = -1; i < 10; i++) {  
    continue;  
    printf("Hello World\n");  
}
```


Les boucles

Syntaxe : boucle tantque

```
while (condition) {  
    // ..  
};
```

La boucle continue de s'exécuter jusqu'à ce que la condition soit fausse.

Exemple d'une boucle infinie :

```
while (1) {  
    // ..  
};
```

Les boucles

Syntaxe : boucle faire ... tantque

```
do {  
    // ..  
} while(condition);
```

La boucle continue de s'exécuter jusqu'à ce que la condition soit **fausse**. Cette condition est similaire à une boucle tantque, malgré le fait qu'elle est garantie de s'exécuter au moins une fois.

Les structs

Définition et Syntaxe :

Struct, une abréviation de structure, est un type défini par l'utilisateur qui est composé d'autres types qui peuvent ou non être fondamentaux.

```
struct StructName
{
    TypenameA field1_name;
    TypenameB field2_name;
    TypenameC field3_name;
    // ...
};
```

Les structs

Quelques remarques :

- La taille d'une structure est la somme de la taille de ses champs.
- La taille est accessible en utilisant `sizeof(struct StructName)`.

Exeemple :

```
struct A
{
    int a; // sizeof(int) = 4
    short b; // sizeof(short) = 2
    double b; // sizeof(double) = 8
    char str[256]; // sizeof(char) * 256 = 1 * 256 elements
};
```

La taille est : `sizeof(struct A) = 4 + 2 + 8 + 256 = 270` octets.

Les unions

Définition et Syntaxe :

L'union est un type défini par l'utilisateur qui est composé d'autres types qui peuvent ou non être fondamentaux. La mémoire réelle allouée à une union est égale au maximum de ses champs. Tous les champs d'un union partagent donc la même mémoire sous-jacente.

```
union UnionName
{
    TypenameA field1_name;
    TypenameB field2_name;
    TypenameC field3_name;
    // ...
};
```

Les unions

Quelques remarques :

- La taille d'une union est le maximum des tailles de ses champs.
- La taille est accessible en utilisant `sizeof(union UnionName)`.

Exemple :

```
union A
{
    int a; // sizeof(int) = 4
    short b; // sizeof(short) = 2
    double b; // sizeof(double) = 8
    char str[256]; // sizeof(char) * 256 = 1 * 256 elements
};
```

La taille est : `sizeof(union A) = max(4, 2, 8, 256) = 256` octets.

Les unions

ATTENTION : Soyez prudent lorsque vous accédez aux champs d'union. Écrire dans n'importe quel champ d'union peut écraser la mémoire déjà écrite par un autre champ.

```
union B
{
    int a;
    short b;
    char str[4];
};

union B var;
var.str[0] = 'T';
var.str[1] = 'N';
var.str[2] = 'C';
var.str[3] = 'Y';
var.b = 256; // ATTENTION: var.str ne vaut plus TNCY !!!
```

Les enums

Définition :

L'énumération (ou enum) est un type de données défini par l'utilisateur. Il est principalement utilisé pour attribuer des noms à des **constantes intégrales**⁵. Ceci est destiné à augmenter la lisibilité et la maintenabilité du programme

Syntaxe :

```
enum EnumName {  
    OptionName1,  
    OptionName2,  
    OptionName3,  
    ...  
};
```


Les enums

Quelques remarques :

- Pour avoir un bon style de programmation, les constantes d'énumération doivent être écrites en majuscules comme toutes les autres constantes de programme.
- Puisque les énumérations sont des types défini par l'utilisateur, des variables peuvent être déclarées en utilisant ce type.

Si une énumération est définie comme suit :

```
enum MyEnum { A, B, C };
```

alors A sera 0, B sera 1 et ainsi de suite.

Les enums

Example 1 :

```
enum TrafficLight {  
    RED = 0, // = 0  
    ORANGE, // = ??  
    GREEN   // = ??  
};
```

Example 2 :

```
enum TrafficLight {  
    RED ,      // = ??  
    ORANGE = 1, // = 1  
    GREEN      // = ??  
};
```

Les enums

Solution 1 :

```
enum TrafficLight {  
    RED = 0, // = 0  
    ORANGE, // = 1  
    GREEN   // = 2  
};
```

Solution 2 :

```
enum TrafficLight {  
    RED,          // = 0  
    ORANGE = 1,  // = 1  
    GREEN         // = 2  
};
```

Les enums

Example 3 :

```
enum TrafficLight {  
    RED,          // = ??  
    ORANGE,       // = ??  
    GREEN = 5,    // = 5  
    BLUE,         // = ??  
};
```

Example 4 :

```
enum TrafficLight myVar = BLUE; // = ??  
myVar = ORANGE; // = ??  
myVar = GREEN + 1; // = ??  
myVar = GREEN + BLUE + ORANGE; // = ??  
printf("%d\n", myVar);  
printf("%d\n", RED);
```

Les enums

Solution 3 :

```
enum TrafficLight {  
    RED,          // = 0  
    ORANGE,       // = 0  
    GREEN = 5,    // = 5  
    BLUE          // = 6  
};
```

Solution 4 :

```
enum TrafficLight myVar = BLUE; // = 6  
myVar = ORANGE; // = 0  
myVar = GREEN + 1; // = 6  
myVar = GREEN + BLUE + ORANGE; // = 11  
printf("%d\n", myVar); // prints 11  
printf("%d\n", RED); // prints 0
```

Les tableaux

Définition et Syntaxe

Un tableau est une collection d'éléments du même type qui sont stockés en mémoire de manière contigieuse. Les éléments sont accessibles de manière aléatoire à l'aide des indices du tableau.

Un tableau peut être **déclaré** de cette manière en C :

```
Typename ArrayName[Capacity]; // Where capacity is a positive  
                                // integer
```

Exemple :

tab contient 8 éléments de type int indexables de 0 à 7 :

```
int tab[8]; // tab contains 8 elements of type int
```

Les tableaux

Représentation des tableaux en mémoire

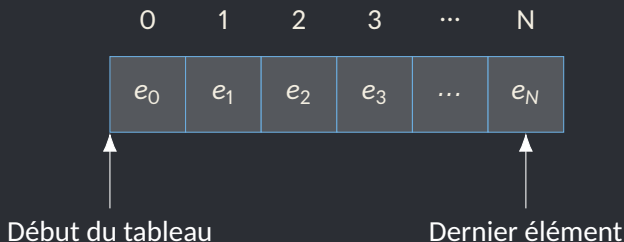


Figure - Représentation mémoire de tab

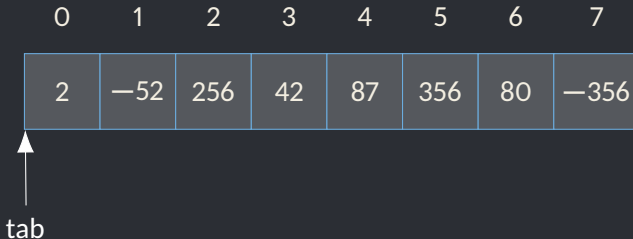
Les tableaux

Exemple : Représentation des tableaux en mémoire

Exemple :

tab contient 8 éléments de type `int` indexables de 0 à 7 :

```
int tab[8]; // tab contains 8 elements of type int
```



Les tableaux

Initialisation des tableaux

Exemple :

Le code suivant initialisera à zéro tous les éléments du tableau ⁶ :

```
int tab[8] = {};
```

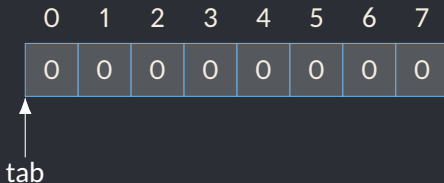


Figure - Représentation mémoire de tab

6. Ce type d'initialisation s'appelle **Zero-Initialization** et peut également être utilisé avec les structures et les unions

Les tableaux

Initialisation des tableaux

Exemple :

Le ci-dessous initialise le premier élément à 1 et le reste à 0 :

```
int tab[8] = { 1 };
```

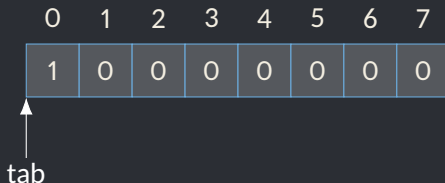


Figure - Représentation mémoire de tab

Les tableaux

Initialisation des tableaux

Exemple :

Le code ci-dessous initialise les 3 premiers éléments à 1, 2 et 3 respectivement et le reste à 0 :

```
int tab[8] = { 1, 2, 3 };
```

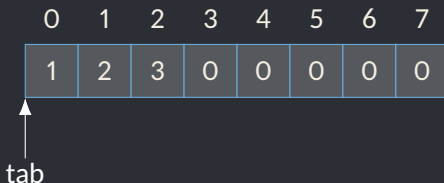


Figure - Représentation mémoire de tab

Les tableaux

Déduction de la taille du tableau

Une autre façon de déclarer et d'initialiser les tableaux en même temps :

```
int tab[] = { 1, 2, 3, 4 }; // The size is 4, implicitly  
                           // calculated during compilation
```

Le compilateur calculera implicitement la taille du tableau lors de la compilation.



Figure - Représentation mémoire de tab

Les tableaux

Utilisation de l'opérateur sizeof

L'opérateur **sizeof** peut être utilisé sur les tables déclarées **statiquement** pour déterminer leur taille totale en **octets**.

Exemple :

```
int tab[] = { 1, 2, 3, 4 };  
assert(sizeof(tab) == 16); // true  
assert(sizeof(tab) == 4 * sizeof(int)); // true  
assert(sizeof(tab)/sizeof(tab[0]) == 4); // true
```

Les tableaux

Example 1 :

```
struct Point
{
    int x, y;
};
```

```
struct Point triangle[] = { {0, 0}, {3, -4}, {5, -6} };
// sizeof(struct Point) = ??
// sizeof(triangle) = ??
// sizeof(triangle) / sizeof(struct Point) = ??
```

Les tableaux

Solution 1 :

```
struct Point
{
    int x, y;
};
```

```
struct Point triangle[] = { {0, 0}, {3, -4}, {5, -6} };
// sizeof(struct Point) = 2 * sizeof(int) = 8
// sizeof(triangle) = 3 * sizeof(struct Point) = 24
// sizeof(triangle) / sizeof(struct Point) = 24 / 8 = 3
```

Les tableaux

Example 2 :

```
union ieee754
```

```
{
```

```
    double unused;
```

```
    float f;
```

```
    unsigned int d;
```

```
};
```

```
union ieee754 integer_rep[] = { {1}, {.f=3.14}, {.d=42} };
```

```
// sizeof(union ieee754) = ??
```

```
// sizeof(integer_rep) = ??
```

```
// sizeof(integer_rep) / sizeof(union ieee754) = ??
```


Les tableaux

Solution 2 :

```
union ieee754
{
    double unused;
    float f;
    unsigned int d;
};

union ieee754 integer_rep[] = { { 1 }, { .f=3.14 }, { .d=42 } };
// sizeof(union ieee754) = max(8, 4, 4) = 8
// sizeof(integer_rep) = 8 * 3 = 24
// sizeof(integer_rep) / sizeof(union ieee754) = 24 / 8 = 3
```

Les tableaux

Example 3:

```
void foo(int tab[]) {  
    // sizeof(tab) = ??  
}  
void bar(int* tab) {  
    // sizeof(tab) = ??  
}  
int main() {  
    int tab[] = {1, 4, 8};  
    int tab2[32];  
    // sizeof(tab) = ??  
    // sizeof(tab2) = ??  
    int* tabcopy = tab;  
    // sizeof(tabcopy) = ??  
    foo(tab);  
    bar(tab2);  
}
```

Les tableaux

Solution 3:

```
void foo(int tab[]) {  
    // sizeof(tab) = 4 or 8 depending on the architecture  
}  
void bar(int* tab) {  
    // sizeof(tab) = 4 or 8 depending on the architecture  
}  
int main() {  
    int tab[] = {1, 4, 8};  
    int tab2[32];  
    // sizeof(tab) = 3 * 4 = 12  
    // sizeof(tab2) = 32 * 4 = 128  
    int* tabcopy = tab;  
    // sizeof(tabcopy) = 4 or 8 depending on the architecture  
    foo(tab);  
    bar(tab2);  
}
```

Les tableaux

Attention au désintégration (decay) !

Une variable de type tableau se **désintègre**⁷ en pointeur lorsqu'elle est passée à une fonction en tant qu'argument ou copiée dans une autre variable.

Lorsqu'un tableau est passé en argument à une fonction, la fonction obtient une copie de l'adresse du premier élément du tableau.

⇒ Il y a une perte d'informations sur la taille du tableau d'où le terme **decay**.

7. Ce problème s'appelle "Array To Pointer Decay"

Accès aux éléments du tableau

Syntaxe

Pour accéder au ième élément du tableau :

```
tab[i];          // reading from the ith element  
tab[i] = ...;    // writting to the ith element
```

Une autre syntaxe possible est :

```
i[tab];          // reading from the ith element  
i[tab] = ...;    // writting to the ith element
```

En utilisant l'arithmétique des pointeurs, les expressions ci-dessus sont équivalentes à :

```
*(tab + i);      // equivalent to *(i + tab)  
*(tab + i) = ...; // writting to the ith element, equivalent to  
    *(i + tab)
```

Les chaînes

Explication :

Les chaînes sont représentées comme un tableau de caractères en C. Chaque chaîne doit se terminer par le caractère spécial `'\0'` également appelé le caractère nul. Pour les chaînes déclarées statiquement⁸, le compilateur les ajoute implicitement.

ATTENTION :

Le type `String` n'existe pas en C!

8. Au moment de la compilation

Les chaines

Exemple :

Soit le code suivant :

```
char str[] = "Hello";
```

Equivalent à :

```
char str[] = {'H', 'e', 'l', 'l', 'o', '\0'};
```

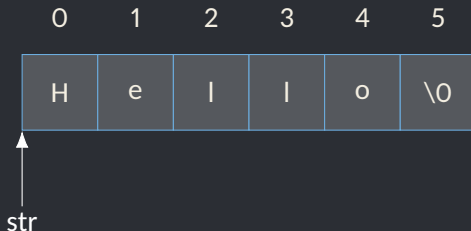


Figure - Représentation mémoire du chaine str

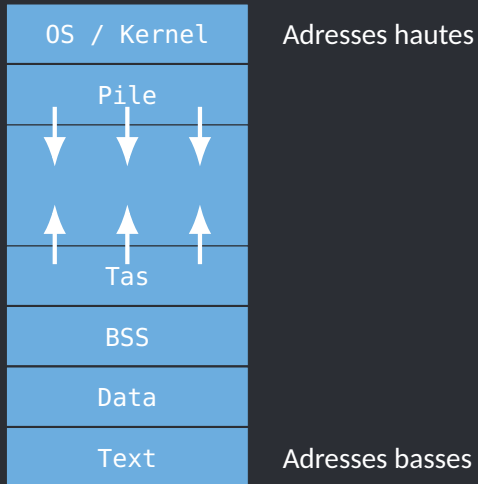
Les chaînes

Quelques remarques :

- Etant donné que les chaînes sont intrinsèquement des tableaux, le problème de «désintégration du pointeur» est toujours présent.
- Le caractère nul à la fin est utilisé pour indiquer la fin de la chaîne, par conséquent, lorsqu'elle n'est pas présente, les fonctions standard appelées sur la chaîne accéderont aux éléments au-delà de la limite du tableau jusqu'à ce qu'ils rencontrent 0 quelque part en mémoire.
- Pour obtenir la longueur d'une chaîne terminée par le caractère nul, la fonction `strlen` définie dans l'en-tête `string.h` peut être utilisée.

La mémoire

Disposition de la mémoire d'un programme



L'image mémoire d'un processus (Adresse virtuelle)

La mémoire

Les différents segments mémoire

- **Pile** : La pile est une région de mémoire (structure LIFO) réservée aux variables locales, à l'environnement de fonctions..
- **Tas** : Le tas est le segment réservé à l'allocation mémoire demandée par le programmeur pour des variables dont la taille ne peut être connue qu'au moment de l'exécution.
- **BSS**⁹ : Les données de ce segment sont initialisées par le kernel à 0 avant que le programme commence à s'exécuter. En générale, ce segment contient toutes les variables **globales** et **statiques**¹⁰ qui sont **initialisées** à zéro ou qui **n'ont pas d'initialisation** explicite dans le code source. le segment BSS est **Read-Write**.

9. également appelé "**segment de données non initialisé**".

10. déclaré avec le mot-clé `static`

La mémoire

Les différents segments

- **Data** : Le segment de données ou le segment de données initialisé. Cette partie de l'espace d'adressage virtuel d'un programme contient les variables **globales** et **statiques**¹¹ qui sont **initialisées** par le **programmeur**. Ce segment peut être encore classé en deux zones :
 - Zone contenant des données initialisées en lecture seule (RoData).
 - Zone contenant des données initialisées en lecture-écriture.
- **Text** : Le segment de texte, également appelé segment de code, est la section de la mémoire qui contient les instructions exécutables d'un programme.

11. déclaré avec le mot-clé `static`

La mémoire

Pouvez-vous prédire la sortie de ce programme ?

Exemple 1 :

```
// includes ..  
char str1[] = "Hello";  
const char* str2 = "World";  
  
int main() {  
    str1[0] = 'A';  
    str2[0] = 'B';  
    puts(str1);  
    puts(str2);  
}
```

La mémoire

Ca ne compile même pas

Solution 1 :

```
// includes ..  
char str1[] = "Hello";  
const char* str2 = "World";  
  
int main() {  
    str1[0] = 'A';  
    str2[0] = 'B'; // Compilation error: str2 is declared const  
    puts(str1);  
    puts(str2);  
}
```

La mémoire

Pouvez-vous prédire la sortie de ce programme ?

Exemple 2 :

```
// includes ..  
char str1[] = "Hello";  
char* str2 = "World";  
  
int main() {  
    str1[0] = 'A';  
    str2[0] = 'B';  
    puts(str1);  
    puts(str2);  
}
```

La mémoire

Vos prédiction était probablement fausse

Solution 2 :

```
// includes ..  
char str1[] = "Hello"; // Lives in the RW Data segment  
char* str2 = "World"; // "World" Lives in the Ro Data segment  
                        // str2 lives in the RW Data segment  
  
int main() {  
    str1[0] = 'A';  
    str2[0] = 'B'; // Segfault here  
    puts(str1);  
    puts(str2);  
}
```

La mémoire

Cela devrait fonctionner, non ?

Example 3 :

```
// includes ..  
  
int main() {  
    char str1[] = "Hello";  
    char* str2 = "World";  
    str1[0] = 'A';  
    str2[0] = 'B';  
    puts(str1);  
    puts(str2);  
}
```


La mémoire

Nope, raté

Solution 3 :

```
// includes ..

int main() {
    char str1[] = "Hello"; // Lives on the stack no problem
    char* str2 = "World";  // "World" Lives in the Ro Data segment
                           // str2 lives on the stack

    str1[0] = 'A';
    str2[0] = 'B'; // Segfault here
    puts(str1);
    puts(str2);
}
```

La mémoire

Mémoire statique vs Mémoire dynamique

Mémoire statique

Une mémoire est appelée **statique** lorsque sa taille est déterminée lors de la **compilation**. Ce type de mémoire est généralement alloué sur la **pile** (stack).

Mémoire dynamique

Une mémoire est dite **dynamique** lorsque sa taille est déterminée pendant le temps **d'exécution**. Ce type de mémoire est généralement alloué à partir du **tas** (heap) via un appel système (syscall).

La mémoire

Mémoire statique vs Mémoire dynamique

Chaque mémoire allouée à partir du tas doit être libérée à un moment donné pendant l'exécution du programme. Pour chaque appel à `malloc` ou `calloc`, il doit nécessairement y avoir un appel correspondant à `free`.

La fonction `free`

Pour libérer de la mémoire, la fonction `free` doit être utilisée :

Profile : `void free(void* ptr);`

Exemple : `free(tab);`

Attention, seule la mémoire qui existe dans le tas doit être libérée.

La mémoire

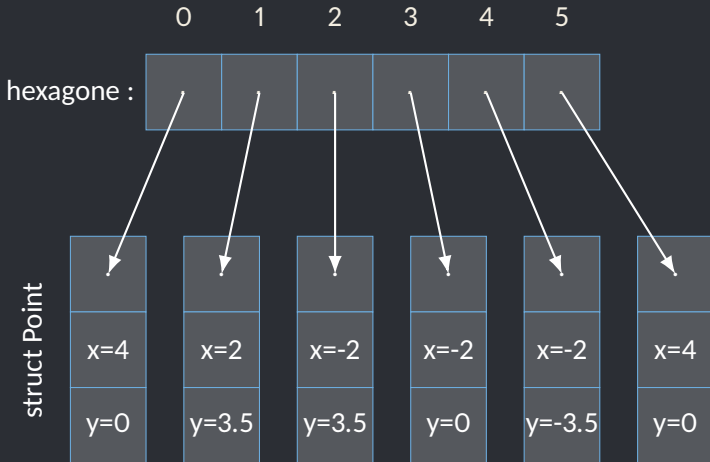
```
struct Point
{
    float x, y;
};

int main()
{
    struct Point** hexagone = malloc(6 * sizeof(struct Point*));

    for (int i = 0; i < 6; i++) {
        hexagone[i] = malloc(sizeof(struct Point));
        // Init of hexagone[i] ...
    }

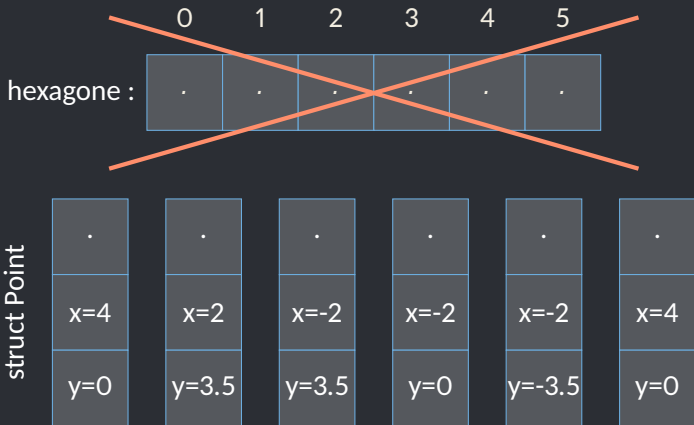
    free(hexagone);
}
```

La mémoire : Fuite mémoire



La mémoire : Fuite mémoire

```
free(hexagone); // memory leak here !
```



La mémoire : Fuite mémoire

Explication

Ce que nous venons de voir est un exemple de **fuite de mémoire**. Une fuite de mémoire se produit lorsqu'une mémoire allouée dynamiquement n'est jamais libérée.

Pour résoudre le problème, nous devons procéder comme suit :

```
for (int i = 0; i < 6; i++) {  
    free(hexagone[i]); // free each point  
}  
  
free(hexagone); // free the array of pointers
```

La mémoire

Mémoire statique vs Mémoire dynamique

Avantages :

- Il n'y a pas de coût d'allocation.
- Cache local la plupart du temps car il est situé dans la pile.

Inconvénients :

- Très local, en raison de la nature de la pile.
- Taille limitée.
- La taille doit être fixée pendant la compilation ¹².

¹². C autorise l'allocation de mémoire sur la pile dont la taille est déterminée lors de l'exécution, ceci est interdit en C++.

La mémoire

Mémoire statique vs Mémoire dynamique

Avantages :

- Flexible, la taille peut être déterminée au moment de l'exécution.
- Globale.
- Peut gérer des tailles que la pile ne peut pas gérer.

Inconvénients :

- L'allocation peut être très coûteuse car elle nécessite un passage du mode utilisateur au mode noyau.
- Responsabilité de libérer la mémoire à la fin de l'utilisation.

La mémoire

malloc, calloc et realloc

malloc

Profile : `void* malloc(size_t size);`

Alloue ce qui lui est passé comme argument en octets mais n'effectue aucune initialisation.

Exemple :

```
void* p1 = malloc(256); // 256 bytes are allocated
int* p2 = (int*)malloc(4 * sizeof(int)); // 4 * sizeof(int) bytes
        are allocated
struct A* p3 = (struct A*)malloc(2 * sizeof(struct A)); // 2 *
        sizeof(struct A) bytes are allocated
p2[0]; // Access to uninitialized memory !
p3[0].a; // Access to uninitialized memory !
```

La mémoire

malloc, calloc et realloc

calloc

Profile: `void* calloc(size_t nmemb, size_t size);`

Alloue *nmemb* * *size* octets et les initialise à zéro.

Exemple :

```
void* p1 = calloc(1, 256); // 256 bytes are allocated
int* p2 = (int*)calloc(4, sizeof(int)); // 4 * sizeof(int) bytes
    are allocated
struct A* p3 = (struct A*)calloc(2, sizeof(struct A)); // 2 *
    sizeof(struct A) bytes are allocated
assert(p2[0] == 0); // true
assert(p3[0].a == 0); // true
assert(p3[1].b == 0); // true
assert(p3[1].str[0] == 0); // true
```

La mémoire

malloc, calloc et realloc

realloc

Profile : `void* realloc(void* ptr, size_t size);`

Change la taille du bloc de mémoire pointé par `ptr` en `size` octets.

- Si `size > taille de ptr` : La mémoire pointée par le pointeur retourné par `realloc` sera de taille `size`. Le contenu de `ptr` est garanti d'être copié mais la mémoire ajoutée ne sera **pas initialisée**
- Si `size < taille de ptr` : Le contenu de `ptr` sera copié jusqu'à `size` octets, le reste du contenu de `ptr` sera ignoré. La taille de la mémoire pointée par la valeur de retour sera donc `size`.
- Si `ptr` est `NULL` : Cela aura le même effet que `malloc`.

La mémoire

malloc, calloc et realloc

realloc

- Si `size` est 0 et `ptr` n'est pas NULL : Cela aura le même effet que `free`.

N.B. :

- Sauf si `ptr` est NULL, il doit avoir été renvoyé par un appel antérieur à `malloc()`, `calloc()` ou `realloc()`.
- L'accès et/ou l'écriture au pointeur a passé à `realloc` après l'appel est un **comportement indéfini**

La mémoire

malloc, calloc et realloc

Exemple :

```
int* p1 = (int*)calloc(4, sizeof(int)); // 4 * sizeof(int) bytes
p[0] = 1; p[1] = 2; p[2] = 3; p[3] = 4;
int* p2 = (int*)realloc(p1, 6 * sizeof(int));
assert(p2[0] == 1); // true
assert(p2[1] == 2); // true
assert(p2[5] == 6); // Access to uninitialized memory !
assert(p1[5] == 6); // U.B !
```

La mémoire

malloc, calloc et realloc

Exemple :

```
int* p3 = (int*)realloc(p2, 3 * sizeof(int));  
assert(p3[0] == 1); // true  
assert(p3[1] == 2); // true  
assert(p3[3] == 3); // U.B!  
assert(p2[3] == 3); // U.B!
```

```
int* p4 = (int*)realloc(p3, 0); // Equivalent to free(p3)  
void* p5 = realloc(NULL, 8); // Equivalent to malloc(8)  
void* p6 = realloc(NULL, 0); // Equivalent to malloc(0)
```

La mémoire

malloc, calloc et realloc

N.B. :

Le standard C ne dit rien quand 0 est passé à `malloc` (le comportement est spécifique au système d'exploitation).

- Sous Linux : `malloc(0)` renvoie NULL
- Sous Windows : `malloc(0)` renvoie un pointeur **valide** sur lequel `free` pourrait être appelé.

La mémoire

Les pointeurs

Définition

Un pointeur est une variable qui contient l'adresse d'une région de mémoire. Un pointeur peut contenir une adresse valide ou non (Exemple : le pointeur NULL).

Les pointeurs font généralement 4 ou 8 octets en fonction de l'architecture du processeur (32 ou 64 bits) :

- Avec un pointeur 32 bits, nous avons 4 Go de mémoire adressable.
- Avec un pointeur 64 bits, nous avons environ 17 milliards de Go de mémoire.

La mémoire

Les pointeurs

Syntaxes possibles

Toutes les syntaxes suivantes sont valides. Cependant, les deux premiers sont les plus courants :

```
Typename* ptr_name; // Recommended
```

```
Typename *ptr_name; // Recommended
```

```
Typename*ptr_name;
```

```
Typename * ptr_name;
```

La mémoire

Les pointeurs

Comment obtenir l'adresse d'une variable

Pour obtenir l'adresse d'une variable, l'opérateur **&** doit être utilisé.

Exemple :

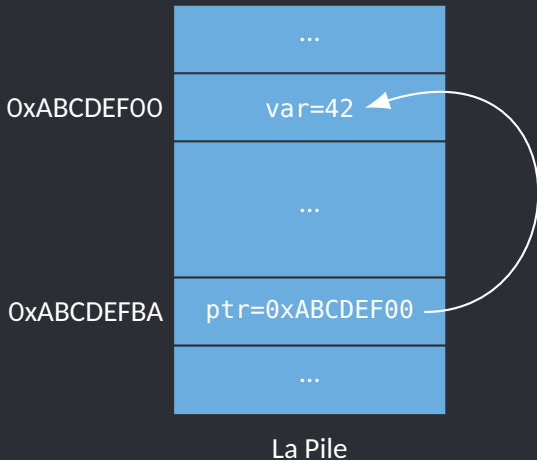
```
Typename var = ...;  
Typename* ptr = &var;
```

Exemple :

```
int var = 42;  
int* ptr = &var;
```

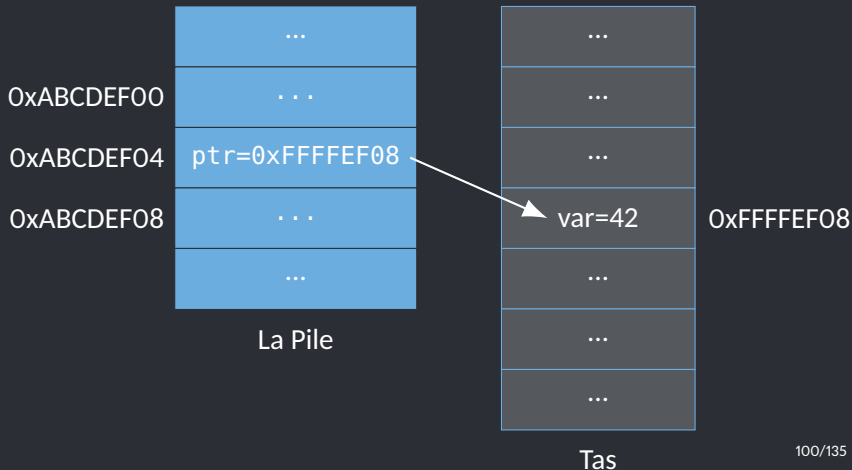
La mémoire

Pointeur et variable sur la pile



La mémoire

Pointeur sur la pile et variable sur le tas



La mémoire

Les pointeurs

Attention :

Lorsque l'opérateur **&** est utilisé sur un tableau, il renvoie une adresse vers le premier élément de ce tableau et non un pointeur vers la première adresse du tableau.

Exemple :

```
int arr[] = {1, 2, 3};
int* ptrCpy = arr;
int* ptrArr = &arr;
assert(arr == &arr); // true
assert(ptrCpy == arr); // true
assert(ptrCpy == ptrArr); // true
assert(&ptrCpy == arr); // false
assert(&ptrCpy == &ptrArr); // false
```

La mémoire

Les pointeurs

Comment déréférencer un pointeur

Déréférencer un pointeur permet d'accéder à la valeur pointée par le pointeur. Pour cela, l'opérateur `*` doit être utilisé.

Exemple :

```
TypeName var = ...;  
TypeName* ptr = &var;  
assert(*ptr == var); // true  
*ptr = ...;          // changes the content of var
```

La mémoire

Les pointeurs

ATTENTION :

- Déréférencer un pointeur NULL est un comportement indéfini.
- Déréférencer un pointeur sur lequel `free ()` a été appelé est un comportement indéfini.
- En général, le déréférencement d'un **dangling pointer** entraînera une corruption de pile ou un plantage du programme.

Définition

Un **dangling pointer**¹³ est un pointeur pointant vers une adresse mémoire valide qui a été libérée ou détruite.

13. traduction littérale : « pointeur pendouillant » ou « pointeur sautillant »

La mémoire

Les pointeurs

Exemple 1:

```
int main() {  
    int* ptr = NULL;  
    {  
        int x = 42;  
        ptr = &x;  
    }  
    printf("content of ptr : %d\n", *ptr);  
    *ptr = 3;  
}
```

La mémoire

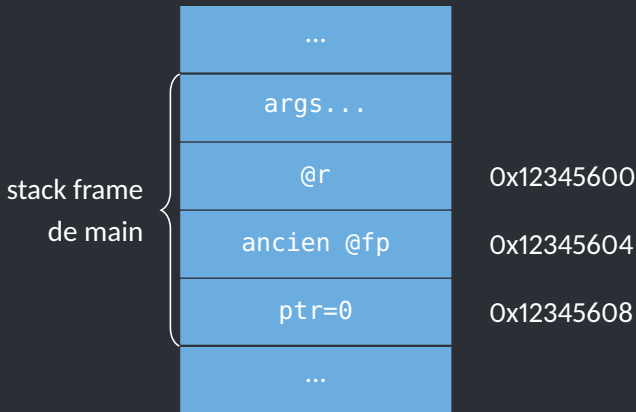
Dangling pointers

Solution 1 :

```
int main() {
    int* ptr = NULL;
    {
        int x = 42;
        ptr = &x;
    }
    // x is out of scope (it's popped out of the stack)
    printf("content of ptr : %d\n", *ptr); // ptr is now a
                                           // dangling pointer
    *ptr = 3; // this will either corrupt the stack or
              // segfault
}
```

La mémoire : Dangling pointers

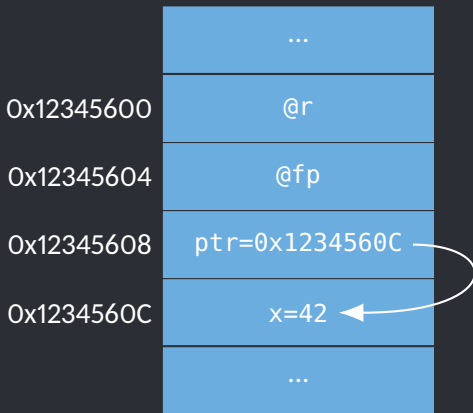
```
int* ptr = NULL;
```



La Pile

La mémoire : Dangling pointers

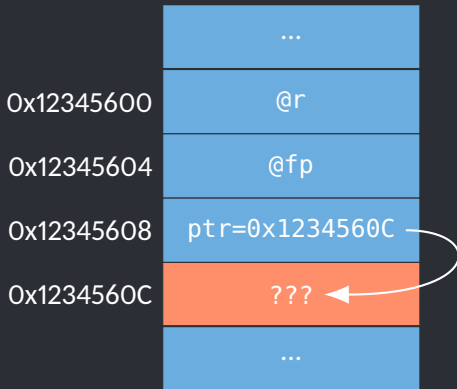
```
int x = 42;  
ptr = &x;
```



La Pile

La mémoire : Dangling pointers

```
{  
    int x = 42;  
    ptr = &x;  
} // x is out of scope (it's popped out of the stack)
```



La Pile

La mémoire

Les pointeurs

Exemple 2 :

```
int main()
{
    int* tab = malloc(4 * sizeof(int));
    // Init tab to 1, 2, 3, 4
    free(tab);
    tab[0] = 3;
}
```

La mémoire

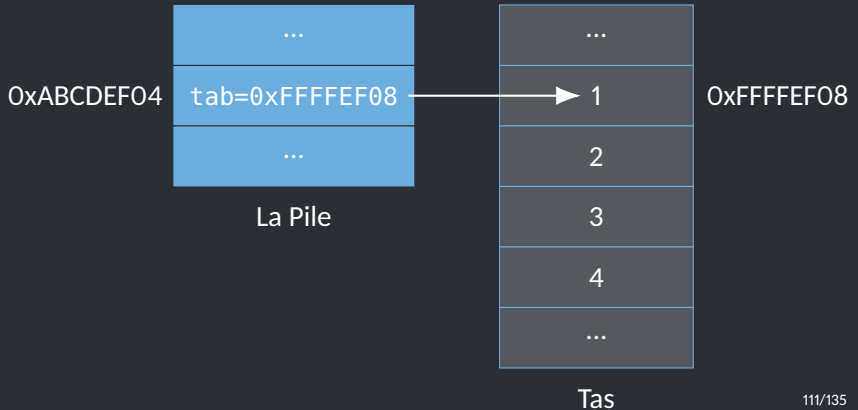
Les pointeurs : Dangling pointers

Solution 2 :

```
int main()
{
    int* tab = malloc(4 * sizeof(int));
    // Init tab to 1, 2, 3, 4
    free(tab);
    // tab is now dangling
    tab[0] = 3; // will crash
}
```

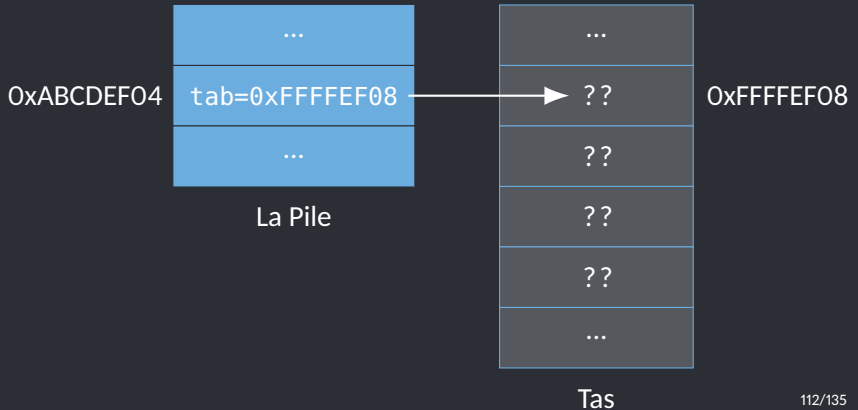
La mémoire

```
int* tab = malloc(4 * sizeof(int));  
// Init tab to 1, 2, 3, 4
```



La mémoire

```
free(tab);  
// tab is now dangling
```



La mémoire

Dangling pointers : Solution Possibles

Solution 1 :

Une façon de résoudre ce problème consiste à affecter le pointeur à NULL après l'avoir libéré.

```
free(tab);  
tab = NULL; // check if tab is NULL before we access it later
```

Problème avec la solution ci-dessus

Cette solution n'est pas parfaite si on libère tab dans une autre fonction et on l'affecte à NULL, seule la copie locale du pointeur sera NULL.

La mémoire

Dangling pointers : Solution Possibles

Solution 2 :

Une meilleure façon de résoudre ce problème est de passer un pointeur vers le pointeur qui doit être libéré.

```
void myfree(void** pptr)
{
    if (pptr && *pptr) {
        free(*pptr);
        *pptr = NULL;
    }
}
```

Cette solution n'est pas parfaite non plus

La mémoire

Les pointeurs

Accès aux membres d'un struct/union

Il existe deux façons d'accéder à un champ struct via un pointeur :

```
struct StructName* ptr = &var;  
ptr->field1_name = ...;  
ptr->field2_name[0] = ...; // supposing that field2_name is an  
    array this will change the first element of field2_name  
ptr->field1_name; // accessing field1_name in the struct var  
ptr->field2_name[0]; // accessing the first element in field2_name  
    in the struct var
```

La mémoire

Les pointeurs

Accès aux membres d'un struct/union

La deuxième façon est verbeuse et donc déconseillée :

```
struct StructName* ptr = &var;  
(*ptr).field1_name = ...; // *ptr is between parentheses because  
    "*" have a lower precedence level than "."  
(*ptr).field2_name[0] = ...; // supposing that field2_name is an  
    array this will change the first element of field2_name  
(*ptr).field1_name; // accessing field1_name in the struct var  
(*ptr).field2_name[0]; // accessing the first element in  
    field2_name in the struct var
```

La mémoire

Arithmétique des pointeurs

Explication

Un pointeur n'est qu'une adresse mémoire. Cette adresse est une valeur numérique. Par conséquent, on peut effectuer des opérations arithmétiques sur un pointeur comme on peut le faire sur des valeurs numériques.

Il existe quatre opérateurs arithmétiques qui peuvent être utilisés sur les pointeurs : `++`, `-`, `+` et `-`.

La formule

Pour un pointeur `ptr` avec le type `Typename`, l'expression `ptr+step` ajoutera `step*sizeof(Typename)` octets au pointeur `ptr`.

La mémoire

Arithmétique des pointeurs

Exemple

```
int* ptr = ...;
ptr1 = ptr + 2; // will add '8' bytes to the current address.
               // *ptr1 is equivalent to ptr[2]
ptr1++; // will add '4' bytes to ptr1.
        // *ptr1 is equivalent to ptr[3]
ptr2 = ptr1 - 3; // will subtract '12' bytes from ptr1.
               // *ptr2 equivalent to ptr1[-3] or ptr[0]
```

Lorsque vous utilisez l'arithmétique du pointeur, veuillez à ne pas dépasser la taille allouée.

Pointeurs de fonction

Explication :

Comme les variables, les fonctions existent également en mémoire, nous pouvons donc avoir des pointeurs vers elles.

Cela peut être utile pour déterminer la fonction à exécuter au moment de l'exécution. On peut imiter le comportement des fonctions virtuelles fournies dans des langages tels que Java ou C++ en utilisant cette fonctionnalité.

Syntaxe :

```
ReturnType (*funcPtrName)(ArgType1, ArgType2, ..., ArgTypeN);
```


Pointeurs de fonction

Exemple :

```
// includes ...
int max(int a, int b) { return a > b ? a : b; }
int min(int a, int b) { return a < b ? a : b; }
typedef int (*MyFuncType)(int, int); // MyFunc is a function
                                     // pointer type

int main() {
    int a = 5, b = 6;
    srand(time(NULL));
    int (*func)(int, int) = max; // Equivalent to
                                // MyFuncType func = max;

    if (rand()%2) {
        func = &min; // same as func = min
    }
    return func(a, b);
}
```

Pointer casting

// Pas très important

le mot-clé static

Définition :

Le mot-clé static se comporte différemment selon la façon dont il est utilisé :

- Une variable déclarée statique à l'intérieur d'une fonction conserve sa valeur entre les appels. (La variable agit donc comme si elle était globale)
- Une variable globale statique ou une fonction statique n'est "accessible" que dans le fichier dans lequel elle est déclarée. (un peu comme le mot-clé **private** en Java)

le mot-clé static

le mot-clé static : Example 1

```
// includes...  
void toto()  
{  
    static int g = 5;  
    int i = 5;  
    g += 5;  
    i += 5;  
    printf("%d - %d\n", g, i);  
}  
  
int main() {  
    for (int j = 0; j < 5; j++)  
        toto();  
}
```

le mot-clé static

le mot-clé static : Solution 1

- 1iere itération : 10 - 10
- 2ieme itération : 15 - 10
- 3ieme itération : 20 - 10
- 4ieme itération : 25 - 10
- 5ieme itération : 30 - 10

le mot-clé static

le mot-clé static : Example 2

```
// file1.c
static int pix10 = 314;
```

```
static void foo()
{
    // ...
}
```

```
// mainc.c
int main()
{
    pix10 = 628;
    foo();
}
```

le mot-clé static

le mot-clé static : Solution 2

```
// file1.c
static int pix10 = 314; // this variable is only visible in this
                        // translation unit (file1.c)
// this function can only be used in this translation unit
// foo is only visible in 'file1.c'
static void foo()
{
    // ...
}

// mainc.c
int main()
{
    pix10 = 628; // undeclared variable pix10
    foo();       // implicit declaration of function 'prv_func'
}
```

le mot-clé extern

Définition :

le mot-clé **extern** est utilisé pour étendre la visibilité des variables / fonctions.

Quelques remarques :

- L'utilisation d'**extern** avec des fonctions est redondant.
- L'utilisation de `extern type var` amènera la variable `var` dans le fichier **.h** ou **.c** courant à partir d'un autre pendant l'édition du lien.

Priorité des opérateurs

Table des opérateurs : ¹⁴

Priorité	Les opérateurs
1	++ -- () [] . ->
2	++ -- + - ! * & sizeof
3	* / %
4	+ -
5	<< >>
6	<<= >>=
7	== !=
8	&

Table – Priorité des opérateurs en C

14. pour plus de détails :

Priorité des opérateurs

Table des opérateurs : ¹⁵

Priorité	Les opérateurs
9	^
10	
11	&&
12	
13	? :
14	= += -= *= /= %= <<= >>= &= ^= =
15	,

Table – Priorité des opérateurs en C

15. pour plus de détails :

https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence

Les Opérateurs et ordre d'évaluation

Pouvez-vous prédire la valeur de `i` sur chaque instruction sachant que `i` est initialement 0 :

```
i = (i++);      // i = 0 intially  
i = ++i + i++;  // i = 0 intially  
i = i++ + 1;    // i = 0 intially  
f(++i, ++i);    // i = 0 intially
```

Les Opérateurs et ordre d'évaluation

```
i = (i++);           // undefined behavior
i = ++i + i++;       // undefined behavior
i = i++ + 1;         // undefined behavior
f(++i, ++i);         // undefined behavior
f(i = -1, i = -2);   // undefined behavior
f(i, i++);           // undefined behavior
a[i] = i++;          // undefined behavior
```

Explication :

Pour une expression de type `ExpA op ExpB` ou `op` n'est pas `&&` ou `||` ou `,` l'ordre d'évaluation de `ExpA` et `ExpB` est indéfini (c'est-à-dire que `ExpA` peut être évalué avant `ExpB` ou vice versa)

Exemple :

`res = foo() + bar()` `foo` peut être appelé avant `bar` ou vice versa

Les Opérateurs et ordre d'évaluation

Opérateurs qui garantissent l'ordre

Les opérateurs `&&`, `||` et `,` garantissent que l'expression à gauche est évaluée avant l'expression à droite.

L'opérateur ternaire `(?:)` garantit que la condition est évaluée en premier. Si la condition est vraie, l'expression de gauche à `:` est évaluée, sinon l'expression à droite de `:` est évaluée.

Exemple :

```
int res = f1() && f2(); // f1() is called before f2()
int res = f1() || f2(); // f1() is called before f2()
int res = f1(), f2();   // f1() is called before f2()
int res = cond() ? f1() : f2() // cond() is called then f1()
                                // is called if the result of
                                // cond() is true otherwise f2()
                                // is called
```

Les Opérateurs et ordre d'évaluation

Pour éviter complètement le problème :

Une règle de base qui devrait nous protéger de ce genre de comportement indéfini est de ne pas modifier et utiliser la même variable dans la même instruction, c'est-à-dire éviter de changer et de lire à partir de la même variable avant un **point virgule** ';'.

Exemple :

```
a[i] = i;           // OK
a[i] = j;           // OK
a[i++] = i;         // undefined behavior
a[i] = i++;         // undefined behavior
int p = i++ && i--; // OK
int p = i++ || i--; // OK
int p = i++, i--;   // OK
```

Chapitre 4

- 1. Introduction
- 2. Compilation
- 3. La langage C
- 4. Les outils

Conclusion