Programmation en langage C

PG109 Programmation Impérative

Philippe SWARTVAGHER
ph-sw.fr

BORDEAUX INP Enseirb-Matmeca

À propos de ce cours

Organisation

- 9 séances d'EI ($9 \times 2 \times$ 1h20)
- 5 séances de TP ($5 \times 2 \times$ 1h20)

Évaluation

- Quelques TPs notés
- Partiel papier en janvier

Support

- Cette présentation
- Vos notes personnelles

Matériel requis

- Un ordinateur, un terminal, un éditeur de texte, un compilateur
- Du papier et un crayon

Quelques ressources

Ce cours est basé, entre autres, sur :

- Claude Delannoy, *Programmer en langage C*
- Le cours de G. Mercier : `/net/npers/mercier/PG109/Cours_PG109_2023_2024_Eleves.pdf`
- Le cours de F. Morandat (**avec des exercices**) : https://www.labri.fr/perso/fmoranda/pg101/
- Les cours de F. Pellegrini et R. Giraud

Pour installer les outils nécessaires pour faire du C sur sa machine :

- https://www.labri.fr/perso/fmoranda/cathome/
- https://thor.enseirb-matmeca.fr/ruby/docs/teaching/vmlinux

Autres ressources :

- Dennis Ritchie et Brian Kernighan, *The C Programming Language*
- Beej's Guide to C Programming, https://beej.us/guide/bgc/

Un petit sondage

- Qui a déjà programmé ?

Un petit sondage

- Qui a déjà programmé ?
- Avec quels langages ?

Un petit sondage

- Qui a déjà programmé ?
- Avec quels langages ?
- Qui a déjà programmé en C ?

Un petit sondage

- Qui a déjà programmé ?
- Avec quels langages ?
- Qui a déjà programmé en C ?
- Qui estime maîtriser le C ?

Le langage C

Un langage de programmation...

- bas-niveau
- impératif
- compilé
- Première version en 1972
- Toujours très populaire
- Utilisé dans de nombreux domaines : systèmes d'exploitation, simulation numérique, embarqué, ...

Le langage C

Un langage bas-niveau

Langage bas-niveau

- Offre peu d'abstractions du matériel (jeu d'instructions du processeur, gestion de la mémoire, ...)
- « Plus proche de la machine »
- Apprentissage plus difficile
- Plus rapide
- Permet de vraiment maîtriser ce que va faire le processeur et comment il fonctionne
- Exemples : assembleur, C, C++

Langage haut-niveau

- Abstraction importante du matériel (ex. : gestion de la mémoire cachée)
- Écriture de programmes plus rapide
- Apprentissage plus facile
- Pénalité en terme de performances
- Exemples : Java, Python, C#, ...

Le langage C

Un langage impératif

- **Paradigme** de programmation
  - Façon de programmer
- Expression de *comment* résoudre le problème
- À l'aide d'une **séquence d'instructions** :
  - Affectations
  - Conditions
  - Boucles
  - ...
- Instructions exécutées par le processeur

Le langage C

Un langage compilé

Code source ——— Compilation ⟶ Exécutable

- Fichier(s) texte
- Rédigé avec n'importe quel éditeur de texte
- Extension `.c` (par convention)
- Compréhensible par le développeur

- Réalisée par un **compilateur**
- Transforme le code source en instructions pour le processeur
- GCC, Clang, MSVC, ...

- « Binaire »
- Contient les instructions à exécuter
- Compréhensible par le processeur

Votre premier programme

```c
#include <stdio.h>

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

    return 0;
}
```

Permet d'utiliser `printf`

Définit la fonction `main`

Appelle la fonction `printf`

La fonction `main` retourne 0

- Fonction `main` : point d'entrée d'un programme C
- Fonction `printf` : permet d'afficher du texte à l'écran
- Chaînes de caractères entre guillemets : `"Hello world!\n"`
- `\n` dans une chaîne de caractère produit un retour à la ligne

Votre premier programme

```c
#include <stdio.h>

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

    return 0;
}
```

Permet d'utiliser `printf`

Définit la fonction `main`

Appelle la fonction `printf`

La fonction `main` retourne 0

Compilation :

```
cc -std=c99 -Wall -Werror first_code.c -o first_code
```

Exécution :

```
./first_code
```

À vous de jouer !

Options du compilateur

Option	Signification
`-std=c99`	Utilise le standard C99
`-Wall`	Affiche tous les avertissements
`-Werror`	Considère tous les avertissements comme des erreurs (stoppe la compilation)
`-o nom_executable`	Précise le nom de l'exécutable produit (par défaut : `a.out`)

Et beaucoup d'autres...

Toujours utiliser `-Wall -Werror` en TP !

Instruction

Tout code C décrit une séquence d'instructions :

- Instruction simple : termine par ;
  - Expression
  - Condition
  - Boucle
  - Déclaration de variable
  - ...
- Bloc d'instructions : délimitées par { }

Expression

Une expression s'évalue en une **valeur** qui possède un **type** :

- une constante : `42` (de type entier)
- un calcul arithmétique : `3.5 + 2.8` (de type flottant)
- la valeur retournée par une fonction : `foo(3, 4)`
- une variable : `nombre_billes` (de type entier)
- ...

Valeur qui peut être affectée à une variable

Quelques remarques sur le code

Écriture de code C

Le C est un langage *sensible à la casse* (fait la différence entre les majuscules et les minuscules) :

- `printf` $\neq$ `PRINTF` $\neq$ `Printf`
- `nombre_billes` $\neq$ `Nombre_Billes`

Le C n'est pas sensible aux espaces (aligment, tabulations, retours à la ligne, ...), mais ça améliore la lisibilité du code.

Commentaires

```c
/* Ceci est un commentaire */

/* Les commentaires commençant par '/*'
   peuvent être sur plusieurs lignes,
   mais doivent toujours finir par */

// Ceci est un commentaire sur une unique ligne

printf("Bonjour "); // affiche 'Bonjour '

printf(/* texte : */ "le monde !\n");
```

Le bon et le mauvais commentaire

- Un commentaire facilite la lecture et la compréhension du code
- Il ne décrit pas le code
- À l'extrême : un code bien écrit se passe de commentaires [1]

```
int i = 0; // compteur

for (i = 1; i < nb_billes-2; i++)
{
    /* Selon nos règles, les premières et
       dernières billes ne comptent pas */

    // Affichage du score :
    printf(...);
}
```

Quels sont les commentaires superflus ?

1. Robert C. Martin, *Clean Code : A Handbook of Agile Software Craftsmanship* (à lire avec un esprit critique)

Style de code

- Quand faire des retours à la ligne, comment aligner le code, règles de nommage, longueur de lignes, anglais ou autre, ...
- Le C n'impose rien, donc à vous de choisir
- Priviligiez la lisibilité (quite à en écrire un peu plus)
- **Soyez constants et cohérents** :
  - Choisissez un style et appliquez-le à l'ensemble du projet
  - Mettez-vous d'accord au début de chaque projet en groupes
  - Suivez le style des projets existants

Vous vous remercierez dans 6 mois !

Exemples de styles de codes

(liste non exhaustive)

```c
int uneVar = 0;
if(uneVar >= 3) {
printf("Oui\n");

}
else{ printf("Non\n");
}
```

```c
int une_var = 0;

if (une_var>=3)
  {
    printf("Oui\n");
  }
else
  {
    printf("Non\n");
  }
```

```c
int uneVar = 0;

if(uneVar >= 3) {
    printf("Oui\n");
}
else {
    printf("Non\n");
}
```

```c
int une_variable = 0;

if (une_variable >= 3)
{
    printf("Oui\n");
}
else
{
    printf("Non\n");
}
```

Quelles différences ? Lequel est le plus lisible ?

Variables

Variable

- Identifie une zone mémoire
- Possède :
  - un type : nombre entier, nombre flottant, adresse mémoire, ...
  - un nom : `[a-zA-Z_][a-zA-Z0-9_]*` (pas de caractères spéciaux, accentués, ...)
- Portée :
  - *où la variable est accessible dans le code source*
  - au sein du bloc d'instructions (jusqu'au prochain `}`)

Déclaration :

```
type identifiant;
```

Affectation :

```
identifiant = expression;
```

Le = n'est pas l'égalité mathématique !
En C, il peut se lire « reçoit ».

Déclaration et affectation simultanées :

```
type identifiant = expression;
```

Affichage de variables

```c
#include <stdio.h>

int main()
{
    int longueur = 3;
    int largeur = 5;
    int aire_rectangle = longueur * largeur;

    printf("%d cm x %d cm = %d cm^2\n",
        longueur, largeur, aire_rectangle);

    return 0;
}
```

int : type pour les entiers

%d sera remplacé par le contenu de la variable correspondante

À vous de jouer !

Types primitifs de variables

Types entiers

- Pour stocker les nombres entiers
- `char`, `short`, `int`, `long`
- Taille de ces types différente, différents intervales représentables
- Version `unsigned` pour des entiers non-signés (positifs)
- `char` aussi utilisé pour stocker les caractères

Types floattants

- Pour stocker les nombres décimaux (« à virgule flottante »)
- `float`, `double`
- Taille de ces types différente, différents intervales représentables, précisions différentes

Représentation des entiers en mémoire

Entiers non signés

Décomposition en base binaire : $13 = 1 + 4 + 8 = 2^0 + 2^2 + 2^3$

1 octet = 8 bits =

0	0	0	0	1	1	0	1
b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0

Avec n bits, représentation des entiers entre $[0, 2^n - 1]$

Entiers signés

Complément à 2 : miroir sur tous les bits et + 1 (X + (-X) = 0)

	Représentation binaire							Non signé	Signé
0	0	0	0	1	1	0	1	13	13
1	1	1	1	0	0	1	0	242	-14
1	1	1	1	0	0	1	1	243	-13

Avec n bits, représentation des entiers signés entre $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$

Représentation des entiers dans le code

Base décimale

- Notation en base 10
- Suite de chiffres décimaux : [0-9]
- Exemple : `42`

Base octale

- Notation en base 8
- Suite de chiffres octals : [0-7]
- Utilisation du préfixe `0`
- Exemple : `042` ($= 4 \times 8^1 + 2 \times 8^0 = 34$)

Base hexadécimale

- Notation en base 16
- Suite de chiffres hexadécimaux : [0-9A-F]
- Utilisation du préfixe `0x` ou `0X`
- Exemple : `0x42` ($= 4 \times 16^1 + 2 \times 16^0 = 66$)

Types primitifs de variables

Type	Bits	Intervalle	Code printf
`char`	8	$[-128, 127]$	`%hhd`
`unsigned char`		$[0, 255]$	`%hhu`
`short (int)`	16	$[-32768, 32767]$	`%hd`
`unsigned short (int)`		$[0, 65535]$	`%hu`
`int`	32	$[-2147483648, 2147483647]$	`%d`
`unsigned (int)`		$[0, 4294967295]$	`%u`
`long (int)`	64	$[-9223372036854775808, 9223372036854775807]$	`%ld`
`unsigned long (int)`		$[0, 18446744073709551616]$	`%lu`
`float`	32	[-3.4e38, 3.4e38] $\varepsilon = 1.2\text{e-}38$	`%f`
`double`	64	[-1.8e308, 1.8e308] $\varepsilon = 2.2\text{e-}308$	`%lf`

Types primitifs de variables

Type	Bits	Intervalle	Code printf
`char`	8	$[-128, 127]$	`%hhd`
`unsigned char`		$[0, 255]$	`%hhu`
`short (int)`	16	$[-32768, 32767]$	`%hd`
`unsigned short (int)`		$[0, 65535]$	`%hu`
`int`	32	$[-2147483648, 2147483647]$	`%d`
`unsigned (int)`		$[0, 4294967295]$	`%u`
`long (int)`	64	$[-9223372036854775808, 9223372036854775807]$	`%ld`
`unsigned long (int)`		$[0, 18446744073709551616]$	`%lu`
`float`	32	[-3.4e38, 3.4e38] $\varepsilon = 1.2\text{e-}38$	`%f`
`double`	64	[-1.8e308, 1.8e308] $\varepsilon = 2.2\text{e-}308$	`%lf`

Dépend de l'architecture !

`sizeof(type)` pour connaître le nombre d'octets occupés par le type

Constantes

Ajout du mot-clé `const` lors de la déclaration :

```
const int x = 3;
```

- Le compilateur empêche la variable d'être modifiée par la suite
- Permet au compilateur de réaliser des optimisations
- Permet de se protéger des erreurs d'inattention du développeur

Opérations arithmétiques

Principales opérations arithmétiques

Symbole	Opération
+	Addition
-	Soustraction
*	Multiplication
/	Division
%	Modulo

Exemple

```
int a = 3;
int b = 4;
int c = a * b;
```

Conversion de types

Toute expression étant typées, il faut convertir en cas de types hétérogènes entre deux opérandes.

- Par défaut : conversion implicite du type le plus petit vers le type le plus grand.
- Les constantes entières sont de type `int`.
- Les constantes flottantes sont de type `double`.
- Pour les affectations : conversion du type du membre droit vers le type du membre gauche. Si le type de destination est plus petit que le type du membre droit :
  - Résultat indéfini si un des types est flottant
  - Troncature pour les types entiers

Exemple

```
char a = 7;
int b = 2;
float c = a / b; // conversion de a en int, a/b = 7/2
    = 3 , conversion de 3 en flottant
```

Conversion de types explicite

Il est possible de forcer la conversion d'un type (« *cast* ») :

Exemple

```
char a = 7;
int b = 2;
float c = (float) a / b; // conversion de a en float,
    conversion de b en float, a/b = 7/2 = 3.5
```

Question

Que va afficher le code suivant ? Pourquoi ? Indice : $245895 \times 478565 > 2^{31} - 1$

```
int var0 = 245895;
int var1 = 478565;

long val2 = (long) var0 * var1;
long val3 = (long) (var0 * var1);

printf("val2 = %ld val3 = %ld\n", val2, val3);
```

Affectations combinées

Dans le cas où le contenu de la variable est modifié par l'opération :

`var = var op expr;` $\Leftrightarrow$ `var op= expr;`

Exemple

```
x += 3;
y -= 2;
z *= 4;
```

Incrémentations et décrémentations

Dans le cas où on incrémente ou décrémente :

```
var += 1; ⇔ var++;
var -= 1; ⇔ var--;
```

Selon la position de l'opérateur, la valeur est lue avant ou après l'opération :

```
var++; ⇒ Post-incrémentation
++var; ⇒ Pré-incrémentation
```

Exemples

Code	Incrémentation	Valeurs finales
`i = 3; a = i++;`	Post-incrémentation	a = 3 et i = 4
`i = 3; a = ++i;`	Pré-incrémentation	a = 4 et i = 4
`i = 3; a = i--;`	Post-décrémentation	a = 3 et i = 2
`i = 3; a = --i;`	Pré-décrémentation	a = 2 et i = 2

Opérateurs bit-à-bit

- `&` (ET) , `|` (OU) , `^` (OU exclusif : xor) bit-à-bit
- `~` complément à un (inversion de bits)
- `var << n` décalage de `n` bits vers la gauche (multiplication par 2^n)
- `var >> n` décalage de `n` bits vers la droite (division entière par 2^n)

Exemple : `unsigned char`									Non signé	Signé
`a`	0	0	0	0	1	1	0	1	13	13
`b`	0	0	0	0	0	1	1	0	6	6
`a & b`	0	0	0	0	0	1	0	0	4	4
`a | b`	0	0	0	0	1	1	1	1	15	15
`a ^ b`	0	0	0	0	1	0	1	1	11	11
`a`	1	1	1	1	0	0	1	0	242	-14
`a >> 1`	0	0	0	0	0	1	1	0	6	6
`a << 3`	0	1	1	0	1	0	0	0	104	104
`3 >> a`	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Opérateurs bit-à-bit

Que va afficher le code suivant ?

```c
#include <stdio.h>

int main()
{
    char a = 1;
    char b = 2;
    printf("a & b = %hhd\n", a & b);
    printf("a | b = %hhd\n", a | b);
    printf("a ^ b = %hhd\n", a ^ b);
    b = 4;
    printf("b << 2 = %hhd\n", b<<2);
    printf("b >> 2 =  %hhd\n", b>>2);
    printf("2 >> b = %hhd\n", 2>>b);
    a = 255;
    printf("~a = %hhd\n", ~a);
    return 0;
}
```

Conditions

Si

SI `expression` est vraie
ALORS `bloc d'instructions`

```
if (expression)
{
     instruction1;
     instruction2;
}
```

Si ... Sinon

SI expression est vraie
ALORS bloc d'instructions
SINON autre bloc d'instructions

```
if (expression)
{
    instruction1;
    instruction2;
}
else
{
    instruction3;
}
```

Si ... Sinon Si ... Sinon

```
if (expression1)
{
    instruction1;
    instruction2;
}
else if (expression2)
{
    instruction3;
}
else
{
    instruction4;
}
```

Possibilité d'avoir plusieurs `else if`

Condition

Toute expression évaluée à 0 est fausse.

Toute expression évaluée à autre chose que 0 est vraie.

```
int nb_billes = 3;

if (nb_billes)
{
    printf("Une ou plusieurs billes\n");
}
else
{
    printf("Pas de bille\n");
}
```

Expressions booléennes

Opérateurs de comparaisons

Symbole	Signification
==	Égal
!=	Différent
<	Inférieur
<=	Inférieur ou égal
>	Supérieur
>=	Supérieur ou égal

Opérateurs booléens

Symbole	Signification
&&	Et
||	Ou
!	Négation

Priorités des opérateurs

```
! > && > ||
```

Exemple :

```
!A || B && C ⇔ (!A) || (B && C)
```

Exemple

```c
int nb_billes = 3;
int a_moi = 1;

if (a_moi && nb_billes)
{
    if (nb_billes > 1)
    {
        printf("J'ai plusieurs billes\n");
    }
    else
    {
        printf("J'ai une bille\n");
    }
}
else
{
    printf("Je n'ai pas de bille :(\n");
}
```

À vous de jouer !

Attention !

`==` $\neq$ `=`

`!=` $\neq$ `=!`

`&&` $\neq$ `&`

`||` $\neq$ `|`

Égalité de flottants

Représentation des nombres flottants

- Principal problème : représenter un nombre infini de nombres avec un nombre fini de bits
- Norme IEEE 754
- Précision limitée ($eg\ \varepsilon = 1.2e - 38$ pour `float`)

Test de l'égalité de flottants

- Conséquence de la représentation : les erreurs de précision se propagent lors d'opérations sur les flottants
- Comparaison avec les fonctions `fabs` (`double`) ou `fabsf` (`float`) :

```
if (fabsf(b - a) < 1e-10)
{
    printf("a == b\n");
}
else
{
    printf("a != b\n");
}
```

switch

```
switch (expression)
{
     case 0:
          instructions;
          break;
     case 1:
          instructions;
          break;
     default:
          instructions;
          break
}
```

Surtout utilisé pour les ensembles finis de possibilités (*cf* énumérations, par exemple).

switch - Exemple

```c
int nb_billes = 3;

switch (nb_billes)
{
    case 0:
        printf("Je n'ai pas de bille :(\n");
        break;
    case 1:
        printf("J'ai une bille\n");
        break;
    default:
        printf("J'ai plusieurs billes\n");
        break;
}
```

À vous de jouer !

Conditions ternaires

Expressions de la forme :

```
expression ? expression_si_vrai : expression_si_faux
```

Exemple d'utilisation :

```
int nb_billes = 3;
printf(
    nb_billes > 0 ?
        "J'ai une ou plusieurs billes\n" :
        "Je n'ai pas de billes\n"
);
```

Possibilités de chaîner les ternaires (mais attention à la lisibilité !) :

```
printf(
    nb_billes == 0 ?
    "Je n'ai pas de billes :(\n" :
    nb_billes == 1 ? "J'ai une bille\n" :
    "J'ai plusieurs billes\n"
);
```

Boucles

Tant que

TANT QUE `expression` est vraie
ALORS `bloc d'instructions`

```
while (expression)
{
    instruction1;
    instruction2;
}
```

```
int nb_billes = 3;
int i = 0;

while (i < nb_billes)
{
    printf("J'ai la bille numéro %d\n", i+1);
    i++;
}
```

Tant que – variante

EXÉCUTE `bloc d'instructions`
TANT QUE `expression` est vraie

```
do
{
    instruction1;
    instruction2;
} while (expression);
```

Exécute au moins une fois le bloc d'instructions.

Attention au point-virgule !

Boucles infinies

Lorsque la condition de la boucle est toujours vraie :

- Le programme est bloqué dans la boucle.
- Ce n'est (généralement) pas le comportement désiré.
- Oubli de changer la valeur d'une variable utilisée dans la condition, mauvais algorithme, ...
- `Ctrl+C` pour arrêter le programme

La boucle for

```
for (inst_init; cond_arret; inst_a_chaque_iter)
{
    instruction1;
    instruction2;
}
```

Quasiment toujours utilisée avec un compteur :

```
int nb_billes = 3;
int i;

for (i = 0; i < nb_billes; i++)
{
    printf("J'ai la bille numéro %d\n", i+1);
}
```

- Quelle est la valeur de `i` à la sortie de la boucle ?
- Quelle est la portée de la variable `i` ?

À vous de jouer !

Exercice : nombre de bits à 1

Consigne

Écrivez un programme qui compte le nombre de bits à 1 dans un nombre.

Conseils

- `sizeof(type)` pour connaître le nombre d'*octets* du type
- Boucle pour itérer sur chaque bit
- Opérateur bit-à-bit pour savoir si le bit est à 1 ou pas

À vous de jouer !

Instruction break

Permet de sortir de la boucle ou du `case` le plus interne.

```
for (i = 0; i < 3; i++)
{
    int reponse = obtenir_reponse();

    if (reponse < 0)
    {
        break;
    }

    traiter_reponse(reponse);
}
```

Non-recommandé : fait du code « spaghetti », plus difficile à comprendre.

Instruction continue

Permet de sauter l'itération courante de la boucle et aller à la suivante.

```
for (i = 0; i < 3; i++)
{
    int reponse = obtenir_reponse();

    if (reponse < 0)
    {
        continue;
    }

    traiter_reponse(reponse);
}
```

Quelle est la différence de comportement par rapport à l'exemple précédent ?
Non-recommandé : fait du code « spaghetti », plus difficile à comprendre.

Exercice : overflow sur les entiers

Consigne

Écrivez un programme qui determine l'intervalle des nombres entiers représentables avec le type `char`.
Faites une version avec `break` et une version sans.

Conseils

- Partez d'un `char` avec la valeur 0, incrémentez de 1 jusqu'à ce que la valeur devienne négative
- Stockez les valeurs maximales et minimales obtenues

À vous de jouer !

Fonctions

Fonctions

- Découpage du programme en sous-programmes : *fonctions*
- Permet de *factoriser* le code
  - Évite le copier-coller
  - Simplifie le code
- Peut être vue comme une fonction mathématique :
  - à partir de paramètres...
  - ... la fonction exécute des instructions...
  - ... et renvoie une valeur
- Il y a aussi des fonctions sans paramètres et/ou sans valeur de retour : uniquement une séquence d'instructions.

Définitions de fonctions

Une fonction possède :

- un type de retour
- un nom
- une liste de valeurs typées comme paramètres
- un corps qui contient les instructions à exécuter

Syntaxe :

```
type_retour nom_fonction(type1 param1, type2 param2)
{
    instruction;
    instruction;
}
```

- Les fonctions doivent être définies avant leur utilisation (pour l'instant).
- Il est impossible de définir une fonction *dans* une fonction.

Paramètres de fonctions

- Les paramètres d'une fonction s'utilisent comme des variables définies au début de la fonction.
- Si pas de paramètres :

  ```
  type_retour foo()
  ```

  ou (mieux) :

  ```
  type_retour foo(void)
  ```

- Paramètres passés *par copie*

Valeur de retour

- L'instruction `return expression;` indique que l'exécution de la fonction est terminée et qu'elle renvoie (*retourne*) la valeur de `expression`.
  - On peut retourner qu'**une** valeur.
- `void` est à utiliser pour indiquer qu'il n'y a pas de valeur de retour
  - `return;` est alors facultatif

```c
int max(int a, int b)
{
    int m = a;
    if (b > a)
    {
        m = b;
    }
    return m;
}
```

```c
void dire_bonjour(void)
{
    printf("Bonjour !\n");
}
```

Question : pourquoi la fonction `main` renvoie une valeur ?

Appel de fonctions

```c
int max(int a, int b)
{
    // ...
}

void dire_bonjour(void)
{
    // ...
}

int main()
{
    int x = 5;
    int y = 7;

    dire_bonjour();

    int m = max(x, y);
    printf("Le maximum est %d\n", m);

    return 0;
}
```

Exercice : le retour du nombre de bits

Consigne

Reprenez l'exercice du nombre de bits, mais créez une fonction `int nb_bits_char(char x)` qui renvoie le nombre de bits à 1 dans `x`.

À vous de jouer !

Exercice : Fibonacci

Consigne

Écrivez une fonction qui renvoie le $n^{\text{ème}}$ terme de la suite de Fibonacci, définie par :

$$F(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 0 \\ 1 & \text{si } n = 1 \\ F(n-1) + F(n-2) & \text{sinon} \end{cases}$$

Conseil

- La fonction sera récursive : ne pas oublier la condition d'arrêt !

Question : Peut-on calculer tous les termes ? Pourquoi ?

À vous de jouer !

Prototypes

Ce code fonctionne-t-il ? Pourquoi ?

```
int est_pair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 1;
    }
    return est_impair(n-1);
}

int est_impair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 0;
    }
    return est_pair(n-1);
}
```

Prototypes

```c
int est_pair(int n);
int est_impair(int n);

int est_pair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 1;
    }
    return est_impair(n-1);
}

int est_impair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 0;
    }
    return est_pair(n-1);
}
```

Déclaration de *prototypes* avant l'utilisation des fonctions.

Disgression

```c
int est_pair(int n);
int est_impair(int n);

int est_pair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 1;
    }
    return est_impair(n-1);
}

int est_impair(int n)
{
    if (n == 0)
    {
        return 0;
    }
    return est_pair(n-1);
}
```

Questions

- Ce code est-il efficace ?
- Proposez d'autres façons de tester si un nombre est pair

Fonctions du langage C

- Le langage C fournit un ensemble de fonctions dans la *bibliothèque standard*.
- Peut nécessiter d'ajouter des lignes `#include <....h>` au début du fichier source (on verra plus tard pourquoi)
- Informations sur les fonctions (prototypes, fonctionnement, signification des paramètres, valeurs de retour possible, exemples, `#include` nécessaires, ...) dans les pages de manuel (*manpages*) :
  - `man 3 <fonction>`

    Exemple : `man 3 printf`
  - Peut-être que vous avez besoin d'installer les paquets `manpages` et `manpages-dev` (pour les avoir en français : `manpages-fr` et `manpages-fr-dev` ; pour Debian, adaptez à votre distribution)

Pointeurs

Pointeurs, références, adresses, variables, mémoire...

Variables

- Les variables peuvent être vues comme des étiquettes sur des cases mémoires.
- Les cases mémoires stockent la valeur de la variable.
- Ces étiquettes sont propres au programme, voire à la fonction.

Adresse

- Chaque case mémoire possède une adresse.
- Chaque case mémoire possède 1 octet : impossible d'avoir l'adresse d'un bit en particulier.
- L'adresse de la case étiquettée par une variable s'obtient avec l'opérateur `&`.
- Affichage dans `printf` avec `%p`.

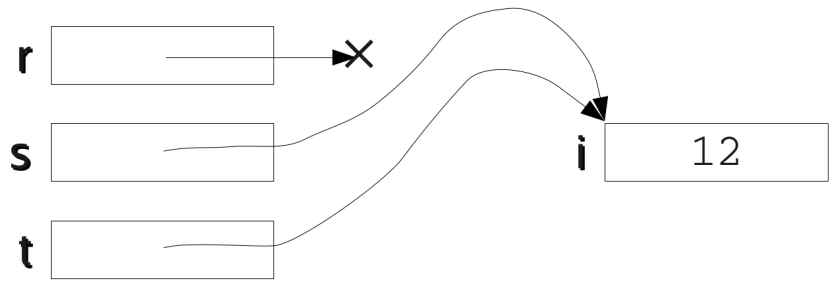
Pointeur

- Les adresses sont sockées dans des variables de type pointeurs : `type* variable`
- Toujours la même taille

Pointeurs

Initialisations

- `int* r = NULL;`
- `int i = 12; int* s = &i;`
- `int* t = s;`



`type* var` :

- se lit « `var` référence / pointe sur une variable de type `type` » ;
- contient l'adresse de la première case mémoire stockant des données de type `type`.

Pointeurs

Utilisation

- Pour accéder au contenu de l'adresse stockée (*déréférencement*) : on utilise l'opérateur *.
- En cas de tentative d'accès à une adresse intedite : erreur de segmentation (*segmentation fault / segfault*) et le programme est interrompu.

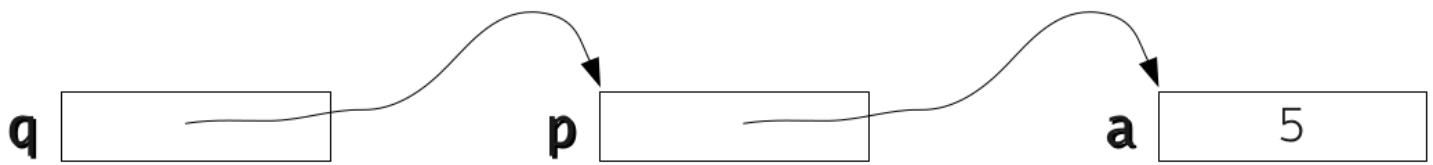
Exemple

On souhaite multiplier par 2 la variable avec la plus petite valeur :

```
int a = 5;
int b = 17;
int* min_ref = NULL;
min_ref = (a < b) ? &a : &b;
(*min_ref) *= 2;
printf(
    "La plus petite valeur doublée est %d\n",
    *min_ref
);
```

Pointeurs de pointeurs

```
int a;
int* p;
int** q;

a = 5;
p = &a;
q = &p;
**q = 7; /* Maintenant a vaut 7 */
```



Pointeurs comme paramètres de fonctions

Pourquoi le code suivant ne peut pas fonctionner ?

```
void swap(int a, int b)
{
    int temp = a;
    a = b;
    b = temp;
}

int main()
{
    int a = 12;
    int b = 7;

    printf("a = %d, b = %d\n", a, b);
    swap(a, b);
    printf("a = %d, b = %d\n", a, b);

    return 0;
}
```

Pointeurs comme paramètres de fonctions

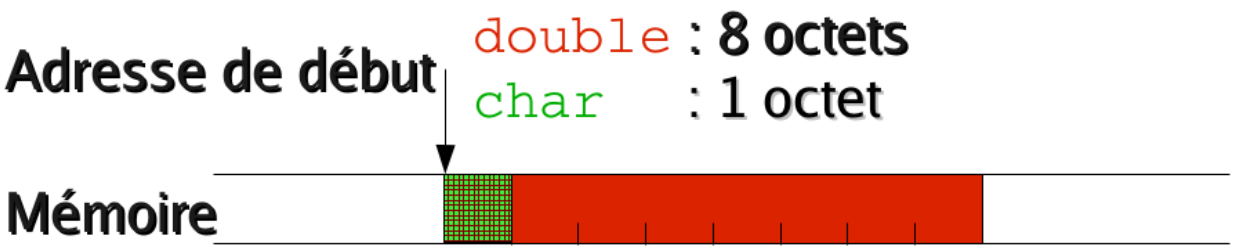
Pourquoi le code suivant fonctionne ?

```
void swap(int* a, int* b)
{
    int temp = *a;
    *a = *b;
    *b = temp;
}

int main()
{
    int a = 12;
    int b = 7;

    printf("a = %d, b = %d\n", a, b);
    swap(&a, &b);
    printf("a = %d, b = %d\n", a, b);

    return 0;
}
```

Zones mémoires

Toute zone mémoire stockant une variable peut-être décrite par :

- son adresse de début ;
- sa taille (dépend du type de variable).



Pointeur générique

Dans le cas où on n'est pas intéressé par le type, qu'on a juste besoin de l'adresse :

`void*` est un type pour stocker n'importe quelle adresse

Question

Pourquoi ne peut-on pas déréférencer un pointeur générique `void*` ?

Tableaux

Tableaux

Séquence d'éléments

- Longueur définie à l'initialisation
- Indices commencent à 0
- Données de type homogène, stockées de façon contiguë en mémoire
- Impossible de connaître la longueur d'un tableau existant
- Bornes non vérifiées (possibilité d'écrire en-dehors du tableau)

Tableaux

Déclaration

```
int t[4];
int u[4] = {4, 5, 3, 2};
int v[] = {4, 5, 3, 2};
```

La taille fournie à l'initialisation doit toujours être une constante
(cas variable vu plus tard)

Accès à une case

```
u[2] = 1;
printf("u[2] = %d\n", u[2]);
```

Que contient tout le tableau maintenant ?

Exercice : calcul du maximum

Consigne

Compléter le code suivant pour que `maximum` contienne le maximum du tableau `nombres`.

```c
int nombres[9] = {5, 4, 2, 1, 9, 4, 3, 8, 3};
int maximum;

// ...

printf("Le maximum est : %d\n", maximum);
```

À vous de jouer !

Tableau, pointeur...

Un tableau est un pointeur !

```
int t[7]
int* p = t;
```

- `t` contient en réalité l'adresse mémoire de `t[0]`
- `t` est en réalité de type `int*`
- `p` $\Leftrightarrow$ `&t[0]`
- `t[i]` est l'identifiant de la zone mémoire `t + i*sizeof(int)`

Exemple

Que va afficher le code suivant ?

```
int t[3] = {1, 4, 2};
int* u;

u = t;
u[1] = 0;

printf("t[1] = %d u[1] = %d\n", t[1], u[1]);
```

Exemple

```
int t[5] = {1, 4, 2, 8, 9};
int* u;

u = &t[2];
u[1] = 0;
```

Quelle case de `t` contient la valeur 0 ?

Généralisation : arithmétique des pointeurs

```
int t[7];
int* p = t;
```

`p+i` $\Leftrightarrow$ `&p[i]` et `*(p+i)` $\Leftrightarrow$ `p[i]`

D'où l'importance du type des pointeurs :

`+i` sur un pointeur signifie `+i*sizeof(type)`

Par conséquence : pas d'arithmétique possible sur un pointeur générique `void*` (utilisez un `char*` en cas de besoin).

Retour à l'exemple

Quelle case de `t` contient 0 ?

```
int t[5] = {1, 4, 2, 8, 9};
int* u;

u = t + 2
*(u+1) = 0;
```

Pointeur générique et arithmétique

Exemple

```
void my_memcpy(void* dest, void* src, size_t len)
{
    char* d = dest;
    char* s = src;
    for (int i = 0; i < len; i++)
    {
        *(d+i) = *(s+i);
    }
}
```

Questions

- Pourquoi ne peut-on pas directement utiliser `src` et `dest` ?
- Comment écrire ce code sans se servir de `i` dans le corps de la boucle ? Indice : penser à l'incrémentation.
- Comment écrire ce code sans compteur `i` ?

Tableaux et fonctions

- Un tableau est un pointeur : on peut passer ce pointeur en paramètre à une fonction.
- On ne peut retourner que un pointeur vers un tableau existant avant l'appel à la fonction.

Exemple

```
int* bar(int n, int t1[], int t2[])
{
  if (sum(n, t1) > sum(n, t2))
    return t1;
  else
    return t2;
}
```

Exercice

Consigne

1. Faites une fonction `print_array` qui affiche le contenu de toutes les cases d'un tableau d'entiers.
2. Faites une fonction `max_array` qui renvoie la valeur maximum contenue dans un tableau d'entiers.
3. Faites une fonction `array_with_max` qui, parmi deux tableaux de même taille passés en paramètres, renvoie le tableau contenant la plus grande valeur maximale.
4. Créez deux tableaux d'entiers, affichez-les et affichez celui avec la plus grande valeur maximale.

Question

- Quel est le paramètre que toutes ces fonctions vont avoir en commun ? Pourquoi ?

À vous de jouer !

Chaînes de caractères

Représentation des caractères

- Comme toujours : ensemble de bits, tout est dans l'interprétation qu'on en fait
- Pour les caractères alpha-numériques, une des normes est l'ASCII
  - Par exemple, le code pour le caractère `A` est 65
  - `man ascii`
- Type utilisé pour stocker *un* caractère : `char`
- Les caractères s'expriment entre simples guillemets : `char c = 'A';`
- Interprétation comme un caractère dans `printf` : `%c`
  - Rappel : interprétation comme un entier : `%hhd`

Questions

- Quelle est la différence entre `char c = 65;` et `char c = 'A';` ?
- Que va-t-il s'afficher si j'utilise `%c` ou `%hhd` sur les deux valeurs ?
- Mêmes questions avec `char c = 57;` et `char c = '9';`.

Quelques caractères particuliers

Caractère	Signification
`'\0'`	Caractère nul
`'\n'`	Nouvelle ligne
`'\t'`	Tabulation
`'\\'`	Anti-slash
`'\''`	Guillemet simple

- Il s'agit bien d'un unique caractère à chaque fois !
- \ est appelé « caractère d'échappement ».

Exercice

Consigne

1. Écrivez une fonction `my_isalpha` qui indique si un caractère est une lettre (comme la fonction `isalpha` avec `#include <ctype.h>`).
2. Écrivez une fonction `my_tolower` qui renvoie la lettre minuscule correspondant à la lettre passée en paramètre (comme la fonction `tolower` avec `#include <ctype.h>`).
   - Que faire lorsque le paramètre n'est pas une lettre ?

À vous de jouer !

Chaînes de caractères

- Pas de type « chaîne de caractères » en C.
- Une chaîne de caractères est un tableau de caractères (`char`) dont le dernier caractère est le caractère nul (`'\0'`).
  - Ne pas oublier de réserver la place du caractère nul !
- Affichage avec `printf` : `%s`
- À quoi sert le dernier caractère nul ?

Chaînes de caractères

Une chaîne de caractères est un tableau de caractères (`char`) dont le dernier caractère est le caractère nul (`'\0'`) :

```
char t[] = {'B','o','n','j','o','u','r','\n','\0'};
```

La notation avec des guillemets doubles (`"foo"`) est plus pratique (`\0` est automatiquement ajouté) :

```
char t[] = "Bonjour\n" ;
```

On peut aussi avoir des pointeurs vers des chaînes de caractères, mais elles sont alors constantes :

```
char* s = "Bonjour !";
```

Chaînes de caractères

Exemple

```
char t[] = "Bonjour\n" ; /* Tableau modifiable en mémoire */
char * s = "Salut!";     /* Pointeur sur une constante */
t[1] = 'Z';              /* Légal car t est modifiable */
s[1] = 'Z';              /* Segfault car zone constante */
s = t;                   /* Légal car s est une variable */
s[1] = 'A';              /* Légal car t[1] est modifiable */
```

Fonctions de manipulation de chaînes

Nécessaire d'ajouter au début du fichier (on verra plus tard pouquoi) :

```
#include <string.h>
```

- `strlen` : renvoie le nombre de caractères dans une chaîne (sans le caractère terminal)
  - Quel est l'algorithme de cette fonction ?
- `strcpy` : copie d'une chaîne de caractères vers un tableau de destination
- `strcat` : ajoute une chaîne de caractères à la fin d'une autre
- `strchr` : recherche la première occurence d'un caractère dans une chaîne
- `strcmp` : compare deux chaînes de caractères
- et beaucoup d'autres : `man string`

Exercice

Consigne

Codez votre fonction `my_strlen` qui renvoie le nombre de caractères dans une chaîne de caractères.

À vous de jouer !

Retour sur la fonction `main`

Son prototype complet est le suivant :

```
int main(int argc, char* argv[]);
```

- Elle renvoie un entier.
  - Pourquoi ? (on en a déjà parlé)
- Elle prend deux arguments :
  - `argc` : le nombre d'éléments dans `argv`
  - `argv` : un tableau de pointeurs de chaînes de caractères, correspondant aux arguments du programme.
    La première chaîne est toujours le nom du programme.

Exemple

```
./programme argument1 argument2 argument3
```

```
int main(int argc, char* argv[])
{
    printf("Les arguments du programme sont :\n");
    for (int i = 1; i < argc; i++)
    {
        printf("%s\n", argv[i]);
    }
    return 0;
}
```

Exercice

Consigne

Reprenez votre fonction `my_strlen` et écrivez un programme qui affiche les arguments passés au programme et la longueur des chaînes correspondantes.

À vous de jouer !

Conversion des chaînes de caractères en nombres

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

```c
int atoi(char* str);
long atol(char* str);
long long atoll(char* str);
```

```c
double atof(char* str);
```

Exemple

```c
char* str = "12";
int nb = atoi(str);
printf("%s = %d\n", str, nb);
```

Énumérations

Énumérations

- Sous-ensemble du type `int` auquel est associé un nombre fini de valeurs symboliques.
- Type de variable défini par le développeur.
- Déclaration à l'extérieur de toute fonction.

```
enum feu_e {
    FEU_VERT,
    FEU_ORANGE,
    FEU_ROUGE
};
```

Utilisation

```
void affiche_feu(enum feu_e feu)
{
     switch (feu)
     {
          case FEU_VERT:
               printf("Vert ! Go !\n");
               break;
          case FEU_ORANGE:
               printf("Orange !\n");
               break;
          case FEU_ROUGE:
               printf("Rouge !\n");
               break;
          default:
               printf("Feu invalide\n");
               break;
     }
}
```

```
enum feu_e feu = FEU_ROUGE;
affiche_feu(feu);
affiche_feu(FEU_ORANGE);
```

Énumérations comme des entiers

Les énumérations sont des entiers : par défaut le premier élément vaut zéro.

```
enum feu_e {
    FEU_VERT,
    FEU_ORANGE,
    FEU_ROUGE,
    _NB_FEUX
};

void affiche_feu(enum feu_e feu)
{
    char* feux_str[] = {"vert", "orange", "rouge"};
    if (feu >= _NB_FEUX)
    {
        printf("bug !\n");
    }
    else
    {
        printf("%s\n", feux_str[feu]);
    }
}
```

Énumérations comme des entiers

- Numérotation consécutive des constantes.
- On peut préciser explicitement leur valeur :

```
enum nombre_e {
     UN = 1,
     DEUX,          // 2
     QUATRE = 4,
     CINQ,          // 5
     SEPT = 7
};
```

Structures

Structures

- Type défini par le développeur
- Type de variable qui regroupe plusieurs variables, potentiellement de types différents
- Peuvent être retournées / copiées
- La taille doit être calculable par `sizeof()` :
  - Donc calculable à la compilation
  - Pas de structures récursives

Définition

```
struct personne_s {
    char* prenom;
    int age;
};
```

Structures

Définition

```
struct personne_s {
    char* prenom;
    int age;
};
```

Initialisation

```
struct personne_s bobby;
bobby.prenom = "Bobby";
bobby.age = 42;
struct personne_s john = {"John", 53};
struct personne_s jeanny = {
    .age = 24,
    .prenom = "Jeanny"
};
struct personne_s jeanny_twin = jeanny;
```

Structures

Utilisation

```
jeanny_twin.prenom = "Katy";
printf(
    "%s a %d ans\n",
    jeanny.prenom,
    jeanny.age
);
```

Exercice

Consigne

Écrivez une fonction qui à partir d'un nombre de minutes retourne une structure contenant la décomposition en heures et minutes.

Question

Comment peut-on autrement obtenir cette décomposition en heures et minutes sans utiliser de structure ?

À vous de jouer !

Taille des structures

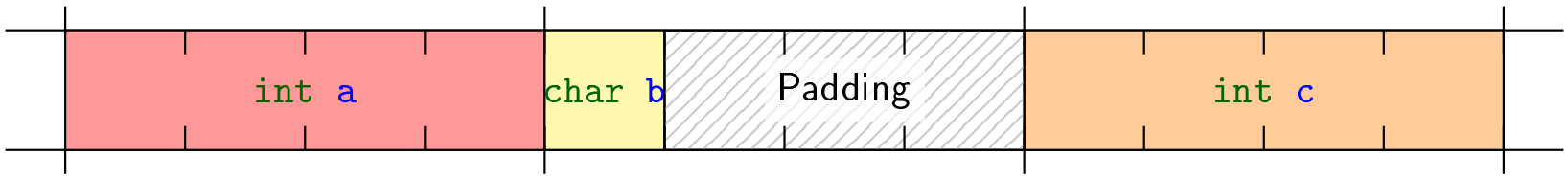
```c
struct foo_s {
    int a;
    char b;
    int c;
};

int main()
{
    struct foo_s foo;

    printf("int %lu\n", sizeof(foo.a));
    printf("char %lu\n", sizeof(foo.b));
    printf("struct foo_s %lu\n", sizeof(foo));

    return 0;
}
```

Que va afficher le code suivant ?

Taille des structures

```
struct foo_s {
    int a;
    char b;
    int c;
};
```

Représentation en mémoire :



- Meilleures performances lorsque les adresses sont alignées sur un certain multiple
- Ajout d'octets de bourrage (*padding*) pour aligner les adresses des différents membres des structures

Pointeurs et structures

- Structures récursives : utilisation d'un pointeur

```
struct int_list_item_s {
    int value;
    struct int_list_item_s* next;
};
```

Pourquoi peut-on faire ça ?

- Accéder aux membres d'un pointeur sur une structure :

$$(*x).y \Leftrightarrow x->y$$

```
void append(struct int_list_item_s* item,
   struct int_list_item_s* other)
{
    item->next = other;
}
```

Différence entre | et ||

Que va-t-il se passer à l'exécution du code suivant ? Pourquoi ?

```
struct foo_s {
    int i;
};

int main()
{
    int a = 12;
    struct foo_s* b = NULL;
    if (a | b->i) // | devrait être remplacé par ||
    {
        printf("a ou b->i ou les deux sont vrais\n");
    }
    else
    {
        printf("a et b->i sont faux\n");
    }

    return 0;
}
```

Allocation dynamique de mémoire

Allocation dynamique

Deux cas peuvent se présenter :

- On ne connaît pas à la compilation la quantité de mémoire dont on va avoir besoin, information connue seulement lors de l'exécution
- On a besoin d'une zone mémoire qui survivra à la fin de la fonction

$\Rightarrow$ allocation de la mémoire avec `malloc`

Fonction `malloc`

Réserve un certain nombre d'octets dans le tas : zone mémoire spécifique lors de l'exécution du programme

- En paramètre le nombre d'octets à allouer (pensez à `sizeof`)
- En retour : pointeur sur le début de la zone allouée (non initialisée), ou `NULL` en cas d'erreur
  - Quelle erreur peut-il se produire ?
- Nécessite `#include <stdlib.h>`

Exemple

```
int n = 1024;
int* tableau = malloc(n*sizeof(int));
if (tableau == NULL)
{
    printf("Erreur lors de l'allocation\n");
    // Gérer l'erreur ...
}

for (int i = 0; i < n; i++)
{
    tableau[i] = i;
}
```

Libération de mémoire avec `free`

Toute zone mémoire allouée dynamiquement doit être libérée !

```
free(tableau);
```

- Nécessite `#include <stdlib.h>`
- Une zone mémoire ne peut être libérée qu'une seule fois
- `free(NULL)` ne fait rien

Autres fonctions pour l'allocation dynamique

Allocation avec initialisation

```
void *calloc(size_t n, size_t size);
```

Alloue la mémoire pour stocker de façon contiguë `n` éléments de taille `size`, et rempli toute la zone mémoire allouée avec des zéros.

Changer la taille d'une zone mémoire allouée dynamiquement

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

Redimensionne à `size` octets la zone mémoire pointée par `ptr` allouée dynamiquement avant.
Renvoie un pointeur vers la zone mémoire redimensionnée, qui peut être différent de la zone initiale.

Autres fonctions utiles

(Pas spécifiques à l'allocation dynamique)

Nécessitent `#include <string.h>`

Initialiser une zone mémoire

```
void *memset(void* p, int c, size_t n);
```

Remplit les `n` premiers octets de la zone mémoire pointée par `p` avec l'octet `c`.

Copier une zone mémoire

```
void *memcpy(void* dest, void* src, size_t n);
```

Copie `n` octets depuis la zone mémoire `src` vers la zone mémoire `dest`.

Préprocesseur

Préprocesseur

- Étape juste avant de vraiment compiler le programme : agit sur le code source sans en comprendre la sémantique
- `cc -E` ou `cpp` pour voir le résultat produit par le préprocesseur
- Instructions qui commencent par `#`, n'importe où dans le code
  - Portée limitée au fichier source
  - Pas une construction du langage C : pas de `;` à la fin
  - Quelle instruction de préprocesseur a-t-on déjà utilisé ?
- Utile pour inclure des fichiers, définir des macros et faire de la compilation conditionnelle

- Par convention, tout ce qui est défini avec le préprocesseur est complétement en majuscules

Macros - Constantes

- Remplacement textuel
- **Attention aux priorités !**

```c
#include <stdio.h>

#define FOO 42
#define BAR (FOO + 3)
#define BAZ FOO + 3
#define TEXT "du texte en préprocesseur"

int main(int argc, char* argv[])
{
    printf("%d\n", FOO);
    printf("%d\n", BAR * 2);
    printf("%d\n", BAZ * 2);

    printf("Voilà "TEXT"\n");

    return 0;
}
```

Que va-t-il s'afficher ?

Macros - Constantes pas vraiment constantes

- `__LINE__` : numéro de ligne
- `__func__` : nom de la fonction (depuis C99)
- `__FILE__` : nom du fichier source
- `__DATE__` : date de compilation

```c
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf(
        "[%s:%d %s()] Compilé le %s\n",
        __FILE__,
        __LINE__,
        __func__,
        __DATE__
    );

    return 0;
}
```

```
[fichier.c:8 main()] Compilé le Oct 13 2023
```

Macros - "Fonctions"

```
#define MAX(__x, __y) \
    ((__x) > (__y) ? (__x) : (__y))
```

- \ permet de continuer la définition de la macro sur la ligne suivante
- Pourquoi autant de parenthèses ?

```
int m = MAX(foo(), bar());

int f = foo(), b = bar();
int mm = MAX(f, b);
```

- Combien y a-t-il d'appels à `foo` et `bar` dans les deux cas ? Dans quel cas cela peut-il poser problème ?

Macros - "Fonctions"

- ## permet de concaténer un terme et un paramètre

```
#define FONCTIONPLUS(type)                  \
type plus_##type(type a, type b)    \
{                                           \
    return (a + b);                         \
}

FONCTIONPLUS(int)   // Crée la fonction plus_int()
FONCTIONPLUS(float) // Crée la fonction plus_float()
```

#ifdef

- Permet d'inclure du code si une macro est définie ou exclure sinon
- Format :
  - `#ifdef` ... `#endif`
  - `#ifdef` ... `#else` ... `#endif`
- Si une macro n'est pas définie : `#ifndef`

```
#ifdef TYPE_DOUBLE
#define FLOTTANT double
#else
#define FLOTTANT float
#endif

// ...

FLOTTANT nombre = 1.8;
```

#if

- Comme `#ifdef`, mais évalue l'expression logique mêlant macros et constantes numériques

```
#define VERSION 2.0
#define TAILLE_INT 8

#if ((VERSION >= 1.3) || (TAILLE_INT == 8))
#define ENTIER long
#endif
```

#if defined

- Le mot-clé `defined` joue le même rôle que `#ifdef`, mais dans une expression `#if`

`#ifdef` $\Leftrightarrow$ `#if defined`
`#ifndef` $\Leftrightarrow$ `#if ! defined`

```
#define VERSION 2.0
#define DEBUG

#if ((VERSION >= 1.3) && (defined DEBUG))
...
#endif
```

Définition des macros par la ligne de commande

On peut définir les macros :

- Dans les fichiers sources
- Lors de la compilation avec les paramètres `-Dnom` ou `-Dnom=valeur` passé au compilateur

```
#ifndef FLOTTANT
#define FLOTTANT float
#endif

// ...

FLOTTANT nombre = 1.8;
```

```
cc main.c
cc -DFLOTTANT=double main.c
```

Directive de préprocesseur `#include`

- Remplace la ligne par le contenu du fichier spécifié
- Deux formes :
  - `#include <fichier>` : inclut le fichier en le cherchant dans les répertoires connus du compilateur pour contenir des fichiers d'en-tête. Surtout utilisé pour inclure des en-têtes système.
  - `#include "fichier"` : comme `#include <fichier>`, mais commence d'abord par chercher dans le dossier du fichier source. Surtout utilisé pour inclure des en-têtes du programme.
- Deux façons d'ajouter des répertoires contenant les fichiers à inclure :
  - Option `-I../include/` au compilateur
  - Variable d'environnement `C_INCLUDE_PATH="../include/"`

RTFM : https://gcc.gnu.org/onlinedocs/cpp/Search-Path.html

On n'inclut jamais de fichier `.c` !

cf la prochaine section pour comment gérer plusieurs fichiers `.c`

Doubles inclusions

grandparent.h :

```
struct foo_s {
    int number;
};
```

parent.h :

```
#include "grandparent.h"
```

enfant.c :

```
#include "grandparent.h"
#include "parent.h"
```

Que se passe-t-il à la compilation de enfant.c ?

Protection contre les doubles inclusions

grandparent.h :

```
#ifndef __GRANDPARENT_H
#define __GRANDPARENT_H
struct foo_s {
    int number;
};
#endif // !__GRANDPARENT_H
```

parent.h :

```
#ifndef __PARENT_H
#define __PARENT_H
#include "grandparent.h"
#endif // !__PARENT_H
```

enfant.c :

```
#include "grandparent.h"
#include "parent.h"
```

Utiliser ce mécanisme de garde-fou pour tous les fichiers d'en-tête !

Compilation séparée

Compilation séparée

Pour les programmes plus conséquents, on organise le code en **plusieurs fichiers sources** :

- Plus simple à maintenir
- Meilleure organisation
- Peut rendre la compilation plus rapide
- Les fonctions qui vont ensemble sont dans le même fichier

Exemple de découpage

main.c :

```c
int main()
{
  struct pers p;
  p.nom = "Camille";
  parler(&p, "Bonjour !");

  return 0;
}
```

personne.c :

```c
#include <stdio.h>

struct pers {
  char* nom;
};

void parler(struct pers* p,
    char* msg)
{
  printf(
    "%s dit '%s'\n",
    p->nom,
    msg
  );
}
```

Compilation

```
cc main.c personne.c
```

Est-ce que ça compile ?

Fichiers d'en-tête

On place dans un **fichier d'en-tête** l'interface publique qu'offre le fichier `.c` correspondant :

- Prototypes de fonctions
- Types : structures, énumérations, ...
- Définition de constantes et de macros

Les éléments propres au fichier `.c` (pas utilisés par d'autres fichiers `.c`) ne vont **pas** dans les fichiers d'en-tête !

Forme de programmation *par contrat* : en gardant le même fichier d'en-tête, on doit pouvoir changer le fichier `.c` par un autre fichier `.c` qui implémente toutes les fonctions déclarées dans le fichier d'en-tête.

Par convention, les fichiers d'en-tête ont l'extension `.h` (pour `h`eader).

Exemple de découpage

main.c :

```c
#include "personne.h"

int main()
{
  struct pers p;
  p.nom = "Camille";
  parler(&p, "Bonjour !");

  return 0;
}
```

personne.h :

```c
#ifndef __PERSONNE_H
#define __PERSONNE_H

struct pers {
  char* nom;
};

void parler(struct pers* p,
    char* msg);

#endif // !__PERSONNE_H
```

personne.c :

```c
#include <stdio.h>
#include "personne.h"

void parler(struct pers* p,
    char* msg)
{
  printf(
    "%s dit '%s'\n",
    p->nom, msg);
}
```

Compilation

```
cc main.c personne.c
```

Pourquoi ça compile ?

Autre découpage

main.c :

```c
#include "personne.h"

int main()
{
  struct pers* p = creer_pers("
      Camille");
  parler(p, "Bonjour !");
  liberer_pers(p);

  return 0;
}
```

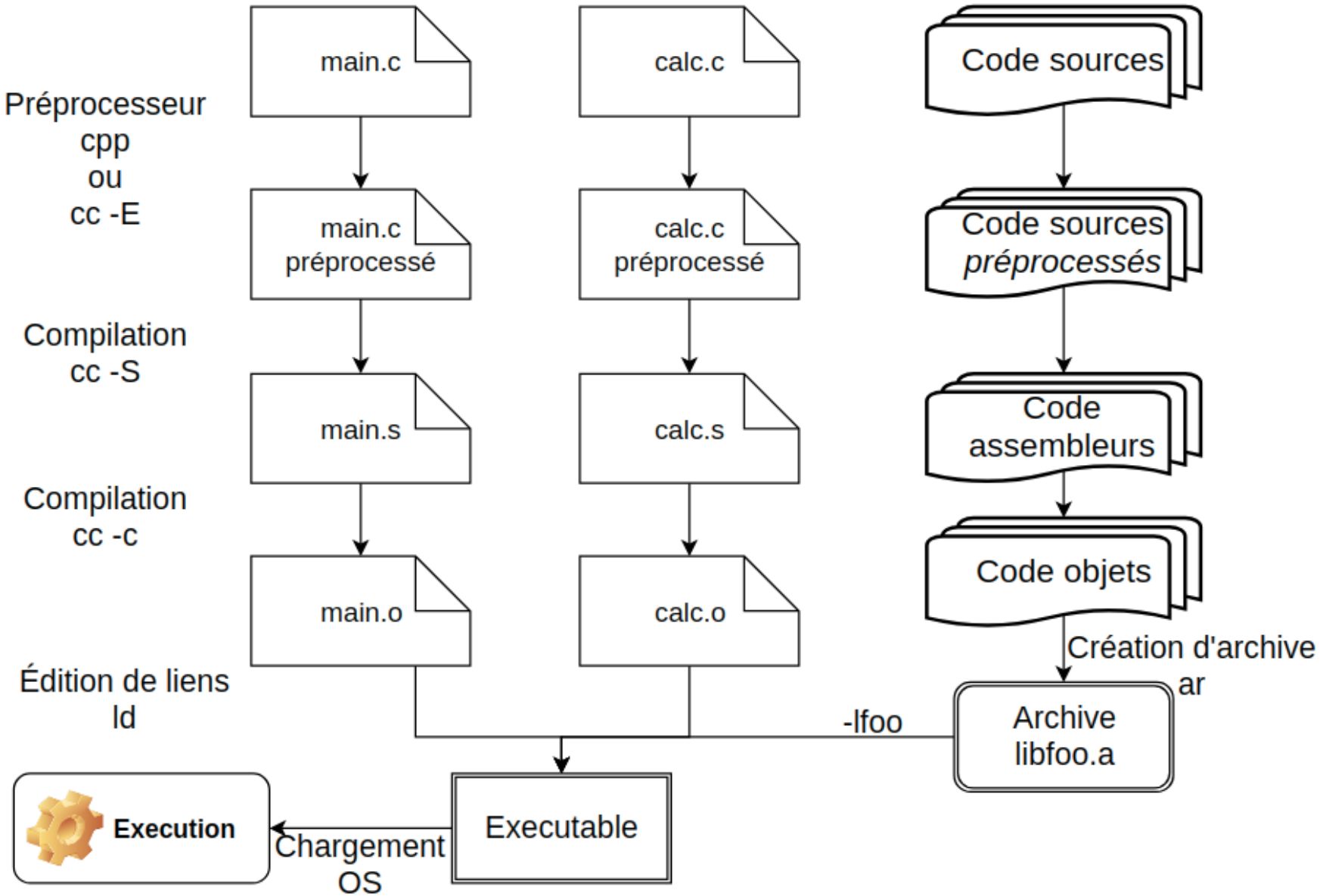
personne.h :

```c
#ifndef __PERSONNE_H
#define __PERSONNE_H

struct pers;

struct pers* creer_pers(char* nom)
    ;
void liberer_pers(struct pers* p);
void parler(struct pers* p, char*
    msg);

#endif // !__PERSONNE_H
```

personne.c :

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

struct pers {
  char* nom;
};

struct pers* creer_pers(char* nom)
{
  struct pers* p = malloc(sizeof(
      struct pers));
  p->nom = nom;
  return p;
}

void liberer_pers(struct pers* p)
{
  free(p);
}

void parler(struct pers* p, char*
    msg)
{
  printf("%s dit '%s'\n", p->nom,
      msg);
}
```

Chaîne de compilation



Compilation séparée

```
cc -c main.c -o main.o
cc -c personne.c -o personne.o
cc main.o personne.o -o main
```

donnera le même résultat que la commande suivante :

```
cc main.c personne.c -o main
```

Possibilité de faire un script Bash ou utiliser l'outil `make` pour automatiser la première méthode.

Quel est l'avantage de la première méthode ?

Autre découpage - modification

Modifions le second découpage pour ajouter une énumération définissant comment `struct pers` parle :

```
enum ton_e {
     PARLER,
     CHUCHOTER,
     CRIER,
     HURLER
};
```

- Quelle(s) modification(s) faut-il faire ?
- Dans quel(s) fichier(s) ?
- Où doit être déclarée l'énumération ?
- Que faut-il recompiler ?

Gestion de fichiers

Lecture et écriture de fichiers

Fonctionnement général

1. Ouverture du fichier → récupération d'un *descripteur de fichier*
2. Lecture / écriture
3. Fermeture du fichier

Deux interfaces disponibles

- Appels systèmes
  - Fonctions `open`, `close`, `read`, `write`, ...
  - Descripteur de fichier : `int`
  - Fonctions bas-niveau
  - Vues en IF210 Programmation système au S7
- **Fonctions de la bibliothèque C**
  - Fonctions `fopen`, `fclose`, `fread`, `fwrite`, `fprintf`, ...
  - Descripteur de fichier : `FILE*`
  - Vues dans la suite de ce cours

Ouverture d'un fichier

```
FILE* fopen(char* chemin, char* mode);
```

- `chemin` : chemin du fichier à ouvrir, absolu ou relatif par rapport au chemin depuis lequel est exécuté le programme
- `mode` :

Mode	Signification	Position	Existence du fichier
`"r"`	Lecture	Début	Doit déjà exister
`"r+"`	Lecture et écriture	Début	Doit déjà exister
`"w"`	Écriture, suppression du contenu déjà existant	Début	Peut être créé
`"w+"`	Lecture et écriture, suppression du contenu déjà existant	Début	Peut être créé
`"a"`	Écriture	Fin	Peut être créé

- renvoie un descripteur de type `FILE*`

`man fopen`

Fermeture d'un fichier

```
int fclose(FILE* fd);
```

- Quand on a fini de manipuler le fichier
- Toujours fermer un fichier ouvert : nombre de fichiers ouvert par processus limité (`ulimit -n`)

`man fclose`

Fonction d'écriture : `fwrite`

```
size_t fwrite(
    void* buffer,
    size_t taille,
    size_t n,
    FILE* fd
);
```

- Écrit dans `fd` `taille`×`n` octets situés à partir de l'adresse `buffer`
- Renvoie le nombre d'octets vraiment écrits (peut être différent de ce qui est demandé en cas d'erreur !)
- Déplace le curseur dans le fichier de ce qui a été écrit

Exemple d'écriture

```c
#include <stdio.h>

#define NB_NOMBRES 4

int main()
{
    FILE* fd = fopen("foo.txt", "w");
    if (fd == NULL)
    {
        printf("Erreur à l'ouverture\n");
        return 1;
    }

    int nombres[NB_NOMBRES] = {35, 17, 4, 1};

    size_t len_written = fwrite(nombres, sizeof(int),
        NB_NOMBRES, fd);
    if (len_written != NB_NOMBRES)
    {
        printf("Erreur à l'écriture\n");
    }

    fclose(fd);
    return 0;
}
```

Affichez le contenu du fichier `foo.txt`.
Que voyez-vous ? Pourquoi ?

Fonction d'écriture : `fprintf`

```c
int fprintf(FILE* fd, char* format, ...);
```

- Comme `printf`, mais on ajoute comme première paramètre le descripteur de fichier où écrire
- Écrit la chaîne de caractères formatée
- Déplace le curseur dans le fichier de ce qui a été écrit

Exemple

```c
fprintf(
    fd,
    "%d %d %d %d\n",
    nombres[0], nombres[1], nombres[2], nombres[3]
);
```

Affichez le contenu du fichier. Que voyez-vous ? Pourquoi ?

Fonction de lecture : `fread`

```
size_t fread(
    void* buffer,
    size_t taille,
    size_t n,
    FILE* fd
);
```

- Lit depuis `fd` `taille`×`n` octets vers l'adresse `buffer`
- Renvoie le nombre d'octets vraiment lus (peut être différent de ce qui est attendu en cas d'erreur !)
- Déplace le curseur dans le fichier de ce qui a été lu

Exemple de lecture

```c
#include <stdio.h>

#define NB_NOMBRES 4

int main()
{
    FILE* fd = fopen("foo.txt", "r");
    if (fd == NULL)
    {
        printf("Erreur à l'ouverture\n");
        return 1;
    }

    int nombres[NB_NOMBRES];

    size_t len_read = fread(nombres, sizeof(int), NB_NOMBRES, fd);
    if (len_read != NB_NOMBRES)
    {
        printf("Erreur à la lecture\n");
    }

    printf("%d %d %d %d\n", nombres[0], nombres[1], nombres[2],
        nombres[3]);

    fclose(fd);
    return 0;
}
```

Fonction de lecture : `fscanf`

```
int fscanf(FILE* fd, char* format, ...);
```

- Lit des chaînes de caractères depuis `fd` vers les zones mémoires dont les adresses sont passées en paramètre, selon le `format`
- `%s` s'arrête au premier espace rencontré
- Renvoie le nombre d'éléments trouvés
- Déplace le curseur dans le fichier de ce qui a été lu

Exemple

```
fscanf(
    fd,
    "%d %d %d %d\n",
    &nombres[0], &nombres[1], &nombres[2], &nombres[3]
);
```

Fonction de lecture : `fgets`

```
char* fgets(char* s, int size, FILE* fd);
```

- Depuis `fd`, lit vers `s` au plus `size`-1 caratères ou s'arrête après le premier `\n`
- Déplace le curseur dans le fichier de ce qui a été lu

Exemple

```
#define BUFFER_SIZE 64

char buffer[BUFFER_SIZE];
fgets(buffer, BUFFER_SIZE, fd);
```

Exercice : dictionnaire

Un fichier dictionnaire va contenir une entrée par ligne, sous le format :

```
mot définition avec plusieurs mots
```

La longueur d'un mot est limité à 20 caractères, celle de la définition à 100 caractères.

Programme `add_def`

Permet d'ajouter une entrée au dictionnaire :

```
./add_def t1 "Première année Télécom"
```

Programme `print_def`

Permet d'afficher une entrée du dictionnaire

```
./print_def t1
```

À vous de jouer !

Exercice : dictionnaire

Un fichier dictionnaire va contenir une entrée par ligne, sous le format :

```
mot définition avec plusieurs mots
```

La longueur d'un mot est limité à 20 caractères, celle de la définition à 100 caractères.

Programme `add_def`

Permet d'ajouter une entrée au dictionnaire :

```
./add_def t1 "Première année Télécom"
```

Programme `print_def`

Permet d'afficher une entrée du dictionnaire

```
./print_def t1
```

Bonus

Rendre le nom du fichier dictionnaire configurable à la compilation

Déplacer le curseur dans le fichier

```
int fseek(FILE* fd, long offset, int whence);
```

- `fd` : descripteur de fichier dont il faut déplacer le curseur
- `offset` : de combien d'octet déplacer le curseur par rapport à `whence` (peut être négatif)
- `whence` : origine de `offset`

`whence`	**Signification**
`SEEK_SET`	Début du fichier
`SEEK_CUR`	Position actuelle
`SEEK_END`	Fin du fichier

Descripteurs de fichiers toujours ouverts

Ces descripteurs sont automatiquement ouverts au début du programme et fermés à la fin.

- `stdin` : entrée standard (« *clavier* »)
- `stdout` : sortie standard (« *écran* »)
- `stderr` : sortie d'erreur (aussi « *écran* »)

`printf(...)` $\Leftrightarrow$ `fprintf(stdout, ...)`

Redirections :

```
./programme < entree > sortie_std 2> sortie_err
```

Vous en voulez encore ?

Récupérer une saisie utilisateur

- Fonction `scanf`
- Comme `fscanf`, mais lit directement sur l'entrée standard
- `%s` ne lira jamais d'espace

`scanf(...)` ⇔ `fscanf(stdin, ...)`

```c
#include <stdio.h>

#define STR_SIZE 10

int main()
{
    char prenom[STR_SIZE];
    int age;
    char ville[STR_SIZE];

    printf("%p %p %p\n", prenom, &age, ville);

    printf("Prénom âge ville ? ");
    scanf("%s %d %s", prenom, &age, ville);

    printf("%s, %d ans et habite à %s\n",
        prenom, age, ville
    );

    return 0;
}
```

- Pourquoi `&age` et pas `&prenom`, `&ville` ?
- Que renvoie `scanf` ?

Le danger de `scanf`

Exécuter le programme avec comme prénom `Jean-MichelTresLongPrenom` et comme ville `TresLongNomDeVilleARalonge`. Que se passe-t-il ? Pourquoi ?

Le danger de `scanf`

Utilisez plutôt `fgets` :

```c
#include <stdio.h>

#define STR_SIZE 10

int main()
{
    char buffer[3*STR_SIZE];

    printf("Prénom âge ville ? ");
    fgets(buffer, 3*STR_SIZE, stdin);

    printf("%s\n", buffer);

    return 0;
}
```

Comment ensuite récupérer le prénom, l'âge et la ville dans des variables séparées ?

Formats dans printf

%d, %u, %f, ..., mais aussi :

```
float f = 1024.2048, g = -2.12, h = 40960000.2048;
int a = -12, b = 13254;

// Notation scientifique avec 6 décimales :
printf("%e\n", f); // 1.024205e+03
printf("%e\n", h); // 4.096000e+07

// Affiche seulement deux décimales :
printf("%.2f\n", f); // 1024.20

// Préciser le nombre de caractères à utiliser
// (alignement à droite) :
printf("%5d\n", a);    //   -12
printf("%5d\n", b);    // 13254
printf("%8.2f\n", f); //  1024.20
printf("%8.2f\n", g); //    -2.12

// Préfixer par un caractère :
printf("%06d\n", b); // 013254
```

Pointeurs constants

Le terme situé après `const` est constant :

```
// l'adresse stockée dans ptr est constante :
// ("ptr pointe vers un int")
int* const ptr = &var1;
ptr = &var2; // interdit

// la valeur à l'adresse stockée dans ptr est const. :
// ("ptr pointe vers un const int")
int const* ptr = &var1;
const int* ptr = &var1; // équivalent
*ptr = 1; // interdit

// possibilité d'utiliser les deux en même temps :
const int* const ptr = &var1;
*ptr = 1; // interdit
ptr = &var2; // interdit
```

Beaucoup utilisé dans les types de paramètres de fonctions.

Pointeurs de fonctions

- Les instructions du programme sont chargées en mémoire → chaque fonction a une adresse.
- Possibilité de stocker cette adresse dans un pointeur de fonction.
- On peut ensuite appeler la fonction depuis le pointeur.
- Utile si on ne connaît pas à la compilation la fonction qu'il faudra exécuter (*callback*) ou pour factoriser le code.

Syntaxe

```
type_retour (*nom_ptr) (type_param1, type_param2);
```

Exemple

```
int (*compare)(const char*, const char*) = strcmp;
compare(s1, s2); // Compare en respectant la casse
compare = strcasecmp;
compare(s1, s2); // Compare en ignorant la casse
```

Variable locale statique

Rappel : la durée de vie d'une variable est celle de son bloc d'instructions parent (condition, boucle, fonction, ...).

La durée de vie d'une **variable locale statique** est celle du programme :

```c
void f(void)
{
    static int x = 0;
    printf("%d\n", x);
    x++;
}

int main()
{
    for (int i = 0; i < 3; i++)
    {
        f();
    }

    return 0;
}
```

Va afficher :

```
0
1
2
```

- Crée un *effet de bord*, la fonction n'est plus *pure*
- Quand même utile dans certains cas (patron de conception *singleton*, par exemple)

Variable globale

- Définition à l'extérieur des fonctions
- Portée dans tout le fichier source (et autres fichiers sources en utilisant `extern`)
- Durée de vie égale à la durée de vie du programme

```c
int a = 5;

void f(void)
{
    a++;
}

int main()
{
    f();
    f();
    printf("a = %d\n", a);

    return 0;
}
```

Variable globale

- Définition à l'extérieur des fonctions
- Portée dans tout le fichier source (et autres fichiers sources en utilisant `extern`)
- Durée de vie égale à la durée de vie du programme

main.c :

```c
#include "foo.h"

extern int a;

int main()
{
    f();
    f();
    printf("a = %d\n", a);

    return 0;
}
```

foo.c :

```c
int a = 5;

void f(void)
{
    a++;
}
```

foo.h :

```c
#ifndef __FOO_H
#define __FOO_H

void f(void);

#endif // !__FOO_H
```

Variable globale privée

Pour empêcher qu'une variable globale puisse être vue par un autre fichier :

```
static int a = 5;

void f(void)
{
    a++;
}
```

Fonction privée

Pour éviter qu'une fonction ne puisse être vue par un autre fichier :

```
static void f(void)
{
    a++;
}
```

- Évite les risques de conflits de nommage entre fonctions de fichiers différents
- Peut accélerer (un peu) la compilation

Résumé des visibilités des symboles

Par défaut

- Variable locale visible et valide uniquement dans le bloc d'instructions parent
- Variable globale visible et valide dans tout le programme
- Fonction visible dans tout le programme

`static` sur une variable locale

- La variable garde sa valeur entre les appels

`static` sur une variable globale ou une fonction

- La variable ou la fonction n'est plus visible en-dehors du fichier

`extern` sur une variable globale ou une fonction

- Cette variable globale ou fonction existe quelque part

Fonction `inline`

Indique au compilateur de remplacer l'appel à la fonction par le contenu de la fonction.

- Utilisé surtout avec de petites fonctions
- Lorsque les performances sont importantes : économise un appel de fonction

La fonction doit être définie `static` ou bien directement dans un fichier d'en-tête. Pourquoi ?

```
static inline int max(int a, int b)
{
    return a > b ? a : b;
}
```

Gestion des erreurs

Erreurs

- Mauvaise utilisation de vos fonctions : paramètre invalide, ...
- Erreur venant de l'utilisateur : fichier inexistant, ...
- Erreur système : pas assez d'espace sur le disque, pas assez de mémoire, ...

Gestion des erreurs

- Pas de mécanisme dédié (pas d'exception ou autre)
- Valeur de retour des fonctions (en cas d'erreur : différent de zéro, négatif, ...) : `int foo(params...);`
- Pointeur passé en paramètre pour récupérer le statut : `void foo(params..., int* status);`

Gestion des erreurs : errno

```c
#include <errno.h>
```

- Variable globale `int errno` contenant le dernier code d'erreur rencontré
- Utilisé par les fonctions système : gestion de fichiers, de la mémoire, ...
- Fonction `void perror(const char *s)` affiche le dernier code d'erreur avec comme préfixe la chaîne de caractères `s`

Exemple

```c
FILE* fd = fopen("inexistant.txt", "r");
if (fd == NULL)
{
    perror("Erreur à l'ouverture");
    return 1;
}
```

RTFM : `man errno`, `man perror` et les section ERREURS des pages de `man` des fonctions utilisées.

Exercice : utiliser `perror` dans `print_def.c`

Gérez les messages d'erreurs possibles dans `print_def.c` avec `perror()`.

À vous de jouer !

Fonction `assert()`

```c
#include <assert.h>
```

`assert(expr);` arrête le programme si `expr` est évalué à 0

- Aide au développement, programmation par contrat
- Permet de vous assurer que les conditions de validité de vos algorithmes sont respectées

Exemple

```c
int algo(int param)
{
    // TODO: make it work with param < 0
    assert(param >= 0);

    // ...
}
```

Fonction `assert()`

```c
#include <assert.h>
```

`assert(expr);` arrête le programme si `expr` est évalué à 0

- Aide au développement, programmation par contrat
- Permet de vous assurer que les conditions de validité de vos algorithmes sont respectées

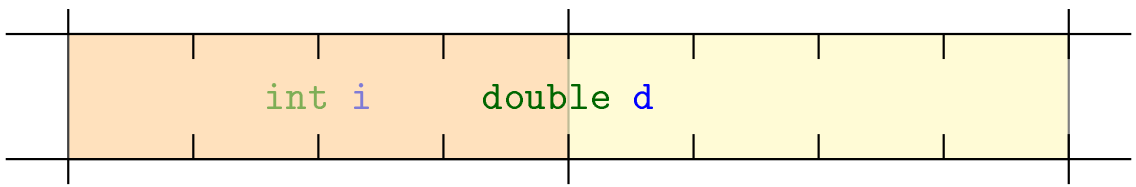
Les instructions `assert` peuvent être enlevées ! Il suffit de compiler avec `-DNDEBUG`

```c
FILE* fd = fopen(file, "r");
assert(fd); // Mal ! Pourquoi ?
```

Unions

- Comme une structure, mais seul un attribut peut-être utilisé en même temps
- Tous les membres se partagent le même espace mémoire
- La taille de l'union correspond à la taille de son plus grand membre

```c
union union_u {
    int i;
    double d;
};

int main()
{
    union union_u u;
    u.i = 2;
    u.d = 3.14; // u.i est écrasé
    printf("i: %d d: %lf\n", u.i, u.d);

    return 0;
}
```



Unions : exemple

Souvent utilisé conjointement avec une structure et une énumération

```
enum type_nombre_e {
    ENTIER,
    FLOTTANT
};

union nombre_u {
    int i;
    double d;
};

struct nombre_s {
    enum type_nombre_e type
        ;
    union nombre_u valeur;
};
```

```
struct nombre_s nombre = {
    ENTIER, {.i = 12}
};

switch (nombre.type)
{
    case ENTIER:
        printf(
            "%d\n",
            nombre.valeur.i
        );
        break;
    case DOUBLE:
        printf(
            "%lu\n",
            nombre.valeur.d
        );
        break;
}
```

Types anonymes

Pour les `struct`, `enum` et `union`, il est possible de ne pas nommer les nouveaux types, utilisés alors comme des *sous*-types :

```
struct nombre_s {
    enum {
        ENTIER,
        FLOTTANT
    } type;
    union {
        int i;
        double d;
    } valeur;
};
```

Conclusion

Conclusion

Vous connaissez maintenant (presque) toute la syntaxe du langage C et (presque) tous ses mécanismes.

Il n'y a plus qu'à mettre en pratique !

- 5 séances de TP
- S6 : PG110 Projet de programmation, S7 : RE216 Programmation réseau, S7 : IF210 Programmation système, ...

Quelques conseils pour progresser :

- Programmez ! Internet regorge d'exercices/concours de programmation
- Lisez du code C (le code source de tous les logiciels libres est accessible...)
- Lisez les messages d'erreur du compilateur
- RTFM : pages de `man`, votre moteur de recherche favori, StackOverflow, ...