Initiation à la programmation

Université Bordeaux 1

Année 2006-2007, Licence semestre 2

Plan du cours

Dans cette partie...

1– Informations pratiques

- Organisation de l'UE
- Modalités de contrôle
- Bibliographie
- Ressources internet
- Objectifs du cours

Organisation de l'UE

- **Cours : 12 séances 1h20**
  - Math Giuliana Bianchi `bianchi@labri.fr`
  - Info Marc Zeitoun `mz@labri.fr`
- **TD-TP : 12 séances 2h40**

Info
- Frédérique Carrère
- Marie-Christine Counilh
- Fabrice Dècle
- Stefka Gueorguieva
- Jean-Claude Ville

Math
- Gérard Giroux
- Catherine Pannier

- **Tutorat** : 12h–14h.
- **Web** : `http://dept-info.labri.fr/ENSEIGNEMENT/InitProg/`

Modalités de contrôle

- **1ère session**
  - CC
  - Examen 1h30
  - Note finale $\max(Ex, 3/4Ex + 1/4CC)$
- **2ème session**
  - Examen 2 1h30
  - Note finale $\max(Ex2, 3/4Ex2 + 1/4CC)$

Bibliographie

- Présentation claire et complète du langage C

A. Braquelaire.
Méthodologie de la programmation en langage C.
Norme C99, API POSIX. Dunod, Paris, 4ème éd. 2005.

- Plus denses, moins agréables mais de référence

B. W. Kernighan et D. M. Ritchie.
Le langage C, norme ANSI.
Masson, Paris, 1990.

S. P. Harbison et G. L. Steele Jr.
C : a reference manual (3rd ed.).
Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1991.

Ressources internet

- Nombreuses introductions : `http://mapage.noos.fr/emdel/`
- FAQ (Foire Aux Questions)
  - **`http://c-faq.com/`**
  - `http://www.faqs.org/faqs/fr/comp/lang/` (FR, 2003).
- Bibliothèque standard
  - Pages de manuel section 3. Par exemple **`man 3 printf`**.
  - `http://ccs.ucsd.edu/c/`
  - `http://www.utas.edu.au/infosys/info/documentation/C/`
- Normes
  - ANSI `http://www.lysator.liu.se/c/rat/title.html`
  - Corrections `tc1` et `tc2` à la norme ANSI : `ftp://dkuug.dk/JTC1/SC22/WG14/www/docs/tc1.htm`
  - C99 `http://wwwold.dkuug.dk/jtc1/sc22/open/n2794/`

Objectifs du cours

- Introduction à la programmation impérative en langage C.
- Pouvoir comprendre ou écrire un programme C
  - Correct — Utilisation du compilateur, du debugger.
  - Sûr — Pas de failles de sécurité.
  - Portable — Exploitable sur plusieurs machines.
  - Modulaire — Découpage logique en fonctions simples ⇒ facilement modifiable et extensible.
  - Efficace — Algorithmes, implémentation rapides.
  - Lisible — Commentaires, indentation, noms bien choisis.

Dans cette partie...

2– Langage C : présentation

- Caractéristiques du langage C
- Bref historique : de BPCL à C99
- Pourquoi des normes ?

Caractéristiques du langage C

- **Portable** Un programme C conforme aux normes est utilisable sur une grande variété de machines.
  Normes : ANSI, C-99, API POSIX,...
- **Puissant** Nombreux domaines d'application
  OS (Unix), réseau, BD, graphique...
- **Efficace** Permet de développer des programmes rapides.
- **Haut niveau** Détails hardware cachés au programmeur.
- **Souple** Très permissif, accès à la mémoire.
  $\Longrightarrow$ facile à aborder, difficile à bien maîtriser.

Bref historique : de BPCL à C99

- 1967 Langage BPCL (Richards, Bell Labs)
- 1970 Langage B (Thompson, BL)
  Pas de types, manipulation de mots machine
  $\Longrightarrow$ *programmes non portables*
  Structures de contrôle, pointeurs, récursivité.
- 1972 1er compilateur C (Kernighan, Ritchie, BL)
- 1978 1ère spécification publique du C
- 1989 Norme « ANSI » $\Longrightarrow$ C « ISO » ou « ANSI »
- 1999 Norme ISO/IEC 9899 : C99.

Pourquoi des normes ?

- Plusieurs vendeurs ont développé leur propre version du langage C.
- Ils ont proposé des extensions incompatibles entre elles.
- Norme : fournit une signification précise et unique des programmes.
- Un programme qui respecte la norme C99 est portable : on peut le déployer sur n'importe quelle architecture actuelle.
- Les programmes ne respectant pas la norme C99 seront (ici) considérés comme incorrects.

Dans cette partie...

3– Démarrage rapide en C

- Du source à l'exécutable
- Variables
- Tests
- Boucles
- Fonctions
- Bonnes habitudes de programmation

1er exemple : Hello, world !

```c
/* 1er programme source */

#include <stdio.h> /* pour la declaration de printf */

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


Premières remarques

- Un programme C contient des définitions de fonctions.
  - L'une d'elles s'appelle `main`.
- Les instructions sont exécutées séquentiellement à partir de la 1ère instruction de `main`.
- Le `;` (point-virgule) est un terminateur d'instruction.
- Les commentaires sont placés entre `/*` et `*/`.
- Le programmeur indique les groupes d'instructions avec des accolades `{...}` (l'indentation aide juste à la lisibilité).
- Un programme doit être traduit (compilé) avant d'être exécuté.

Compiler pour créer l'exécutable

- Contrairement à python, C est un langage compilé.
- Cela signifie qu'un programme C ne peut pas être exécuté tel quel.
- Il est nécessaire de le traduire en langage machine.
- La phase de traduction

  du langage C
  vers
  le langage machine

  s'appelle la compilation.
- La traduction est faite par un logiciel : le compilateur

Compiler pour créer l'exécutable

- Le programmeur écrit un programme source C.
- Il le traduit ensuite pour obtenir un exécutable :

- Une compilation réussie crée un fichier : l'exécutable (l'application).
- Il dépend de la machine sur laquelle on veut exécuter le programme.
- $\Longrightarrow$ on doit compiler une fois par architecture d'utilisation.
- Si le compilateur rencontre une erreur,
  - Il continue pour rechercher d'autres erreurs.
  - Il ne crée pas l'exécutable.

Compiler pour créer l'exécutable

- Avant d'exécuter le programme, on doit le traduire pour créer un fichier exécutable. Cette traduction s'appelle la compilation.
- On utilise le compilateur (= logiciel de traduction) `gcc`.
- `$ emacs HelloWorld.c`
- `$ gcc -Wall -std=c99 -o HelloWorld HelloWorld.c`
  compile le fichier `HelloWorld.c` dans lequel se trouve le source, et crée l'exécutable `HelloWorld`.
  - `-Wall` : `gcc` donne les principaux avertissements.
  - `-std=c99` : Conformité à la norme C99.
  - `-o` : Permet de nommer l'exécutable.
- `$ ./HelloWorld` exécute le fichier compilé.
- L'utilisation de l'exécutable ne nécessite plus le source.

Options importantes de gcc

- `-o` permet de nommer le fichier exécutable (`a.out` par défaut).
- `-Wall` indique des avertissements sur le code.
- `-Werror` produit une erreur à la place d'un avertissement.
- `-std=c99` se conforme à la norme C99.
- `-pedantic` avertit en cas de programme sortant de la norme.

Ces options aident le programmeur à détecter les erreurs.
On compilera systématiquement avec

`-std=c99 -Wall -Werror -pedantic`.

Autre option utile :

- `-g` permet d'utiliser ultérieurement le debugger.

Variables

- Contrairement à Python, on ne peut pas utiliser les variables avant de les avoir déclarées.
- Une déclaration permet entre autres de donner le type des variables.
- On utilisera au début des variables entières, de type `int`.
- Exemples de déclaration :
  `int x;` déclaration d'une variable `x` de type entier.
  `int x, y;` déclaration de deux variables `x` et `y` de type entier.

Exemple : variables

```c
#include <stdio.h>  /* pour la declaration de printf() */
#include "inf101.h" /* ... et de lire_entier() */

int main (void)
{
   int x;

   printf("Entrez un entier : ");
   x = lire_entier();
   printf("La variable x contient %d\n",x);
}
```

- Ce programme suppose qu'on a une fonction `lire_entier()` écrite ailleurs permettant de lire un entier au clavier.

Variables : deuxième exemple

```c
#include <stdio.h>
#include "inf101.h"

int main (void)
{
   int x;

   printf("Entrez un entier : ");
   x = lire_entier();
   printf("%d * %d = %d\n", x, x, x*x);
}
```


La fonction d'affichage `printf`

```c
printf("Hello world !\n");

printf("Entrez un entier : ");

printf("%d\n",x);

printf("La variable x contient %d\n",x);

printf("%d * %d = %d\n", x, x, x*x);
```


Exemple : tests

```c
#include <stdio.h>
#include "inf101.h"
int main (void) /* affiche la valeur absolue d'un entier */
{
   int x, y;

   printf("Entrez un entier : ");
   x = lire_entier();
   y = x;
   if (x < 0)
     y = -x;
   printf("|%d| = %d\n", x, y);
}
```

- Comme en python, il existe aussi une forme `if...else`.

Exemple : tests again

```c
#include <stdio.h>
#include "inf101.h"
int main (void) /* affiche le maximum entre deux entiers */
{
   int x, y;

   printf("Entrez un entier : ");
   x = lire_entier();
   printf("Entrez un autre entier : ");
   y = lire_entier();

   if (x < y)
     printf("Le maximum est %d\n", y);
   else
     printf("Le maximum est %d\n", x);
}
```


Exemple : boucles

```c
#include <stdio.h>
#include  "inf101.h"
int main(void) /* affiche la somme des entiers de 1 a n */
{
   int n, s = 0;

   printf("Entrez un entier : ");
   n = lire_entier();

   for (int i = 1; i <= n; i = i + 1)
      s = s + i;

   printf("La somme des entiers de 1 a %d vaut %d\n", n , s);
}
```

- Il existe d'autres mécanismes pour les boucles (par ex. `while`).

Exemple : fonctions

```c
/* 1er programme source, 2eme version */

#include <stdio.h>
void imprimer(void)   /* DÉFINITION de imprimer() */
{
    printf("Hello world !\n");
}

int main(void)
{
  imprimer();          /* APPEL de imprimer() */
}
```

⚠ Ne pas confondre définition et appel (= utilisation) d'une fonction.

Exemple 2 : fonctions

```c
int somme(int n) /* retourne la somme des entiers de 1 a n */
{
   int s = 0;

   for (int i = 1; i <= n; i = i + 1)
      s = s + i;

   return s;
}
```

Exemple 2 : fonctions, suite

```c
#include <stdio.h>
#include  "inf101.h"

/* Inserer ici la definition de la fonction somme */

int main (void)
{
  int n;

  printf("Entrez un entier : ");
  n = lire_entier();

  printf("La somme des entiers de 1 a %d vaut %d\n", n, somme(n));
}
```


Bonnes habitudes de programmation

- La compilation doit se faire sans erreur ni avertissement (warning).
- Une mauvaise indentation n'est pas sanctionnée ($\neq$ python).
  Les programmes doivent cependant être correctement indentés.
- Les noms des fonctions, variables, etc. doivent être
  - lisibles,
  - pertinents,
  - cohérents (conventions uniformes).
- Les programmes doivent être commentés.

Dans cette partie...

4– Constructions fréquentes

- Premiers types de base
- Les types `int`, `double`, `char`
- Exemples
- Le type `bool`
- Quelques opérateurs arithmétiques
- Quelques opérateurs logiques
- Affectation
- Tests : `if` et `if...else`
- Boucle `for`
- Boucle `while`

Premiers types de base

En C toute variable a un type.
Le type détermine :

- l'ensemble des valeurs qu'une variable peut prendre,
- la façon dont ces valeurs sont stockées en mémoire,
  (souvent dépendant de l'implémentation).
- les opérations applicables à la variable.

Quelques types prédéfinis de base :

- `int` : entiers
- `double` : flottants (nombres avec partie décimale)
- `char` : caractères
- `bool` : Booléens

Il y a d'autres types entiers et d'autres types flottants.

Les types int, double, char

- int :
  - La taille de l'intervalle d'entiers réprésenté dépend de la machine et tend à augmenter (un nombre de type int est souvent codé, actuellement, sur 4 octets).
  - ⇒ ne pas faire d'hypothèse sur la taille d'un int.
- double : pour réprésenter les nombres flottants en double précision
  - la précision dépend de la place utilisée pour coder la partie décimale
- char : permet de représenter le jeu de caractères de base.
  - Constantes entre *quotes* : 'X'. Ne pas confondre '0' et 0.

Type double : un exemple

```c
#include <stdio.h>
#include  "inf101.h" /* pour la declaration de lire_flottant() */

int main (void) /* calcul de la surface du cercle */
{                          /* de rayon r */
   double r;
   double pi = 22.0 / 7;  /* approximation de pi */

   printf("Entrez un nombre: ");
   r = lire_flottant();

   printf("Rayon = %g, Surface = %g\n", r, r * r * pi );
}
```


Type char : un exemple

```c
#include <stdio.h>
#include  "inf101.h" /* pour la declaration de lire_caractere() */

int main (void)
/* on affiche le caractere suivant dans le code ASCII */
{
   char x;

   printf("Entrez un caractere: ");
   x = lire_caractere();

   printf("%c est le caractere qui suit %c\n", x+1, x);
}
```


Le type bool

Le type Booléen (bool)

- n'a que 2 valeurs possibles : true et false,
- on l'utilise pour exprimer les résultats d'une expression logique,
- a été introduit dans la norme C99,
- il faut ajouter la directive :

  #include <stdbool.h>

  aux fichiers sources dans lesquels on l'utilise.
- en mémoire true est codé par l'entier 1, false est codé par l'entier 0.
- Dans une condition, toute expression
  - non nulle est considérée comme vraie ;
  - nulle est considérée comme fausse.

Quelques opérateurs arithmétiques

Dans l'ordre de priorité décroissante :

- `+` `-` unaires — signe
- `*` `/` `%` — opérateurs arithmétiques
- `+` `-` — opérateurs arithmétiques
- `=` — affectation

Donc $x + y * 2$ correspond à $x + (y * 2)$

⚠ La division `/` n'a pas le même sens sur entiers et flottants.

Quelques opérateurs logiques

Dans l'ordre de priorité décroissante :

- `!` — NON logique
- `<` `>` `<=` `>=` — comparaisons (calcule un Booléen)
- `==` `!=` — comparaisons (calcule un Booléen)
- `&&` — ET logique
- `||` — OU logique.

Donc $x < y == z > t$ correspond à $(x < y) == (z > t)$

En C, l'évaluation des opérateurs `&&` et `||` est «paresseuse».

Affectation

- Permet de mémoriser une valeur.
- Affectation de variable :

  `<nom_variable>` = `<expression>`
- Plus généralement :

  `<l_valeur>` = `<expression>`
- `l_valeur` : expression qui a une adresse. Typiquement : variable.
- L'affectation
  - évalue (calcule) l'expression,
  - puis, range la valeur calculée à l'adresse de la `l_valeur`.
  - est elle même une expression qui s'évalue comme `<expression>`.

Affectation : exemples

```c
int a, b, c;

a = 3;
b = 4;
c = 5;

c = a - 1;      /* c vaut 2 maintenant */
b = b + 1;      /* b vaut 5 maintenant */
a = a + b + c; /* a vaut 3+5+2, soit 10 maintenant */
a + b = 2;      /* INTERDIT ! */
                /*
                 * car a + b n'a pas d'adresse,
                 * contrairement a a, b, ou c.
                 */
```

Tests

- Deux instructions similaires : `if` et `if...else`.

```
if (<expression>)
    <instruction ou bloc>vrai
```

```
if (<expression>)
    <instruction ou bloc>vrai
else
    <instruction ou bloc>faux
```

- Permettent d'exécuter ou non des instructions, suivant la validité de la condition indiquée par l'expression.
- L'expression Booléenne peut utiliser les opérateurs
  - `&&` (ET logique)
  - `||` (OU logique).
  - `!` (NÉGATION logique).

Instruction `if`

```
if (<expression>)
    <instruction ou bloc>vrai
```

- L'expression est évaluée. Si elle est
  - non nulle, le test réussit et `<instruction ou bloc>`$_{vrai}$ est exécuté.
  - nulle, le test échoue. On passe alors à l'instruction qui suit `<instruction ou bloc>`$_{vrai}$, qu'on n'exécute pas.
- Si on veut exécuter plusieurs instructions en cas de test réussi, on doit les mettre dans un bloc, entre `{...}`.
- S'il n'y a qu'une instruction, les accolades ne sont pas nécessaires.

Instruction `if` : exemple

```c
#include <stdio.h>

int maximum(int a, int b)
{
  int res;

  res = a;
  if (b > a)

    res = b;


  return res;
}
```


Instruction `if` : exemple

```c
#include <stdio.h>

int maximum(int a, int b)
{
  int res;

  res = a;
  if (b > a)
  {
    res = b;
    printf("Le maximum de %d et %d est %d\n", a, b, res);
  }
  return res;
}
```

Instruction if...else

```
if (<expression>)
    <instruction ou bloc>vrai
else
    <instruction ou bloc>faux
```

- L'expression est évaluée. Si elle est
  - non nulle, le test réussit et <instruction ou bloc>$_{vrai}$ est exécuté.
  - nulle, le test échoue et <instruction ou bloc>$_{faux}$ est exécuté.
- Si on veut exécuter plusieurs instructions sous le if ou le else, on doit les mettre dans un bloc, entre {...}.
- Sinon, les accolades ne sont pas nécessaires.

Instruction if...else : exemple

```c
#include <stdio.h>

void
est_divisible_par(int n, int i)
{
   if (n % i == 0)
      printf("%d est divisible par %d\n", n, i);

   else
      printf("%d n'est pas divisible par %d\n", n, i);
}
```

Quelle précaution prendre pour utiliser cette fonction ?

Boucle for

```
for (<expr1>;<expr2>;<expr3>)
    <instruction ou bloc>
```

- <expr1> est une expression d'initialisation exécutée une seule fois (au début de l'exécution de la boucle.
- <expr2> est un test (d'arrêt) exécuté avant chaque itération.
- <expr3> est une expression, modifiant au moins une variable de <expr2>, exécutée à la fin de chaque itération.

<expr1>, <expr2> ou <expr3> peuvent être vides.

```c
for ( ; ; ) /* boucle infinie ! */
  ;
```


Boucle for : exemple

```c
#include <stdio.h>

void
afficher_somme_impairs(int n, int m)
 /* affiche la somme des nombres impairs entre n et m inclus */
{
   int res = 0; /* initialisation */

   for (int i = n + (1-n%2); i <= m; i = i + 2)
     res = res + i;

   printf("Somme des impairs entre %d et %d: %d\n", n, m, res);
}
```

Boucle for : exemple 2

```c
#include <stdio.h>

void
afficher_majuscules (void)
 /* affiche les 26 caract\'eres cons\'ecutifs apr\`es 'A' */
{

   for (char x = 'A' ; x <= 'Z'; x = x+1)
     printf("%c ", x);

   printf("\n");
}
```


Boucle for : exemple 3

```c
#include <stdio.h>
#include "inf101.h"

int somme_suite_entiers (int n)  /* calcule la somme de n entiers */
{                                          /* rentres au clavier */
   int k;
   int som = 0;

   for (int i = n ; i > 0 ; i = i-1)
     {
       printf("Entrez un entier: ");
       k = lire_entier();
       som = som + k;
     }
   return som;
}
```


Boucle while

```
while (<expression>)
    <instruction ou bloc>
```

1. L'expression est évaluée.
2. Si elle est fausse, on sort du `while`, on passe à l'instruction suivante.
3. Si elle est vraie,
   - `<instruction ou bloc>` est exécuté,
   - puis on revient en 1.

Exemple

```c
while (true) /* boucle infinie ! */
  ;
```


Boucle while : exemple

```c
#include <stdio.h>

void
afficher_puissances(int k, int nmax)
{
   int i = 1;   /* initialisation */

   while (i <= nmax)
   {
      printf("%d\n", i);
      i = i * k;
   }
}
```

Boucle `while` : exemple 2

```
bool est_premier(int n)
{
   int i = 2;
   while (i*i <= n)
   {
      if (n % i == 0)
      {
         printf("%d est divisible par %d\n", n, i);
         return false;
      }
      i++;
   }
   printf("%d est premier\n", n);
   return true;
}
```


Dans cette partie...

5– Types structurés 1 : tableaux

- Tableaux
- Chaînes de caractères : principes
- Arguments de la fonction `main`

Tableaux

- Ils permettent de mémoriser plusieurs éléments du même type.

  <type> <identificateur> $[n_1][n_2]....[n_k]$

  - C90 : $n_1, n_2, \ldots, n_k$ sont des expressions constantes.
  - C99 : $n_1, n_2, \ldots, n_k$ peuvent être des expressions ou $*$.
  - Le tableau a k dimensions.
  - Les indices de la j-ème dimension varient de 0 à $n_j - 1$.
- Exemples

```
char T[10];    // tableau T de 10 caracteres.
int mat[5][3]; // "matrice" d'entiers mat, 5 lignes, 3 colonnes.

T[0] = 'a';      // affectation de la 1ere case de T.
mat[4][2] = 12;  // affectation de la "derniere" case de mat.
```


Tableaux : un exemple

- Remplir le tableau `T` pour que `T[i]` contienne `i * i`

```
int T[10];

for(int i = 0; i < 10; i++)
  T[i] = i * i;
```

- Remplir la matrice 5×3 pour que `mat[i][j]` contienne `i + j`

```
int mat[5][3];

for(int i = 0; i < 5; i++)
  for(int j = 0; j < 3; j++)
    mat[i][j] = i + j;
```

Tableaux : premières utilisations

- Saisir un tableau d'entiers.
- Afficher un tableau d'entiers.
- Rechercher si une valeur est dans un tableau d'entiers.
- Rechercher le premier indice d'un tableau d'entiers contenant la valeur maximale.
- Échanger le contenu de la première case contenant la valeur maximale avec le contenu de la dernière case.
- Trier un tableau (tri par sélection).
- Trier un tableau (tri à bulles).

Fonctions écrites dans les fichiers suivants (cliquer sur les liens) :

- TrisTableau.c,
- TrisTableau.h.

Chaînes de caractères : principes

- Les chaînes sont mémorisées dans des tableaux de caractères terminés par `'\0'`.
- Par exemple la chaîne `"toto"` est mémorisée comme :

't'	'o'	't'	'o'	'\0'

- Un type possible pour représenter les chaînes est `char []` (tableau de caractères).
- On rencontre aussi `char *`, dont on verra la signification plus tard.
- Plusieurs fonctions sont prédéfinies pour les chaînes.
- Ex. comparaison : `strcmp`, longueur `strlen`. (inclure `string.h`).

Chaînes : exemples

- Calculer la longueur d'une chaîne (reprogrammer `strlen`).
- Comparer 2 chaînes.
- Copie de chaînes.
- Passage d'une chaîne alphabétique en minuscules.

Chaînes de caractères : bibliothèque

- La bibliothèque prédéfinit plusieurs fonctions de manipulation de chaînes. Parmi elles
  - `strlen` : longueur d'une chaîne.
  - `strcmp`, `strncmp` : comparaison de chaînes.
  - `strncat` : concaténation de chaînes.
  - `strcpy`, `strncpy` : copie de chaînes.
- ⚠ Ne pas confondre caractères et chaînes de caractères.

```
char c  = 'A';
char *s = "A";
```

- Des fonctions de manipulation de caractères sont aussi utiles. Voir les pages de manuel de `isalpha` et `tolower`.

La fonction `main`

- Pour permettre le passage d'arguments à la fonction `main`, on la définit de la façon suivante :

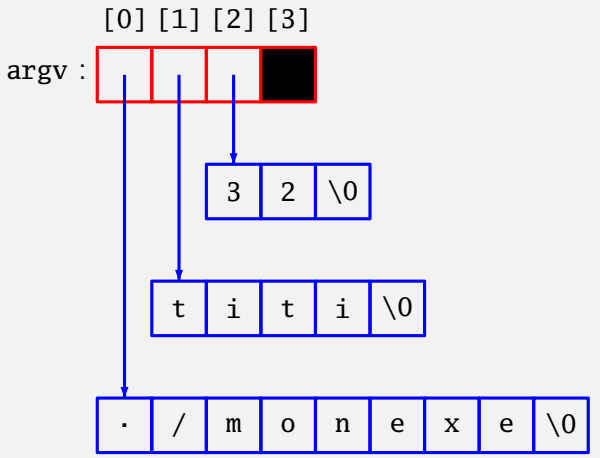
```
int main (int argc, char *argv[])
{
  ......
}
```

`argc` initialisé par le nombre d'arguments avec lesquels l'exécutable correspondant est lancé.

`argv` tableau de chaînes de caractères initialisé par les arguments avec lesquels l'exécutable correspondant est lancé.

Arguments de main

Au lancement de la commande shell `./monexe titi 32`



Arguments de `main`

⚠ Ne pas confondre
- les arguments avec lesquels l'utilisateur appelle le programme,
- les arguments de `main`.

- Formellement, si `main` est définie par

```
int main (int nb_a, char *a[]){...}
```

`main` a deux arguments :
- `nb_a` (entier) et
- `a` (tableau de chaînes de caractères).

- Le nom du fichier exécutable par lequel est lancée la commande est considéré comme le premier argument.
- `argv[0]` contient donc ainsi le nom de l'exécutable lancé.

Dans cette partie...

6– Les variables

- Qu'est-ce qu'une variable ?
- Identificateurs
- Portée
- Masquage
- Définitions et déclarations
- Représentation de l'information
- Classes d'allocation
- Initialisation
- Types de base
- Types de base : tailles, valeurs

Qu'est-ce qu'une variable ?

- Une variable permet de mémoriser des valeurs.
- Un emplacement en mémoire (adresse) lui est attribué.
- Une définition de variable définit :
  - son nom : un « identificateur ».
  - sa portée : les portions de code où on peut l'utiliser.
  - son type : les valeurs qu'elle peut prendre, les opérations possibles.
  - sa classe d'allocation : indique la zone mémoire où elle est stockée.
  - sa valeur initiale, éventuellement.
- Certaines de ces caractéristiques peuvent être définies, en partie ou complètement, par la place de la définition dans le source C.
- Exemple de définition :

```
static int x = 1234;
```


Identificateurs

Le nom d'une variable est un identificateur.

- commence par une lettre `a,...,z, A,...,Z` ou _.
- peut contenir les caractères `a,...,z, A,...,Z, 0,...,9,_`.
- jusqu'à 31 caractères significatifs.
- les compilateurs actuels différencient majuscules e minuscules.
- La norme précise des limitations (rarement suivies).

⚠ Ne pas utiliser _ en début d'identificateur.

Portée

- Portée d'une variable = partie du programme où on peut l'utiliser.
- Une variable définie hors du corps de toute fonction est globale.
- Une variable définie dans le corps d'une fonction est locale.
- On ne peut utiliser une variable que dans le corps d'une fonction.
- On peut utiliser une variable globale
  - dans toute fonction du fichier après sa définition, et
  - dans un autre fichier en la déclarant avec le mot réservé extern.
- Une déclaration annonce au compilateur qu'une variable (globale) est definie dans un autre fichier, en donnant son type.
- Exemple de déclaration :

```
extern int x;
```


Variables locales

- Une variable définie dans le corps d'une fonction est dite locale.
- Le corps d'une fonction contient des blocs emboîtés les uns dans les autres, délimités par { et }.
- Chaque bloc contient ses définitions de variables, suivies d'instructions et de sous-blocs.
- La portée d'une variable locale est limitée au bloc dans laquelle elle est définie, et à ses sous-blocs.
- La position des définitions de variables dans le programme influe donc sur leur portée.
- En C99, on peut définir des variables de boucles.

Portée : exemple

```
int x;
void f(int a)
{
   int y;
   /* ..... */
   {
      int z;
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```


Portée : exemple

```
int x;                  /* Portee de x */
void f(int a)
{
   int y;
   /* ..... */
   {
      int z;
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```


Portée : exemple

```
int x;
void f(int a)           /* Portee de a */
{
   int y;
   /* ..... */
   {
      int z;
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```


Portée : exemple

```
int x;
void f(int a)
{
   int y;               /* Portee de y */
   /* ..... */
   {
      int z;
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```

Portée : exemple

```
int x;
void f(int a)
{
   int y;
   /* ..... */
   {
      int z;          /* Portee de z */
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```


Portée : exemple

```
int x;
void f(int a)
{
   int y;
   /* ..... */
   {
      int z;
      /* ..... */
   }
   /* ..... */
}

int t;                /* Portee de t */
void g(void)
{
   /* ..... */
}
```


Masquage

- On dit qu'une variable est visible dans les blocs de sa portée.
- Si 2 variables de même nom sont visibles dans le même bloc, le nom fait référence à la variable définie dans le bloc le plus interne.
- En cas de conflit de nom, la variable définie dans le bloc le plus interne masque l'autre.

Masquage : exemple

```
#include <stdio.h>
int x = 7;
int main(void)
{
   printf("x = %d\n", x);          // affiche 7
   {
      int x = 10;
      printf("x = %d\n", x);       // affiche 10
      {
         int x = 3;
         printf("x = %d\n", x);    // affiche 3
      }
      printf("x = %d\n", x);       // affiche 10
   }
   printf("x = %d\n", x);          // affiche 7
}
```

Définitions et déclarations

- Une variable doit être définie ou déclarée avant d'être utilisée.
- la déclaration associe un type avec un nom de variable.
- la définition, en plus
  - demande l'allocation mémoire pour la variable,
  - donne une valeur initiale.

Déclarations de variables globales

- Une déclaration « promet » au compilateur qu'il y a une variable ayant ce type et ce nom, définie
  - soit dans un autre fichier source,
  - soit dans une bibliothèque.
- Les déclarations permettent d'utiliser les variables globales dans plusieurs fichiers.
- Pour chaque variable, il y a une définition et éventuellement plusieurs déclarations.
- Une déclaration fait référence à une définition dans une autre partie du programme.

Représentation de l'information

Unités

- Bit = Binary digIT, unité de stockage pouvant coder 2 valeurs.
- Octet = paquet de 8 bits
- Byte : plus petit paquet adressable :
  - Un byte doit pouvoir coder le jeu de caractères de base.
  - Un byte est formé d'une séquence contiguë de bits.
- Mot : un processeur peut traiter simultanément plusieurs bytes,
- Souvent (actuellement) :
  - 1 byte = 8 bits = 1 octet.
  - Données codées sur un nombre entier d'octets.
  - Exemple : représentation des caractères. Codes ASCII, EBCDIC,...
    - ASCII 'A' est codé par 65, '0' par 48, ...
    - EBCDIC 'A' est codé par 193, '0' par 240, ...
- Le programmeur n'a pas besoin de connaître ces valeurs.

Un codage des entiers non signés

- Base 2

1	0	1	1	0	0	0	1	
2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	représente
$2^7 +$		$2^5 +$	$2^4 +$				2^0	$= 177$

- Sur $n+1$ bits, $a_n...a_1a_{0(2)}$ représente $a_0 + 2a_1 + ... + 2^n a_n$
  Ex : $base_2(177) = 10110001_{(2)}$ = représentation de 177.
- Sur n bits, ce codage permet de représenter les entiers allant
  - de 0 : $\underbrace{000...0_{(2)}}_{n \text{ fois}}$
  - à $2^n - 1$: $\underbrace{111...1_{(2)}}_{n \text{ fois}}$.

Un codage des entiers signés

- Entiers > 0 ou < 0 : codage en complément à 2.
- Permet de coder les entiers de -2^{n-1} à $2^{n-1} - 1$
- Sur n bits, pour $k > 0$:
  - $code(k) = base_2(k)$
  - $code(0) = base_2(0) = 00\cdots0$
  - $code(-k) = base_2([(2^n - 1) - k] + 1))$
- Exemple : sur n = 3 bits

	100	101	110	111	000	001	010	011
Signés	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
Non signés	4	5	6	7	0	1	2	3

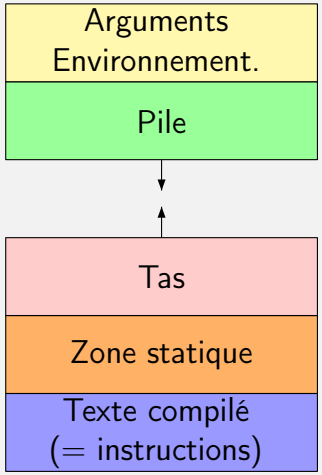
⚠ Débordement arithmétique.

⚠ Ne pas mélanger signés et non signés dans les calculs.

Allocation

- Allouer une variable, c'est lui réserver un emplacement en mémoire.
- Une définition est en particulier une demande d'allocation.
- La place d'une variable peut être, selon les cas, réservée dans :
  - la zone statique,
  - la pile,
  - le tas, ...
- Les arguments d'une fonction et les variables locales non statiques sont alloués sur la pile.
- Les variables globales et celles déclarées `static` sont allouées en zone statique.

Schéma conceptuel de la mémoire



- La zone statique et le texte sont fixés avant le lancement.
- Les arguments sont initialisés au lancement du programme.
- La pile et le tas évoluent pendant l'exécution.

Classe d'allocation

- La classe d'allocation détermine
  - où en mémoire est conservée la variable,
  - si l'allocation est permanente ou temporaire.
- une variable automatique (locale non statique) est
  - allouée sur la pile d'exécution,
  - seulement pendant que son bloc est actif.
- une variable globale ou statique
  - est allouée en zone statique,
  - a une existence permanente en mémoire.

Classes d'allocation

Une variable peut être :

- statique : allouée dès la compilation, possède un emplacement mémoire pendant toute la durée d'exécution du programme.
  - Les variables globales,
  - Les variables explicitement déclarées `static`.
- automatique : allouées seulement lors de l'entrée dans leur bloc.
  - Les autres variables locales.
- allouée : ce point sera vu plus tard (`malloc.h`).

Les variables automatiques

- sont plus économiques que des variables globales/statiques
  - mémoire allouée seulement lors de l'exécution d'une fonction.
- rendent le programme plus lisible.
- ⚠ Ne pas utiliser des variables globales inutilement.

Variables statiques

- On peut déclarer une variable statique par le mot-clé `static`.
- Les variables statiques ont une existence (une adresse allouée) pendant toute la durée d'exécution du programme.
- Elles sont initialisées à 0 sauf si initialisation explicite.
- Différence entre

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

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


Durée de vie vs. portée

- La durée de vie des variables allouées en zone statique est celle de l'exécution du programme.
- La durée de vie des variables d'une fonction `f` allouées sur la pile est la même que la durée d'appel de `f` (en fait de leur bloc).

⚠ Ne pas confondre

- Durée de vie (temporelle, à l'exécution)
- Portée (spatiale, dans le source)

Initialisation

- On peut initialiser une variable lors de sa définition.
- La variable sera alors initialisée à chacune de ses allocations.
- Exemple

```c
int x = 3;
```

- Les variables globales/statiques sont initialisées
  - 1 seule fois,
  - à 0 par défaut (en l'absence d'initialisation explicite).
- Les variables locales automatiques (non statiques)
  - ne sont pas initialisées automatiquement.
  - en l'absence d'initialisation explicite, elles contiennent donc à leur création une valeur arbitraire,

  $\Longrightarrow$ doivent être initialisées ou affectées avant chaque 1ère utilisation.
- On utilisera pour l'instant des initialiseurs constants.

Types de base

- Plusieurs types prédéfinis sont utilisables.
  - `char` : caractère.
  - `short int`, `int`, `long int`, `long long int` : entier.
  - `float`, `double`, `long double`.
  - `bool` : Booléens (`stdbool.h`).
  - `float complex`, `double complex`, `long double complex` (`complex.h`).
  - `float imaginary`, `double imaginary`, `long double imaginary`.
- Les types caractère ou entier peuvent être `signed` ou `unsigned`.
- Les types entiers sont `signed` par défaut.
- Le type `char` est `signed` ou `unsigned` selon l'implémentation.

Types de base

- `char` : permet de représenter le jeu de caractères de base.
  - Codés en général sur un octet (mais pas nécessairement).
  - Même comportement que soit `unsigned char`, soit `signed char`.
  - Constantes entre *quotes* : `'X'`. Ne pas confondre `'0'` et 0.
- Les différents types entiers diffèrent par
  - l'intervalle qu'ils permettent de représenter,
  - l'arithmétique, signée ou non.
- Les **flottants** représentent des nombres avec parties décimales. La précision dépend de la place utilisée pour les coder.
  - `float` : simple précision
  - `double` : double précision
  - `long double` : précision étendue
- `void` : type vide pour les fonctions sans argument ou sans retour.

Taille des types de base

- L'espace mémoire qu'occupent les différents types dépend de la machine et du compilateur.
- L'opérateur `sizeof` permet de connaître la taille d'un type.
- On a toujours :
  - `sizeof(short)` $\leqslant$ `sizeof(int)` $\leqslant$ `sizeof(long)` $\leqslant$ `sizeof(long long)`
  - `sizeof(float)` $\leqslant$ `sizeof(double)` $\leqslant$ `sizeof(long double)`

Taille des types, limites

- Pour tout type de base, les limites indiquent la plus petite et la plus grande valeur autorisée.
- Ces valeurs se trouvent dans le fichier **`<limits.h>`**
- Exemple : les valeurs minimale et maximale du type `short int` sont données par les constantes. Typiquement :
  - `SHRT_MIN` valant -2^{16},
  - `SHRT_MAX` valant $2^{16} - 1$.
- `unsigned` : calcul modulo le plus grand entier représentable.
- `signed` : un dépassement de capacité provoque typiquement
  - un « cycle » positifs $\Longleftrightarrow$ négatifs,
  - une erreur.

Tailles typiques

- `char` 8 bits = 1 octet
- `short` 16 bits = 2 octets
- `long` 32 bits = 4 octets
- `float` 32 bits = 4 octets
- `double` 64 bits = 8 octet

- Des conversions peuvent se produire pendant les calculs.
- Par ex, si on affecte un entier $>$ `USHRT_MAX` à un `unsigned short`.
- La fonction `printf` effectue aussi des conversions.
- Un cast demande une conversion explicite :

```
(unsigned short)(123456789)
```


Constantes

- Chaque type fournit ses propres constantes.
  - entier décimal `int` `1234`
  - entier octal `int` `02322`
  - entier hexadécimal `int` `0x4d2`
  - entier hexadécimal `long` `0x4d2L`
  - entier hexa `unsigned long` `0xffffffff`
  - flottant `double` `12.3`, `123e-1`, `.123e2`
  - caractère `char` `'a' '%' '\n' '\0' '0'`
  - chaîne de caractères `char *` `"une chaine\n"`

- Des règles déterminent le type d'une constante entière.
- Par exemple, une constante décimale est du premier type qui peut la représenter, parmi `int`, `long` ou `long long`.

Dans cette partie...

7– Notion d'expression

- L'affectation
- Expressions et effets de bord
- Opérateurs
- Opérateurs logiques

Notion d'expression

- Une expression est une entité qui se calcule.
- Exemple : `(((x + 3) * 2) != 0)`.
- Une expression peut faire intervenir
  - des variables : `x`,
  - des constantes : `2`, `3`
  - des opérateurs : `+`, `*`, `!=`.
- Une expression a donc un type. L'exemple calcule un Booléen.
- En plus du calcul, certaines expressions peuvent faire autre chose
  - changer la valeur de variables,
  - provoquer des affichages,...
- On dit qu'elles sont à effet de bord.
- Si <e> est une expression, <e> ; est une instruction consistant à évaluer (calculer) l'expression, et effectuer les effets de bord.
- Les opérateurs ont des priorités pour enlever l'ambiguïté.

L'affectation

- Une affectation

  `x = <expression>`

  1. calcule l'expression `<expression>`,
  2. range la valeur calculée à l'adresse (emplacement mémoire) de `x`.
  3. a elle-même une valeur, celle de `<expression>`.
- Une affectation est donc une expression à effet de bord.
- On ne peut mettre à gauche de = qu'une entité ayant une adresse. Pour l'instant : un nom de variable.
- ⚠ Ne pas confondre initialisation et affectation.

Des expressions à effets de bord

- Si `x` est une variable entière :
  - `x++` est une expression qui s'évalue comme `x`.
  - `++x` est une expression qui s'évalue comme `x+1`.
- Après évaluation, la valeur de `x` est incrémentée.
- Idem avec `x--` et `--x`.
- ⚠ Ne pas utiliser plusieurs de ces expressions en même temps :
- Exemple Si `x` vaut 0, l'expression

  `x++ - x++`

  peut valoir 1 ou -1, suivant le compilateur.

Priorité des opérateurs

- `++`, `--` postfixes
- `++`, `--` préfixes
- `!` non logique
- `-`, `+` unaires signe
- `(<nom_de_type>)` cast
- `*`, `/`, `%` opérateurs arithm. multiplicatifs
- `-`, `+` opérateurs arithm. additifs
- `<`, `>`, `<=`, `>=` comparaisons
- `==`, `!=` comparaisons
- `&&` et logique
- `||` ou logique
- `=`, `+=`, `=`, `*=`, `/=`, `=%` affectations

⚠ La division `/` n'a pas le même sens sur entiers et les flottants.

Opérateurs logiques

- On a déjà vu les opérateurs Booléens ET `&&`, OU `||`, NON `!`.

&&	true	false
true	true	false
false	false	false

||	true	false
true	true	true
false	true	false

	true	false
!	false	true

- Toute valeur non nulle est considérée vraie (`true`), et toute expression s'évaluant en 0 est considérée fausse (`false`).
- En C, l'évaluation des opérateurs `&&` et `||` est «paresseuse».

Évaluation paresseuse

- On évalue une expression `&&` ou `||` de gauche à droite.
- On s'arrête dès qu'on connaît le résultat.
- Exemple :

```
if ((x != 0) && (y/x == 2))
{
  //...
}
```

- Ici, même si x est nul, on n'effectue pas de division par 0.
- En effet, si `x != 0` est `false`, l'expression du `if` est fausse.
- On n'a pas besoin de tester `(y/x == 2)` et on ne le fait pas.
- `if ((y/x == 2) && (x != 0))` provoque une erreur si x est nul.

Dans cette partie...

8– Les fonctions

- Fonctions et modularité
- Définition, déclaration, appel
- Définition de fonction : syntaxe
- Appel de fonction
- Retour d'une fonction
- `return` vs. `exit`
- Récursivité
- Compléments

Fonctions et modularité

- Les fonctions structurent le programme en entités logiques.
  - code réutilisable.
  - code plus facile à corriger.
  - code plus facilement modifiable et maintenable.
  - code générique. Exemple : fonction de tri paramétrée par un ordre.
- Elles induisent des ruptures dans l'aspect séquentiel.
- Quand l'instruction courante `I` contient un appel à une fonction `f` :
  - Les arguments de `f` sont évalués pour lui être transmis,
  - L'exécution du programme passe à la première instruction de `f`.
  - Lorsque dans `f` on rencontre l'instruction `return` ou la dernière accolade, le programme reprend juste après l'appel de `f` dans `I`.

Définition, prototype, appel

- Un prototype (ou déclaration) de fonction décrit
  - son nom,
  - le type de ses paramètres, et
  - le type de la valeur qu'elle calcule.
- Une définition de fonction comporte en plus la liste de ses instructions, dans son corps (entre `{` et `}`).
- Pour pouvoir compiler un fichier source (`.c`), toute fonction utilisée doit être, avant toute utilisation
  - soit définie,
  - soit déclarée explicitement. Typiquement :

```
<type retour> <nom> (<liste types>);
```

  - soit déclarée via une directive `#include`.

Définitions de fonctions : syntaxe

- Schématiquement, une définition de fonction est constituée de :
  - son interface :
    - le type et le nom de la fonction,
    - les types et les noms des paramètres.
  - son corps, ou bloc principal, constitué de
    - une accolade ouvrante {.
    - des définitions de variables (locales), des instructions, des blocs.
    - une accolade fermante }.
- Définir une fonction dans le corps d'une autre fonction est interdit.

Appel de fonction

```
void f(void)
{
    int x = 3, y = 6, z;
    z = g(x,y);
}
```

```
int g(int x1, int x2)
{
    int y = 15;
    return y - x1 * x2;
}
```

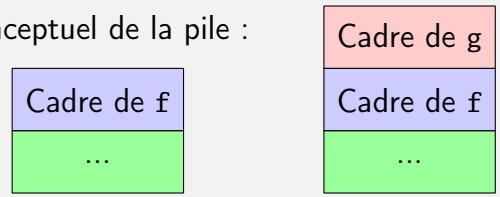
- On dit que f appelle g.
- f est la fonction appelante et g est la fonction appelée.
- Lors de l'appel de g, on dit parfois que g a une invocation active.
- Au cours d'un programme, une fonction peut
  - être appelée puis appelante,
  - s'appeler elle-même (récursivité).
  - avoir à un instant donné plusieurs invocations en cours. Par ex,
    - f1 appelle f1, ou
    - f1 appelle f2 qui elle-même appelle f1.

Appel de fonction

```
void f(void)
{
    int x = 3, y = 6, z;
    z = g(x,y);
}
```

```
int g(int x1, int x2)
{
    int y = 15;
    return y - x1 * x2;
}
```

- Schéma conceptuel de la pile :



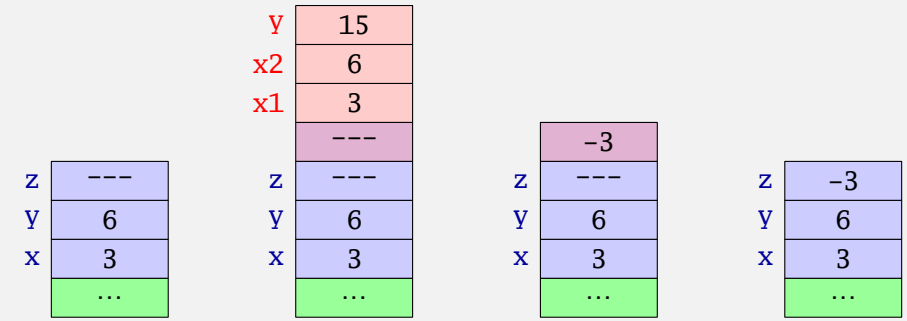
Avant appel de g Pendant l'appel à g

- Un cadre d'appel de fonction permet de mémoriser (entre autres)
  - les valeurs des arguments et variables automatiques.
  - la valeur retour transmise à la fonction appelante.

Appel de fonction

```
void f(void)
{
    int x = 3, y = 6, z;
    z = g(x,y);
}
```

```
int g(int x1, int x2)
{
    int y = 15;
    return y - x1 * x2;
}
```



Avant appel de g Pendant appel à g Après retour de g Après z=g(x,y)

Appel de fonction : récapitulatif

- Les arguments de la fonction sont calculés,
- Les valeurs sont transmises à la fonction appelée,
- ⚠ Conséquence la fonction appelée travaille sur les valeurs.
- ⚠ Avec la définition `void g(int x) { x = x+1; }` l'appel `g(x)` ne change pas la valeur de `x`.
- Lors de chaque appel d'une fonction, un emplacement est alloué pour chaque variable automatique et chaque argument.
  Rappel une variable statique est allouée une seule fois (zone statique).

⇒ Si une fonction `g` est invoquée plusieurs fois, chaque variable automatique locale et argument de `g` a un emplacement associé pour chaque invocation de `g` (dans chaque cadre de `g`).

Retour d'une fonction

- L'instruction `return` demande la terminaison de la fonction et le retour dans la fonction appelante.
- Si la fonction retourne une valeur, l'instruction est suivie d'une expression de type compatible.

```
int f (...)
{
  ...
  return 0;
}
```

- Si la fonction ne retourne rien, l'instruction est utilisée seule.

```
void f (...)
{
  ...
  return;
}
```


Retour implicite

- Si une fonction ne retourne rien, et que l'exécution arrive sur la dernière accolade fermante, un `return` implicite est effectué.
- Si la fonction retourne une valeur, on doit utiliser `return`.
- Exception : si la fonction `main` ne rencontre pas d'instruction return, un `return 0;` implicite est effectué.
- ⚠ Il est cependant conseillé que la fonction `main` retourne une valeur explicitement (par `return`) (c'est une obligation en C90).
- Il faut aussi tester systématiquement le code retour des fonctions pour savoir si elles se sont déroulées correctement.

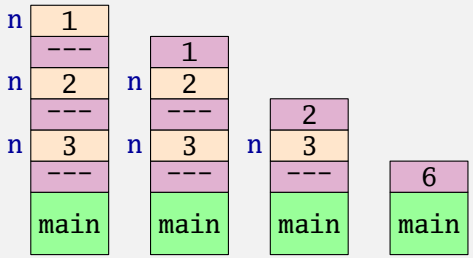
`return` vs. `exit`

- Sauf dans la première invocation de la fonction `main`, l'instruction `return` ne provoque pas l'arrêt du programme.
- Pour terminer le programme, on peut utiliser la fonction de bibliothèque `void exit(int status);`.
- Dans la 1ère invocation de `main`, `return` <exp> ≡ `exit(`<exp>`)`.
- Les constantes symboliques `EXIT_SUCCESS` et `EXIT_FAILURE` peuvent être passées à `exit()` pour indiquer respectivement une terminaison normale ou anormale.
- On peut enregistrer par `atexit()` des fonctions à exécuter avant une fin de programme due à un `exit()` ou un `return` du 1er `main`.
- ⚠ Ne pas confondre non plus `return` et `printf()` !

Récursivité

- On peut, dans une définition de fonction `f`, appeler la fonction `f`.
- Les règles d'appel de fonction s'appliquent normalement.

```
int Factorielle(int n)
{
    if (n <= 1)
        return 1;
    return n * Factorielle(n-1);
} /* Factorielle */

int main(void)
{
  return Factorielle(3);
}
```



Récursivité

- Il faut toujours s'assurer que la condition d'arrêt est traitée.
- Les programmes récursifs sont
  - ☺ souvent plus courts, mais
  - ⚠ parfois beaucoup moins efficaces si écrits sans soin.
- Exemple : Fibonacci.

```
long long Fibonacci (int n)
{
   if (n <= 1)
      return 1;
   return Fibonacci(n-1) + Fibonacci(n-2);
}
```

- Complexité $\approx \phi^n$, alors que $O(n)$ et même $O(\log n)$ sont possibles !
- Note Il est toujours possible de « dérécursifier » une fonction.

Récursivité : efficacité

- Exemple : calcul de 2^n pour $n \geqslant 0$.

```
// version 1 : O(2^n)
int pow2 (int n)
{
   if (n <= 0)
      return 1;
   return pow2(n-1) + pow2(n-1);
}
```

```
// version 2 : O(n)
int pow2lin (int n)
{
   if (n <= 0)
      return 1;
   return 2 * pow2lin(n-1);
}
```

- Exercice
  - Utiliser le fait que $2^n = (2^{n/2})^2.2^{n\%2}$ pour calculer 2^n en $O(\log n)$.
  - Adapter la technique au calcul du $n^{\text{ème}}$ nombre de Fibonacci.
  - Donner une version non récursive de ces fonctions.

Récursivité croisée

- Il est possible aussi d'écrire `f` qui appelle `g` qui elle-même appelle `f`.
- Exemple :
  - Parité : `pair()` et `impair()`.
  - Récurrences doubles.

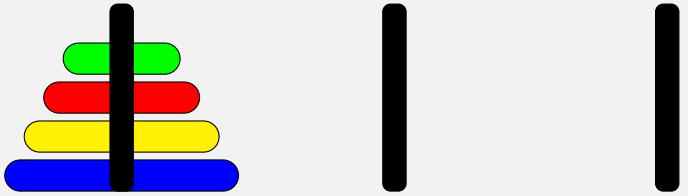
$$\begin{cases} u_0 = 1, & u_n = 2u_{n-1} - v_{n-1} \quad (n \geqslant 1) \\ v_0 = 5, & v_n = u_{n-1} - v_{n-1} \quad (n \geqslant 1) \end{cases}$$

⚠ On doit déclarer toute fonction utilisée avant sa définition.

☹ Attention à nouveau à l'efficacité !

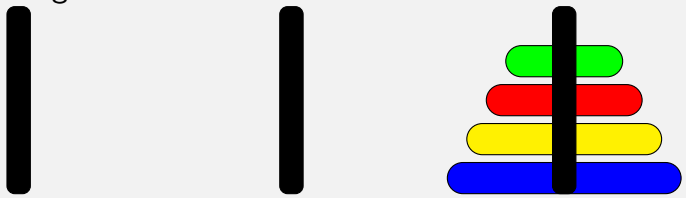
- L'utilisation naïve donne une complexité exponentielle.
- On a $\begin{pmatrix} u_n \\ v_n \end{pmatrix} = A\begin{pmatrix} u_{n-1} \\ v_{n-1} \end{pmatrix} = A^n\begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}$ avec $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$.
- Pour calculer efficacement A^n, on peut s'inspirer du calcul de 2^n.

Récursivité : tours de Hanoi



- Jeu En déplaçant les disques sur barres
  - un à un
  - sans poser un disque sur un disque plus petit,

arriver à la configuration suivante :



Tours de Hanoi

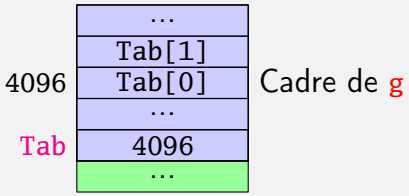
- On sait faire pour un disque.
- Si on sait faire pour $n-1$ disques, on sait faire pour n.

```
void hanoi(int nb, int depart, int arrivee)
{
   if (nb == 1)
   {
      printf("Deplacer %d --> %d\n", depart, arrivee);
      return;
   }
   int intermediaire = 6 - (depart + arrivee); // piquet restant
   hanoi(nb-1, depart, intermediaire);
   hanoi(1, depart, arrivee);
   hanoi(nb-1, intermediaire, arrivee);
}
```

- Complexité ? Peut-on faire mieux ?

Récursivité et tableaux

- On verra qu'un tableau est un pointeur (constant).
- Un tableau `Tab` contient l'adresse de sa première case `Tab[0]`.
- Si un tableau `Tab` est une variable automatique locale à une fonction `g`, alors on ne doit pas retourner `Tab` dans `g`.
- En effet, `Tab` désigne un emplacement dans le cadre de `g`, et ce cadre est désalloué au retour de `g`.



Pendant appel de g

Après l'appel à g
Plus rien à l'adresse 4096 !

Compléments : `atexit()`

(Complément hors programme examen)

- La fonction `atexit()` permet d'enregistrer des fonctions sans argument et ne renvoyant pas de valeur.
- Elles seront exécutées en cas d'`exit()` (ou `return` de la première invocation de `main`) en ordre inverse de leur enregistrement.

```
void f(void)
{
   printf("f()\n");
}

void g(void)
{
   printf("g()\n");
}
```

```
int main(void)
{
   atexit(f);
   atexit(f);
   atexit(g);

   printf("----------\n");
   exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

Rappels : la fonction printf()

- La fonction `printf` sert à réaliser des affichages.
- Son 1er argument est une chaîne de caractères.
- Ce 1er argument sert de support à ce qui est affiché.
- La plupart de ses caractères sont affichés tels quels, sauf
  - des séquences d'échappement : `\n, \t, \\, \"`, ...
  - des directives formées du caractère `%` suivi d'autres caractères, permettant un affichage formaté.
  - Le nombre de paramètres suivant le 1er argument dépend du nombre de séquences `%...`

La fonction printf() : exemples

Instruction	Affichage
`printf("x = %d\n", x);`	x = 7
`printf("x+1=%d\n", x+1);`	x = 8
`printf("%d+%d=%d\n", x, 2*x, 3*x);`	7+14=21

La fonction printf() : exemples

Instruction	Affichage
`printf("OK\n");`	OK
`printf("C'est \"OK\"\n");`	C'est "OK"
`printf("TVA: 19,6%%\n");`	TVA: 19,6%
`printf("Pi=%g\n",acos(1));`	Pi=3.14159
`printf("%ce%cl%c\n", 'H','l','o');`	Hello
`printf("%+06.3Lg\n",7.234L);`	+07.23

Remarque À compiler avec l'option `-lm` pour édition de liens avec la bibliothèque `libm`, contenant la définition de `acos`.

La fonction printf : directives

- Les caractères pouvant suivre le `%` d'une directive donnent l'interprétation de l'argument correspondant

Séquence	Interprétation de l'argument correspondant
%d,	Nombre décimal
%c	Caractère
%s	Chaîne de caractères
%g	Nombre flottant en double précision
%p	Pointeur
%%	Aucun argument correspondant. Imprime %.

- Il existe d'autres spécificateurs (pour entiers dans d'autres bases, non signés, longs etc.).

Nombre variable d'arguments

(Complément hors programme examen)

- La fonction `printf` prend un nombre variable d'arguments.
- Il est possible d'écrire des fonctions à nombre variable d'arguments.
- L'un des arguments doit permettre de retrouver le nombre et le type des arguments restants.
- Pour la fonction `printf`, c'est la chaîne de format qui joue ce rôle : les séquences `%...` permettent de retrouver cette information.
- Le prototype d'une telle fonction se termine par `...`.
- Par exemple, un prototype de `printf` pourrait être

```
int printf(const char *fmt, ...);
```

- Pour plus de détails, cf. `man va_arg`.

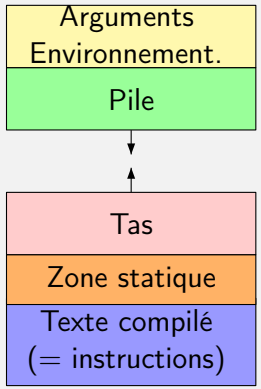
Dans cette partie...

9– Les pointeurs

- Rappel : organisation mémoire d'un processus
- Variables et adresses
- Pointeurs : valeurs et déclarations
- Emplacement pointé
- Tableaux vs. pointeurs
- Arithmétique des pointeurs
- Allocation dynamique
- Passage de paramètres

Organisation mémoire d'un processus

- Un programme en cours d'exécution s'appelle un processus.
- Sa mémoire peut être schématisée en distinguant plusieurs zones.
- Certaines (texte, statique) sont de taille fixée à la compilation.
- D'autres (pile, tas) ont une taille évoluant au cours de l'exécution.



Variables et adresses

- Une variable active à un instant donné possède une adresse logique.
- Une adresse est un entier désignant un emplacement mémoire
  - sur la pile,
  - en zone statique,
  - dans le tas, ...
- L'adresse d'une variable `x` se note `&x`.
- Si le type de `x` est `T`, le type de `&x` se note `T *`.
- Un pointeur est une variable qui sert à mémoriser des adresses.
- Le type d'un pointeur `p` dépend du type des variables dont `p` contiendra l'adresse.
- Exemples `char *p;` définit `p` comme un pointeur sur un `char`.

  `int **q;` ⇝ `q` est un pointeur sur un pointeur sur un `int`.

Pointeurs : valeurs

- Pointeur = variable pouvant contenir une adresse.
- Si p contient l'adresse &x de la variable x, on dit que p pointe sur x.
- Les pointeurs mémorisent des adresses codées par des entiers.
- En pratique, on ne s'intéresse pas aux valeurs de ces entiers.
- Ces adresses logiques correspondent à la vue locale que le processus a de sa mémoire (pas à une adresse physique).
- La constante `NULL` de `<stddef.h>` n'est l'adresse d'aucun objet.
- Avec le prototype `int main(int argc, char *argv[])`, le tableau `argv` a `argc+1` cases, et la dernière contient `NULL`.

Pointeurs : déclarations

- Déclaration, cas simples :

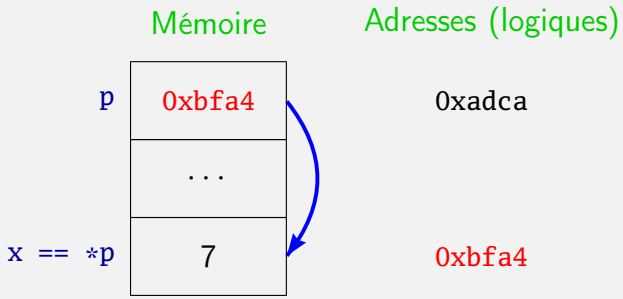
```
<type> *<nom de variable>;
```

- Exemples
  - `char *p;` pointeur sur un caractère.
  - `char **p;` pointeur sur pointeur sur un caractère.
  - `char *tab[10];` tableau de 10 pointeurs sur caractère.
  - `char (*tab)[10];` pointeur sur un tableau de 10 `char`.
- Le constructeur `*` est moins prioritaire que `[]`.

Pointeurs : un exemple

- Pointeur p pouvant contenir l'adresse d'une variable de type `short`.

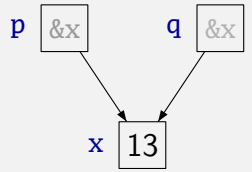
```
short *p;                  // p: pointeur sur short
short x = 7;
p = &x ;                   // p pointe maintenant sur x
```



Emplacement pointé *(pointee)*

- Si p est un pointeur de type `T *`, la donnée de taille `sizeof(T)` octets commençant à l'adresse p se note `*p`.
- `*p` référence l'emplacement pointé par p.

```
int *p, *q;
int  x;
p = &x;
*p = 42;
q = p;
*q = 13;
```



⚠ `int *r;` réserve de la place pour la variable `r`, PAS pour l'emplacement `*r` sur lequel pointera `r`.

```
int *r;
*r = 3;     // NON ! Il faut d'abord
            // faire pointer r vers un emplacement legal
```

Tableaux vs. pointeurs

- Un tableau est un pointeur constant.
- Ceci explique (a posteriori) pourquoi une fonction qui reçoit un tableau en argument peut modifier les valeurs de ses cases.
- `*p` est équivalent à **`p[0]`**
- `*(p+i)` est équivalent à **`p[i]`**.

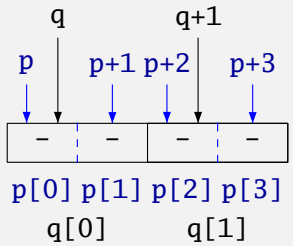
```
int tab[10];
int tab2[20];

*(tab+1) = 2;    // OK, equivalent a tab[1] = 2;
tab = tab2;      // ILLEGAL
```

⚠ `int p[10]` demande au compilateur de réserver de la place p et pour 10 entiers (contrairement à `int *p`).

Arithmétique des pointeurs

- Si `p` est un pointeur et `n` une expression entière, la valeur numérique de `p+n` dépend du type de `p`.
- Si `p`, de type `T *`, pointe sur la `i`-ème case d'un tableau de type `T`, `p+n` pointe sur la `i+n`-ème case (si elle est définie [...]).
- Exemple, en supposant `sizeof(char)=1` et `sizeof(short)=2`.

```
short q[2];
char *p;
p = (char *)q;
```

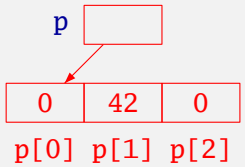


Allocation dynamique : calloc

- Pour allouer à l'exécution (« *dynamiquement* ») de la mémoire, on utilise `calloc`, `malloc` ou `realloc`.
- `void *calloc (size_t nb, size_t size);`

  alloue l'espace initialisé à 0 pour un tableau de `nb` éléments de `size` octets chacuns, et renvoie un pointeur sur le début de ce tableau.
- Exemple

```
int *p;
p = (int *)calloc(3, sizeof(int));
p[1] = 42;
```



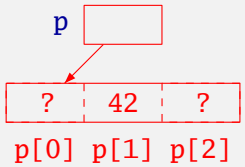
- `calloc` renvoie `NULL` si l'allocation échoue.

Allocation dynamique : malloc

- Pour allouer à l'exécution (« *dynamiquement* ») de la mémoire, on utilise `calloc`, `malloc` ou `realloc`.
- `void *malloc (size_t size);`

  alloue l'espace non initialisé de taille `size` octets.
- Exemple

```
int *p;
p = (int *)malloc(3 * sizeof(int));
p[1] = 42;
```



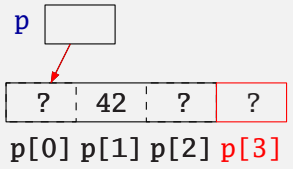
- `malloc` renvoie `NULL` si l'allocation échoue.

Allocation dynamique : realloc

- `void *realloc (void *p, size_t size);`

  permet de réallouer une zone de `size` octets.
- La zone pointée par `p` doit avoir été allouée avec `m/c/realloc`.
- Si `size` est plus grand que la taille de cette zone, le contenu de la zone est conservé, sinon il est tronqué.
- Suite de l'exemple précédent

```
int *p;
p = (int *)malloc(3 * sizeof(int));
p[1] = 42;
p = (int *)realloc(p, 4 * sizeof(int));
```



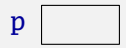
- `realloc` renvoie `NULL` en cas d'échec, laissant intact le bloc original.

Allocation dynamique : free

- Il est important de désallouer la mémoire qu'on n'utilise plus.
- `void free (void *p);`

  permet de désallouer la mémoire allouée par `m/c/realloc`.
- Suite de l'exemple précédent

```
int *p;
//...
free(p);
```



Affectation de pointeurs : résumé

- Pour affecter à un pointeur un emplacement pointé, on utilise
  - soit l'adresse d'une variable existante : `p = &x`.
  - soit la constante `NULL` : `p = NULL`.
  - soit une adresse stockée dans un autre pointeur `p = q`.
  - soit, plus généralement, une expression de type pointeur `p = q+1`.
  - soit une fonction demandant la création à l'exécution d'une zone mémoire : `malloc()/calloc()/realloc()`.
- Film http ://www.cs.stanford.edu/cslibrary/PointerFunCBig.avi

Passage de paramètres : rappel

- Lors d'un appel de fonction :
  - Les paramètres d'appel sont évalués (dans un ordre dépendant de l'implémentation),
  - les valeurs calculées sont empilées,
  - la fonction appelée travaille sur ces valeurs empilées.
- Un appel de fonction de la forme `f(x)`, avec

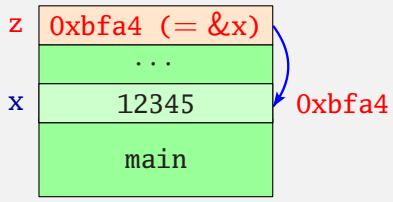
```
void f(int z)
{
  z = 12345;
}
```

ne peut donc pas modifier la valeur de la variable `x`.

Pointeurs et passage de paramètres

- Une fonction appelée peut modifier une variable automatique de la fonction appelante, si elle connaît l'adresse de la variable.

```
void f(int *z)
{
   *z = 12345;
   return;
}

int main(void)
{
   int x = 100;
   f(&x);
   printf("Valeur de x : %d", x) ;
}
```



⚠ Ne pas retourner l'adresse d'une variable locale automatique !

Dans cette partie...

10– Types structurés 2 : structures

- Construction de nouveaux types
- Énumérations
- Structures
- Abréviations de types
- Pointeurs et structures
- Listes chaînées
- Pointeurs sur fonctions

Construction de nouveaux types

- On peut construire des nouveaux types à partir des types de base en utilisant des constructeurs.
- Premiers types "construits" :
  - les énumérations.
  - les tableaux.
  - les structures.
  - les unions (non présentées dans ce cours).
  - les pointeurs.

Énumérations

- Un type énumeré contient un nombre fini de valeurs.
- Chaque valeur a un nom et est codée par un entier.
- La définition du type se fait hors du corps de toute fonction.

```
enum jour                  // def. du type
{
  lun, mar, mer, jeu, ven, sam, dim
};
enum jour   x, y;          // def. des variables

int main(void)
{
  x = lun;
  y = x + 1;               // y vaut mar
}
```

Structures

- Une structure regroupe plusieurs champs de types différents.

```
struct <nom>
{
  <suite de declarations de champs>
};
```

- Exemple :

```
struct individu
{
  char nom[25];
  char prenom[20];
  int  age;
};
```

- Pour accéder aux champs d'une structure on utilise l'opérateur . :

```
struct individu etud;     // declaration de variable
etud.age = 20;
```


Structures emboîtées

- Un champ d'une structure peut être lui-même une structure, si son type a déjà été défini.

```
// definitions de types
struct point
{
  double abscisse;
  double ordonnee;
};

struct cercle
{
  struct point centre;
  double rayon;
};
```

```
// definitions de variables
struct cercle c;

c.centre.abscisse = 12.5;
c.centre.ordonnee = 0.0;
c.rayon = 5.0;
// ou bien...
struct point p;
p.abscisse = 12.5;
p.ordonnee = 0.0;
c.centre   = p;
c.rayon = 5.0;
```


Structures : initialisations

```
// definitions de types
struct point
{
  double abscisse;
  double ordonnee;
};

struct cercle
{
  struct point centre;
  double rayon;
};
```

```
// definitions avec initialisations
struct point  p = {2.0, 3.0};
struct cercle c = {{2.0, 3.0}, 1.0};

// En C99, on peut aussi ecrire
struct cercle c1 = {p, 1.0};
```


Abréviations de types

- On peut donner un nom abrégé à un type avec typedef.

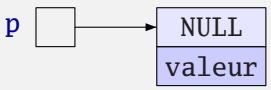
```
struct point
{
      double abscisse;
      double ordonnee;
};

typedef struct point Point;

// Maintenant on peut utiliser Point
// comme abreviation de la structure

Point p;
p.abscisse = 5.0;
......
```

Pointeurs et structures

- Si p est un pointeur sur une structure et champ un champ de la structure, p->champ désigne (*p).champ.
- Un champ d'une structure peut être un pointeur, qui pointe sur une structure de même type.

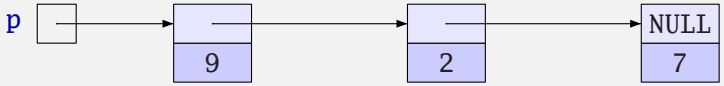
```
struct cell
{
   int valeur;
   struct cell *suivant;
};

typedef struct cell cell;
```

```
cell *creer_cellule(int valeur)
{
   cell *p;
   p = (cell *)malloc(sizeof(cell));
   p->valeur  = valeur;
   p->suivant = NULL;
   return p;
}
```



Listes chaînées

- Cette construction permet d'implémenter les listes chaînées, chaque cellule de la liste comtenant par exemple un entier.
- Exemple : la liste à 3 éléments (9,2,7) pourra être représentée par



- Écrire des fonctions implémentant :
  - la création d'une liste vide (transparent précédent),
  - le calcul de la longueur d'une liste,
  - l'ajout d'un élément en tête de liste,
  - la suppression de l'élément de tête s'il existe,
  - l'ajout d'un élément dans une liste supposée triée,
  - la suppression du 1er élément ayant une clé donnée,
  - le tri d'une liste selon les valeurs des clés.

Pointeurs sur fonctions

- Un nom de fonction est un pointeur constant sur la fonction.
- On peut définir des tableaux de pointeurs sur fonctions.
- On peut aussi passer des pointeurs sur fonctions en paramètre.
- `int (*f) (char *);` pointeur sur une fonction retournant un `int`, dont l'argument est un pointeur sur un `char`.
- Les pointeurs de fonctions peuvent être utilisés, par exemple, pour écrire des fonctions génériques.
- Exemple : fonction de tri d'un tableau de chaines de caractères, prenant en argument :
  - le tableau,
  - un pointeur sur une fonction de comparaison de deux chaînes.

Dans cette partie...

11– Compilation et modularité

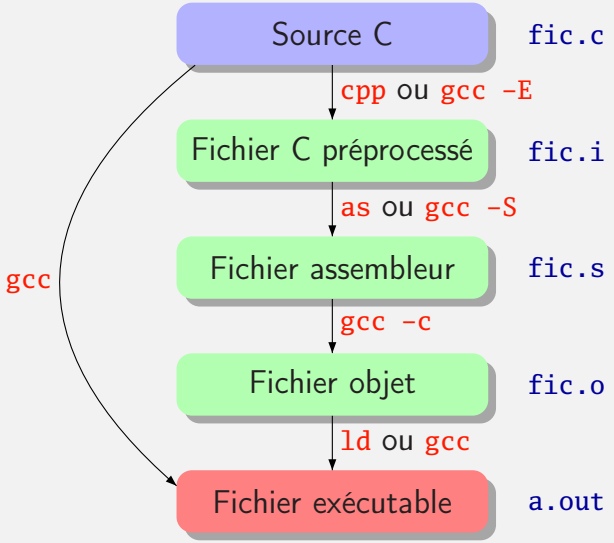
- La compilation
- Étapes de la compilation
- Compilation de plusieurs fichiers
- Bibliothèques et en-têtes

La compilation (rappel)

- Le programmeur écrit un programme source C
- Il le traduit ensuite pour obtenir un exécutable

- Une fois qu'on a compilé, on obtient un nouveau fichier, appelé exécutable, qui est l'application.
- L'exécutable dépend de la machine sur laquelle le programmeur veut exécuter le programme.
- $\Longrightarrow$ on doit compiler autant de fois qu'on veut créer d'exécutables pour des machines différentes.
- Voir le premier cours pour des rappels sur le compilateur `gcc`.

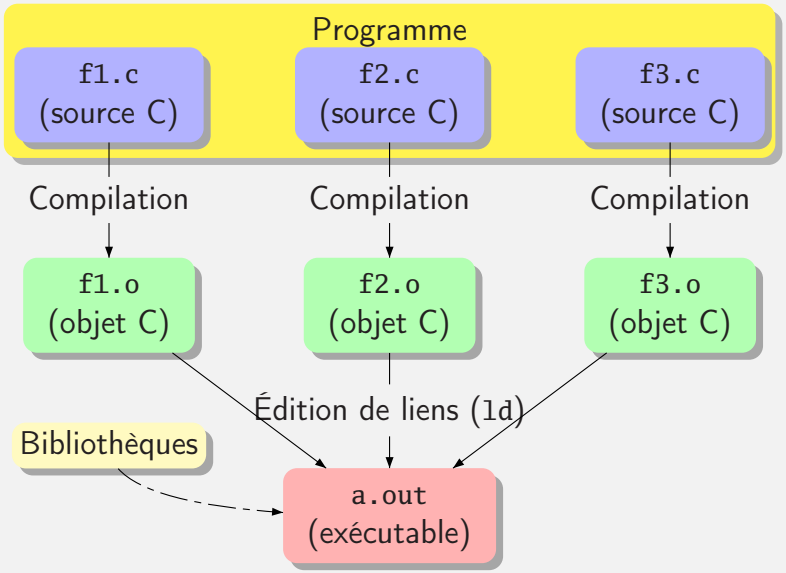
Étapes de la compilation



Pourquoi plusieurs étapes ?

- Chaque étape a une tâche précise et distincte.
- Le compilateur lui-même est modulaire.
- Un gros programme est réparti sur plusieurs fichiers sources.
  - Chaque fichier rassemble des fonctions travaillant « au même niveau ».
  - Si on modifie un fichier, on doit recréer son fichier objet (`.o`).
  - 🙂 On n'est pas obligé de recréer les autres, qui existent de la précédente compilation.
- Question :
  - Peut-on utiliser une fonction (par ex.) définie dans un autre fichier ?
  - Réponse : Oui ! Mais il faut la déclarer.

Compilation de plusieurs fichiers



Bibliothèques vs. en-têtes

- Une bibliothèque contient des définitions (par ex. de fonctions).
- La bibliothèque standard (`libc`) est utilisée par défaut.
- Exemple : `printf()` est déjà écrite dans la bibliothèque standard.
- L'option `-l` de `gcc` permet d'ajouter des bibliothèques.

- Une déclaration avertit le compilateur qu'on utilise une entité (comme une fonction) qui n'est pas définie dans le fichier compilé.
- Elle doit être définie
  - Soit dans une bibliothèque avec laquelle on compile.
  - Soit dans un autre fichier de l'utilisateur.
- Un fichier en-tête (`.h`), lu par `#include`, contient des déclarations.
- La page de manuel d'une fonction fournit les en-têtes à inclure.

Les fichiers d'en-tête

- Nom des fichiers d'en-tête (headers) terminé par `.h`.
- Ils contiennent des
  - des « #definitions ».
  - des déclarations
    - de fonctions,
    - de variables,
    - de types
- Ils sont pas faits pour contenir des instructions.
- Se trouvent souvent dans le répertoire `/usr/include`.
- Sont lus par une directive `#include <xxx.h>`.
- `man 3 printf` donne l'en-tête avec la déclaration de `printf()`.
- On peut inclure un `fic.h` personnel par `#include "fic.h"`.
- L'option `-I` ajoute des répertoires de recherche de fichiers en-tête.

L'édition de liens

- Étape de la création d'exécutable qui :
  - réunit un ensemble de fichiers objets (`.o`) pour créer un fichier,
  - pour cela, on doit choisir et fixer l'adresse (dans l'exécutable) de chaque variable ou fonction du programme.
- Pour que l'édition de liens réussisse, il faut que
  - une fonction appelée `main` soit définie.
  - toute fonction utilisée dans le programme soit définie, soit une fois dans l'un des fichiers source soit dans la bibliothèque standard.
  - idem pour les variables.

Bibliothèques

- Une bibliothèque est un ensemble de fonctions déjà précompilées.
- La bibliothèque standard, toujours chargée par `gcc`, s'appelle `libc`.
- L'option `-ltoto` charge la bibliothèque du fichier `libtoto.so`.
- Exemple On compile avec `-lm` pour charger la bibliothèque `libm` contenant les fonctions mathématiques usuelles (trigonométrie,...)
- On peut créer ses propres bibliothèques avec l'option `-shared`.
- `gcc` cherche les bibliothèques dans des répertoires prédéfinis.
- On peut ajouter un répertoire à la liste avec l'option `-L`.
- Exemple `gcc -L/repertoire/ou/est/ma/bibliotheque fichier.c`
- Certaines bibliothèques sont nécessaires pour l'exécution.
  La variable shell `LD_LIBRARY_PATH` indique où les chercher.

Dans cette partie...

12– Compléments : instructions

- Instruction `switch`
- Instruction `do...while`
- Instruction `continue`
- Instruction `break`
- Expression `b?e1:e2`
- Expression `e1,e2`

Instruction `switch`

- Permet d'exécuter des instructions selon la valeur d'une expression,

```
switch (<expression>)
{
  case <expr_constante_1>:
     <suite instructions 1>
  ......
  case <expr_constante_n>:
       <suite instructions n>
  default:
       <suite instructions n+1>
}
```

- L'expression est comparée aux expressions constantes, dans l'ordre.
- En cas d'égalité, la suite d'instructions correspondante est exécutée puis la comparaison reprend avec l'expression constante suivante.
- L'instruction `break` permet de sortir du `switch`.

Instruction `switch` : exemple

```
int main(int argc, char *argv[])
{
   switch (argc)
   {
      case 1:
         printf("Commande sans argument\n");
         break;
      case 2:
         printf("Commande avec un argument\n");
         break;
      default:
         fprintf(stderr, "Usage : %s [arg. optionnel]\n", argv[0]);
         exit (EXIT_FAILURE);
         break;
   }
//...
```


Instruction `do...while`

- Permet de répéter une séquence, suivant la valeur d'une expression.
- Contrairement au comportement de la boucle `while`, la séquence d'instructions est d'abord exécutée, puis l'expression est testée pour éventuellement recommencer.

```
do
   <instruction ou bloc>
while (<expression>);
```

1. L'`<instruction ou bloc>` est exécuté.
2. L'expression est évaluée.
   a. Si elle est fausse, on sort de la boucle `do...while`.
   b. Si elle est vraie, on revient en 1.

Instruction do...while : exemple

- Demander à l'utilisateur d'entrer un entier compris entre 1 et 10.

```
int a;
do
{
   printf("Entrez un nombre entre 1 et 10\n");
   a = lire_entier();
}
while (a < 1 || a > 10);
```

- Exercice Réécrire ce bout de programme avec une boucle while.

Rupture dans les boucles : continue

- L'instruction continue modifie le déroulement de la boucle la plus interne qui la contient.
- Elle fait passer à l'itération suivante, sans finir le corps de la boucle.

```
int main(void)
{
   printf("Valeurs de 1/(x-k) pour 0 <= x <= N\nEntrez k puis N\n");
   int k = lire_entier();
   int N = lire_entier();

   for (double x = 0.0; x <= N; x++)
      if (x == k)
         continue;
      else
       printf("x = %g, 1/(x-%d)=%g\n", x, k, 1/(x-k));
}
```


Instruction continue et boucles

⚠ Des boucles qui se comportent habituellement de même façon peuvent avoir un comportement différent avec continue.

☺

```
for (double x = 0; x <= N; x++)

   if (x == k)
      continue;
   else
      printf(
        "x = %g, 1/(x-%d)=%g\n",
         x, k, 1/(x-k)
         );
```

☹

```
double x = 0.;
while (x <= N)
{
   if (x == k)
      continue;
   else
      printf(
        "x = %g, 1/(x-%d)=%g\n",
         x, k, 1/(x-k)
         );
   x++;
}
```


Rupture dans les boucles : break

- L'instruction break dans une boucle provoque la sortie de la boucle la plus interne qui la contient.
- Exemple : calcul de l'indice minimum d'une case contenant 0 dans les n premières cases d'un tableau :

```
for (i = 0; i < n; i = i + 1)
   if (tab[i] == 0)
      break;
if (i == n)
   printf("Pas de 0 dans les %d 1eres cases\n", n);
else
   // tab[i] est le 1er 0
```

Expression b?e1:e2

- Dans une expression `b?e1:e2`, `e1` et `e2` sont des expressions de types compatibles.
- Pour calculer l'expression :
  - On évalue `b`.
  - Si `b` est vrai :
    - l'expression `e2` n'est pas évaluée.
    - l'expression `e1` est évaluée et sa valeur est celle de `b?e1:e2`.
  - Si `b` est faux :
    - l'expression `e1` n'est pas évaluée ;
    - l'expression `e2` est évaluée et sa valeur est celle de `b?e1:e2`.
- Exemple : `return x>y? x : y` retourne le maximum de `x` et `y`.

Expression e1,e2

- Pour évaluer l'expression `e1,e2`
  - on évalue d'abord `e1`,
  - on évalue ensuite `e2`, qui donne le type et la valeur de l'expression globale `e1,e2`.
- ⚠ Assigner/modifier la valeur de `e1,e2` est non portable.
- Utilisation dans les boucles :

```
int i,j;
for (i=-10,j=20; i < j; i++,j--)
   ...
```