Architecture des ordinateurs
Cours 6

Responsable de l'UE : Emmanuelle Encrenaz
Supports de cours : Karine Heydemann

Contact : emmanuelle.encrenaz@lip6.fr

Plan du cours 6

1. Introduction
2. Données de type tableau ou enregistrement
3. Variables locales et pile d'exécution
4. Optimisation des accès mémoires et des variables locales
5. Tableaux et enregistrements en variables locales

Variables d'un programme C

Représentation et implantation

- Une variable correspond à un emplacement mémoire
- La taille de cet emplacement dépend du type de la variable
- Deux grandes familles : types élémentaires et types structurés
- Les types élémentaires correspondent aux types C : `int`, `unsigned int`, `short`, `unsigned short`, `char`, `unsigned char`, `char*`, `int*`, `void*`,...
- Le contenu de l'emplacement contient le codage de la valeur de la variable : c'est un mot binaire, c'est son utilisation dans le code qui lui donne une interprétation.
- Les types structurés correspondent à des variables comportant plusieurs données élémentaires :
  $\Rightarrow$ l'objet de ce cours est de présenter l'implantation mémoire des tableaux et des enregistrements.
- Les variables globales sont implantées dans le segment de données (`.data` avec des directives dédiées). Quid des variables locales ?
  $\Rightarrow$ Ce cours présente l'allocation des variables locales et la notion de pile d'exécution.

Structure de données de type tableau

Tableau

- Ensemble fini d'éléments d'un même type
- Ensemble ordonné : un indice donne la position d'un élement dans le tableau

Accès à un élément

- Opération d'indexation `NomTableau[indice]`
- `T[i]` désigne l'élément d'indice `i`, c'est le `i+1`ième élément du tableau `T`.

Exemples

- `int tab[5] = {1,2,3,4,5};`
- `char chaine1[5]={'a','r','c','h','i'};`
- `char chaine2[]= "ARCHI";`

Implantation de données de type tableau

Implantation mémoire

- Un tableau est alloué en mémoire de façon contiguë : les éléments sont rangés les uns à la suite des autres par adresses croissantes

Zone mémoire allouée à un tableau

- `adresse_debut` : l'adresse de base du tableau, c'est l'adresse du premier élément (indice 0)
- `taille_elem` : taille (en octets) d'un élément
- `nb_elem` : nombre d'éléments du tableau
- la taille de la mémoire allouée est `nb_elem * taille_elem`

Adresse d'un élément du tableau

- L'adresse `&T[i]` de l'élément `i` est `adresse_debut + i*taille_elem`. Equivalent à `&T[0]+i*taille_elem`.

Implantation de données de type tableau

Accès à un élément

- L'adresse de l'élément `i` (`&T[i]`) est `adresse_debut + i*taille_elem`. Equivalent à `&T[0]+i*taille_elem`.
- Accéder à l'élément `T[i]` c'est déréférencer la case d'adresse `&T[i]`
- Correspond toujours un accès mémoire :
  - `a = ...T[i]...;` requiert un accès en lecture à l'élément `T[i]`, donc à l'adresse `adresse_debut + i*taille_elem`
  - `T[i] = ...;` requiert un accès en écriture à l'élément `T[i]`, donc à l'adresse `adresse_debut + i*taille_elem`

Exemples de données globales de type tableau

- Soit le programme C :

```c
/* variables globales */
...
int tab[5] = {5, 17, 23, 41, 123};
char chaine[] = "mips";
```

- Directives de déclaration des tableaux

```
tab: .word 5, 17, 23, 41, 123
chaine: .asciiz "mips"
```

- Hypothèse : `tab` est implanté à l'adresse `0x1001000c`
- L'adresse de `chaine` est `0x1001000c` + 5*4 = `0x1001000c` + 0x14 = `0x10010020`
- Remarque : l'adresse de `tab` est nécessairement un multiple de 4

Exemples de données globales de type tableau

- Soit le programme C :

```c
/* variables globales */
...
int tab[5] = {5, 17, 23, 41, 123};
char chaine[] = "mips";
```

- Directives de déclaration des tableaux

```
tab: .word 5, 17, 23, 41, 123
chaine: .asciiz "mips"
```

- `tab` est implanté à l'adresse `0x1001000c` et `chaine` à `0x10010020`
- Représentation de la mémoire avec vue par mot

adresse (mot)	0x1001000c	0x10010010	0x10010014	0x10010018
contenu (hexa)	0x00000005	0x00000011	0x00000017	0x00000029
contenu (données)	5	17	23	41

adresse (mot)	0x1001001c	0x10010020	0x10010024	0x10010028
contenu (hexa)	0x0000007b	0x7370696d	0x00000000	0x00000000
contenu (données)	123	's','p','i','m'	?, ?, ?,'\0'	?, ?, ?, ?

Exemples de données globales de type tableau

- Directives de déclaration des tableaux

```
tab: .word 5, 17, 23, 41, 123
chaine: .asciiz "mips"
```

- `tab` est implanté à l'adresse `0x1001000c` et `chaine` à `0x10010020`
- Représentation de la mémoire avec vue par mot

adresse (mot)	0x1001000c	0x10010010	0x10010014	0x10010018
contenu (hexa)	0x00000005	0x00000011	0x00000017	0x00000029
contenu (données)	5	17	23	41
adresse (mot)	0x1001001c	0x10010020	0x10010024	0x10010028
contenu (hexa)	0x0000007b	0x7370696d	0x00000000	0x00000000
contenu (données)	123	's','p','i','m'	?, ?, ?,'\0'	?, ?, ?, ?

- `&tab[2]` = `&tab[0]` + 2*4 = `0x1001000c` + 8 = `0x10010014`
- `&ch[3]` = `&ch[0]` + 3*1 = `0x10010020` + 3 = `0x10010023`
- `tab[2]` = contenu de l'élément d'indice 2 = mot à l'adresse `0x10010014` = 23
- `ch[3]` = contenu de l'élément d'indice 3 = octet à l'adresse `0x10010023` = 's'

Structure de données de type enregistrement

- Données comportant plusieurs champs de type potentiellement différent :
  `struct _ms_type {int id; char t1[2]; int t2[2]};`
- Accès aux champs par notation pointée / déréférencement si pointeur vers un enregistrement :

```
struct _ms_type {int id; char t1[2]; int t2[2];};
struct _ms_type ms1 = {12, {1,2}, {11,12}};
struct _ms_type ms2;
struct _ms_type *ms_ref;

void main(){
...
ms_ref = &ms2;              // adresse de ms2 dans ms_ref
ms_ref->id = ms1.id + 1;
ms_ref->t1[1] = ms1.t1[1] + 2;
...
}
```

Implantation de données de type enregistrement

- Les données d'un enregistrement sont allouées en mémoire les unes à la suite des autres
- Respect des contraintes d'alignement de chaque champ en fonction de sa taille en octets

```
struct _ms_type {int id; char t1[2]; int t2[2];};
struct _ms_type ms1 = {12, {1,2}, {11,12}};
struct _ms_type ms2;
struct _ms_type *ms_ref;
```

⇒ Une donnée de type `struct ms_type` requiert 14 octets de données + 2 octets nécessaires pour respecter la contrainte d'alignement du champ `t2` : 16 octets

```
.data
ms1:      .word 12      # ms1.id
          .byte 1, 2    # ms1.t1
          .word 11, 12  # ms1.t2
          .align 2
ms2:      .space 16     # 16 octets
          .align 2
ms_ref:   .space 4      # pointeur = adresse = 4 octets
```

Adresse d'implantation d'enregistrements

- L'adresse du 1er champ est l'adresse de la structure
- L'adresse du champ `i` (`i>1`) d'une structure est égale à l'adresse du champ `i-1` + taille du champ `i-1` + contrainte d'alignement du champ `i`
- Exemple de calcul des adresses d'implantation

```
.data
ms1:      .word 12      # @ms1.id = 0x10010000
          .byte 1, 2    # @ms1.t1 = 0x10010004
          .word 11, 12  # @ms1.t2 = 0x10010004 + 2 + align=2
                        #         = 0x10010008
ms2:      .align 2
          .space 16     # @ms2    = 0x10010008 + 4*2
                        #         = 0x10010010
                        #         = @ms2.id
                        # @ms2.t1 = @ms2.id + 4
                        #         = 0x10010014
                        # @ms2.t2 = @ms2.t1 + 2 + align=2
                        #         = 0x10010018
ms_ref:   .align 2
          .space 4      # @ms_ref = 0x10010010 + 16
                        #         = 0x10010020
```

Exemple de code avec tableau et enregistrement

Code C

```c
struct _ms_type {
        int id;
        char t1[2];
        int t2[2];
};
...
void main(){
...
/*adresse de ms2 dans
    ms_ref*/
ms_ref = &ms2;
ms_ref->id =
          ms1.id + 1;
ms_ref->t1[1] =
          ms1.t1[1] + 2;
...
}
```

Code ASM

```
.data
ms1:  .word 12          # @ms1.id = 0x10010000
      .byte 1, 2        # @ms1.t1 = 0x10010004
      .word 11, 12      # @ms1.t2 = 0x10010008
ms2:  .align 2
      .space 16         # @ms2    = 0x10010010
ms_ref: .align 2
      .space 4          # @ms_ref = 0x10010020

.text
  lui $8, 0x1001
  ori $9, $8, 16        # $8 = &ms2
  sw  $9, 32($8)        # écriture ms_ref
  lw $9, 0($8)          # lecture ms1.id
  addiu $9, $9, 1       # ms1.id + 1
  lw $10, 32($8)        # lecture ms_ref
  sw $9, 0($10)         # ecriture ms_ref->id
  lb $9, 5($8)          # lecture ms1.t1[1]
  addiu $9, $9, 2       # ms1.tab[1] + 2
  lw $10, 32($8)        # lecture  ms_ref
  sb $9, 5($10)         # ecriture ms_ref->t1[1
  ...
```

Variables locales

- Variable = emplacement mémoire
- Variable locale = à portée limitée, existe uniquement dans la fonction ou le bloc contenant sa déclaration
- A l'exécution, plusieurs instances d'une même variable possible : c'est le cas lors de l'exécution de fonctions récursives
- Chaque exécution d'une fonction a besoin d'emplacements mémoire dédiés pour ses variables locales (entre autres) : ces emplacements font partie du contexte d'exécution de la fonction

Segments mémoires d'implantation

- Les variables globales sont visibles, donc accessibles par toutes les fonctions : allocation statique dans le segment de données (via des directives dans `.data`), leur initialisation est réalisée lors du chargement mémoire du code binaire (par le loader)
- Les variables locales sont visibles par une seule instance de fonction (ou bloc), accessibles que par cette fonction : leur allocation est dynamique, réalisée tout comme leur initialisation par la fonction à l'exécution, et ce dans un autre segment mémoire appelé segment de pile.

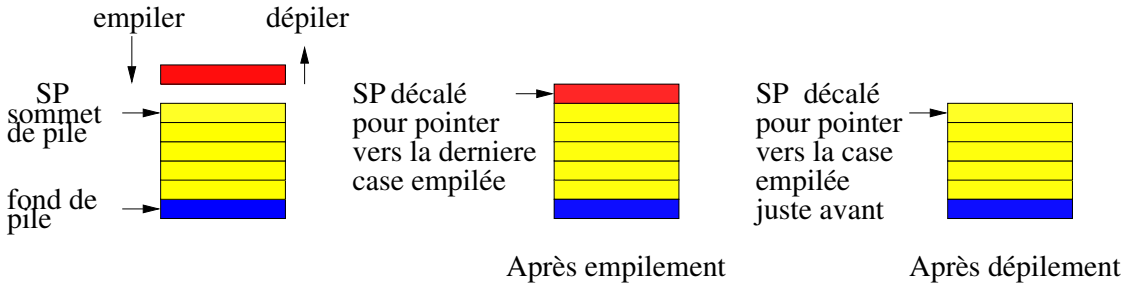
Imbrication des appels de fonction et contextes

- En général, un programme principal (qui est une fonction) appelle des fonctions qui elles-même peuvent appeler des fonctions qui etc.
- Ordre de création/destruction et durée de vie des contextes : quand une fonction `f` appelle une fonction `g`, le contexte de `g` est crée et co-existe avec celui de `f` jusqu'à la fin de l'exécution de `g`. Le contexte courant est celui de la fonction qui s'exécute : celui de `f` puis de `g` puis de nouveau `f`.
- Profondeur d'appel à un moment donné = nombre d'appels imbriqués
- Le nombre maximal de contextes co-existant correspond à la profondeur d'appel maximale possible : ce n'est pas déterminable statiquement dans le cas général (cas des fonctions récursives).
- Besoin d'un mecanisme d'allocation mémoire de contextes
  1. dynamique : co-existence d'un nombre a priori quelconque de contextes
  2. mémorisant l'imbrication des appels de fonction en cours : détermination aisée du contexte courant au retour d'une fonction
- La structure de pile est adaptée pour cela

Notion de pile

Pile

- Structure de données abstraite permettant de stocker/récupérer des informations
- Gestion LIFO (Last In First Out) : la structure de pile conserve l'ordre d'allocation
- Opérations sur la pile :
  - Empiler : allouer un emplacement au sommet de pile + le remplir
  - Dépiler : récupérer le contenu du somment de pile si besoin + désallouer la mémoire en sommet de pile
  - Tester si la pile est vide ou pleine



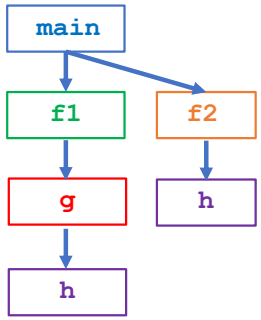
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

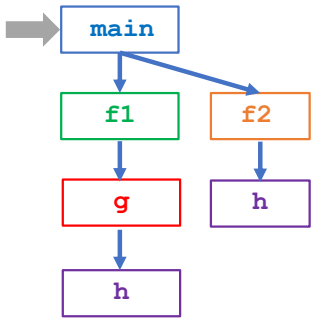
Graphe d'appels



Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



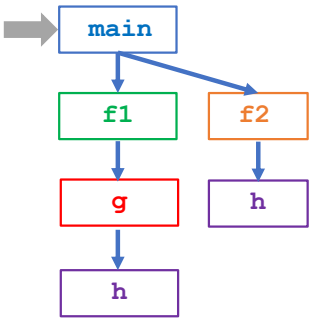
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



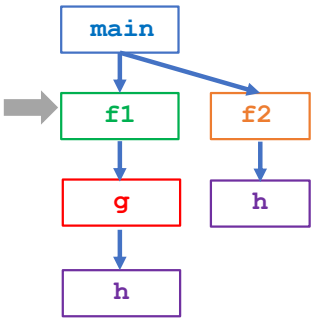
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels

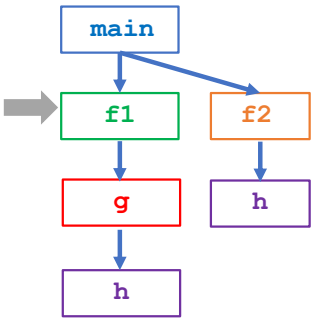


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels

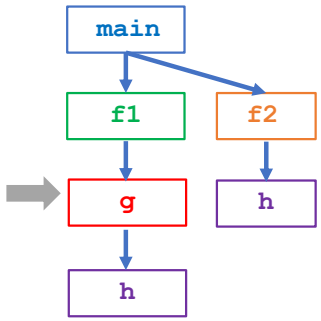


A l'exécution

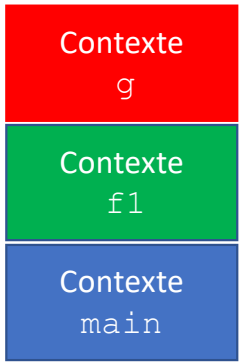
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



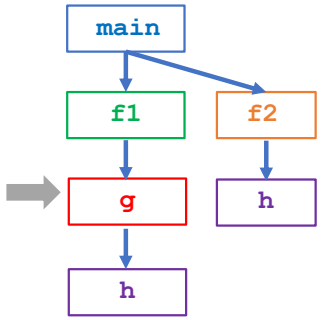
A l'exécution



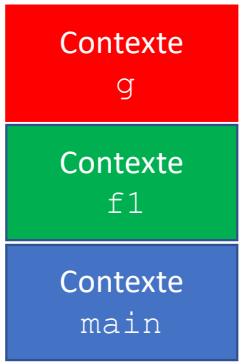
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



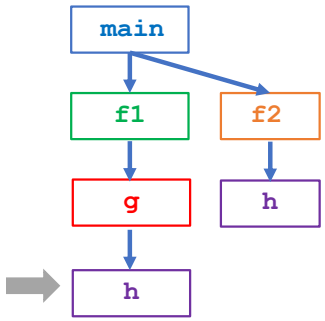
A l'exécution



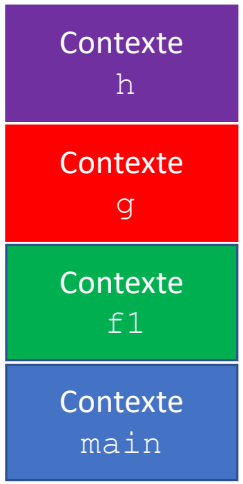
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



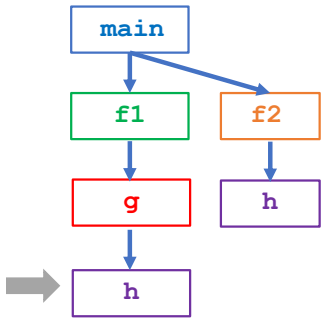
A l'exécution



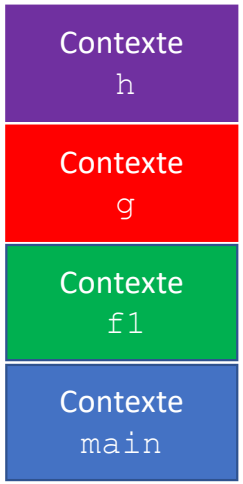
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



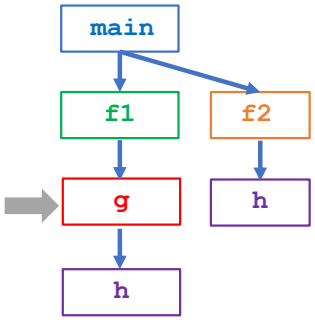
A l'exécution



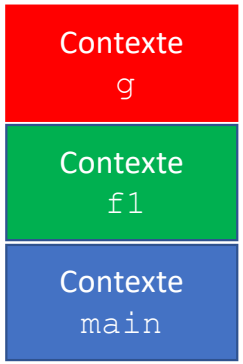
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



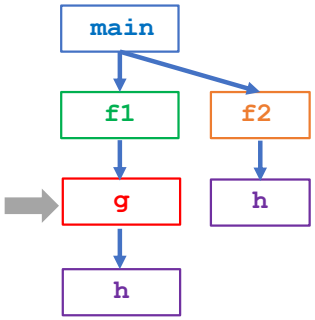
A l'exécution



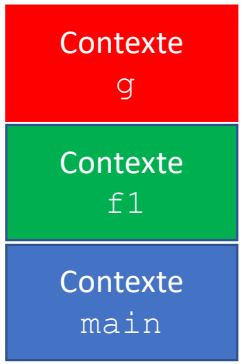
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



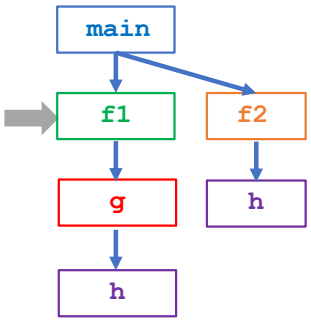
A l'exécution



Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels

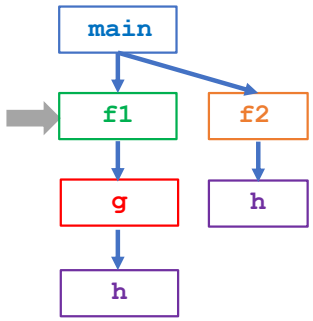


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels

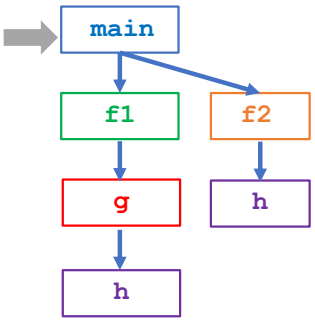


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



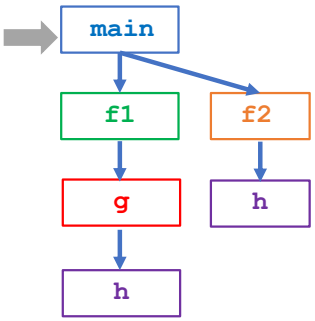
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



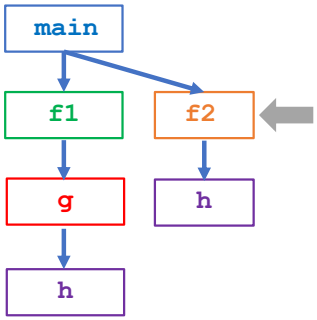
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels

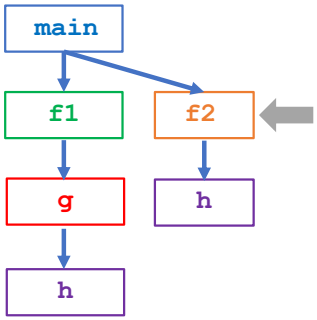


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels

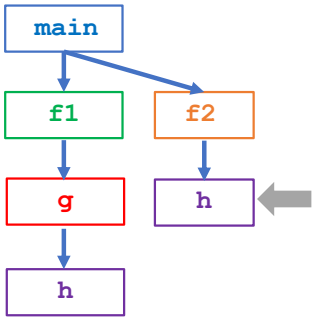


A l'exécution

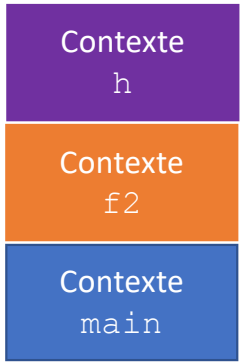
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



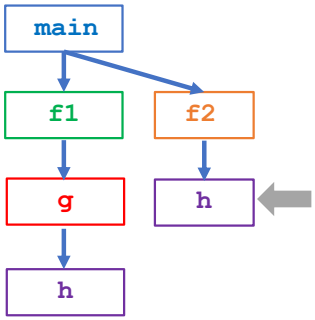
A l'exécution



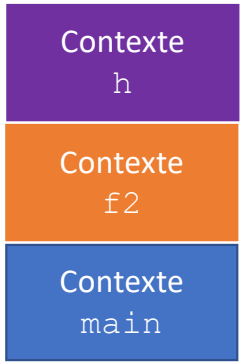
Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



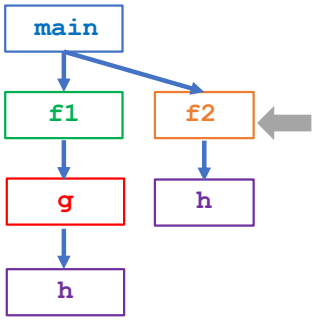
A l'exécution



Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels

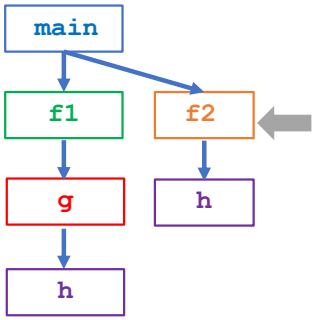


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels

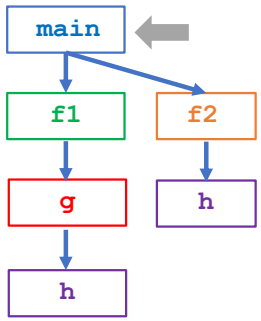


A l'exécution

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

Graphe d'appels



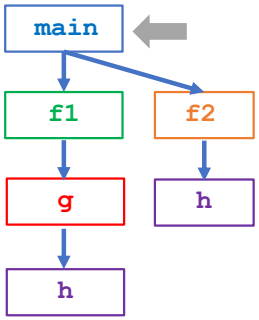
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
   …
   f1();
   …
   f2();
   …
   exit();
}
void f1(){
   …
   g();
   return;
}
void g(){
   …
   h();
   return;
}
void h(){
   …
   return;
}
void f2(){
   …
   h();
   return;
}
```

Graphe d'appels



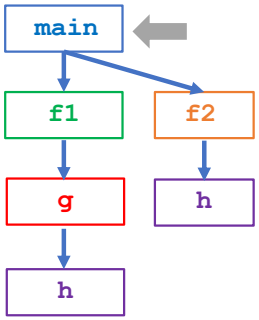
A l'exécution

Contexte
main

Contexte de fonctions et structure de pile

```
void main(){
  …
  f1();
  …
  f2();
  …
  exit();
}
void f1(){
  …
  g();
  return;
}
void g(){
  …
  h();
  return;
}
void h(){
  …
  return;
}
void f2(){
  …
  h();
  return;
}
```

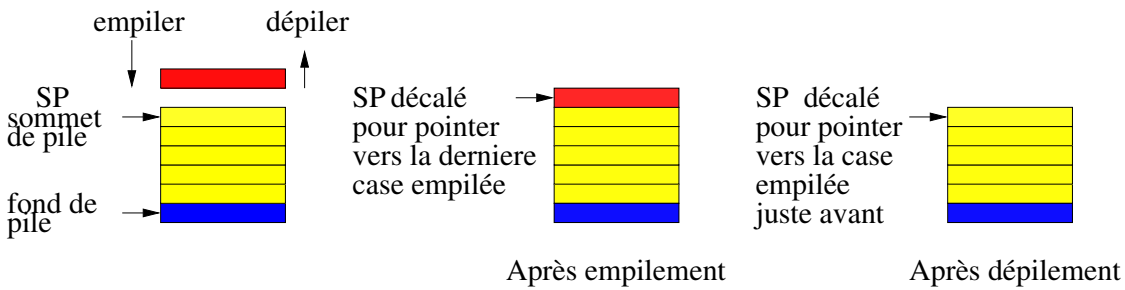
Graphe d'appels



A l'exécution

Segment de pile

- Le segment de pile est un segment en mémoire : ensemble d'adresses contiguës accessibles par le processeur
- On y accède comme au segment de données, avec des instructions de transfert mémoire et une adresse de base : celle du sommet de pile contenue dans un registre dédié (`$29` en MIPS).
- Le segment de pile est utilisé comme une pile en réalisant les opérations "empiler" et "dépiler" dynamiquement avec des instructions du processeur
  - Allouer de la mémoire au sommet de pile ≡ modifier l'adresse du sommet de pile
  - Désallouer de la mémoire au sommet de pile ≡ modifier l'adresse du sommet de pile
  - Accès au contenu la pile : lecture ou écriture de données dans la pile ≡ `load` ou `store`.
    Attention : pas le droit d'accéder à un emplacement non alloué !



Implantation de la pile en Mips

Organisation de la pile

- De manière générale, dépend de la machine cible
- En Mips, le registre $29 contient l'adresse du sommet de la pile, et le sommet de la pile est la dernière case occupée (et non la première libre)
- Ce registre est appelé le "pointeur de pile" (SP, Stack Pointer)
- En Mips, la pile grandit vers les adresses décroissantes
  - Allouer dans la pile revient à décrémenter $29
  - Désallouer dans la pile revient à incrémenter $29
- $29 doit toujours contenir l'adresse d'un mot du segment de pile (soit une adresse multiple de 4)
  - Au chargement il contient l'adresse du fond de pile (0x7FFFFFFC dans la convention Mips)

Allocation et désallocation d'un contexte

Prologue d'une fonction et du programme principal

- Premières instructions exécutées par la fonction / le programme principal pour allouer les emplacements mémoire du contexte et réaliser les opérations nécessaires à son remplissage
- Allocation $\equiv$ décrémentation de \$29 de $\mathtt{X}$ octets, avec $\mathtt{X}$ satisfaisant 2 contraintes
  - 1ère contrainte : $\mathtt{X} \geq$ place nécessaire pour les emplacements de toutes les variables locales en respectant les contraintes d'alignement imposées par leur taille (cf. allocation variables globales).
  - 2ème contrainte : alignement du pointeur de pile, $\mathtt{X}$ est un multiple de 4
- Initialisation des variables locales par des écritures mémoire à leur emplacement sur la pile
  - Dans ce cours : l'emplacement de la variable déclarée en premier se trouve au sommet de la pile

Exemple (incomplet) avec variables locales

Code C

```c
void main() {
   int a = 5;
   int b = 9;
   int c;
   c = a + b;
   exit();
 }
```

Code ASM

```
.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots
# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5      # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)     # a <- 5
ori   $8, $0, 9      # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)     # b <- 9

# corps du main

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```

- 3 variables locales de type `int` : 3 mots alloués sur la pile dans le prologue
- Première variable déclarée au sommet de pile : `a` est à l'adresse $29, `b` à l'adresse ($29 + 4), `c` à l'adresse ($29 + 8)
- Initialisation de `a` et `b`

Désallocation d'un contexte

Epilogue d'une fonction et du programme principal

- Dernières instructions exécutées par la fonction / programme principal avant de retourner à la fonction appelante / finir le programme
- Récupération quand nécessaire d'informations mises dans le contexte : rien à faire pour les variables locales
- Désallocation du contexte : incrémentation de \$29 de `X` (même quantité que l'allocation dans le prologue)

Exemple (incomplet) avec variables locales

Code C

```c
void main() {
   int a = 5;
   int b = 9;
   int c;
   c = a + b;
   exit();
 }
```

Code ASM

```
.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots
# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots
# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```

- 3 variables locales de type `int` : 3 mots alloués sur la pile dans le prologue, 3 mots désalloués dans l'épiloque

Contexte d'exécution d'une fonction

Contexte d'exécution

- Zone mémoire contiguë dans la pile contenant différentes informations relatives à une exécution d'une fonction
- Notamment des emplacements mémoires pour les variables locales de la fonction
- Mais aussi des emplacements pour
  - la sauvegarde des registres persistants (voir prochain cours)
  - les paramètres à passer aux fonctions appélées par la fonction (voir prochain cours)
  - la sauvegarde temporaire de calculs intermédiaires lorsque l'on manque de registre pour faire les calculs (dépend du nombre de registres généraux et des calculs réalisés par la fonction – on ne rencontrera pas ce cas dans ce cours)

Traduction assembleur des accès aux variables d'un programme C

Traduction littérale

- Chaque lecture d'une variable `v`, d'un élement de tableau `tab[i]`, ou champ de structure `ms.x` correspond à un `load` à l'emplacement mémoire de `v`, de `tab[i]` [a] ou de `ms.x`
- Chaque écriture d'une variable `v`, d'un élement de tableau `tab[i]`, ou champ de structure `ms.x` correspond à un `store` en mémoire à l'emplacement correspondant
- Vrai pour les variables globales ET les variables locales
- Une variable n'est pas associée à un registre : il peut y avoir beaucoup de variables (des centaines) alors qu'il n'y aura toujours que 32 registres
  - Les registres ne sont utilisés que de façon très temporaire
  - Différents `load` de la même variable peuvent avoir des registres de destination différents
  - Un même registre peut contenir les valeurs de variables différentes au cours de l'exécution d'une fonction

a. NB : `i` est une variable locale, il faut lire sa valeur en mémoire pour calculer l'adresse de `tab[i]` !

Exemple complet avec variables locales

Code C

```c
void main() {
   int a = 5;
   int b = 9;
   int c;
   c = a + b;
   exit();
 }
```

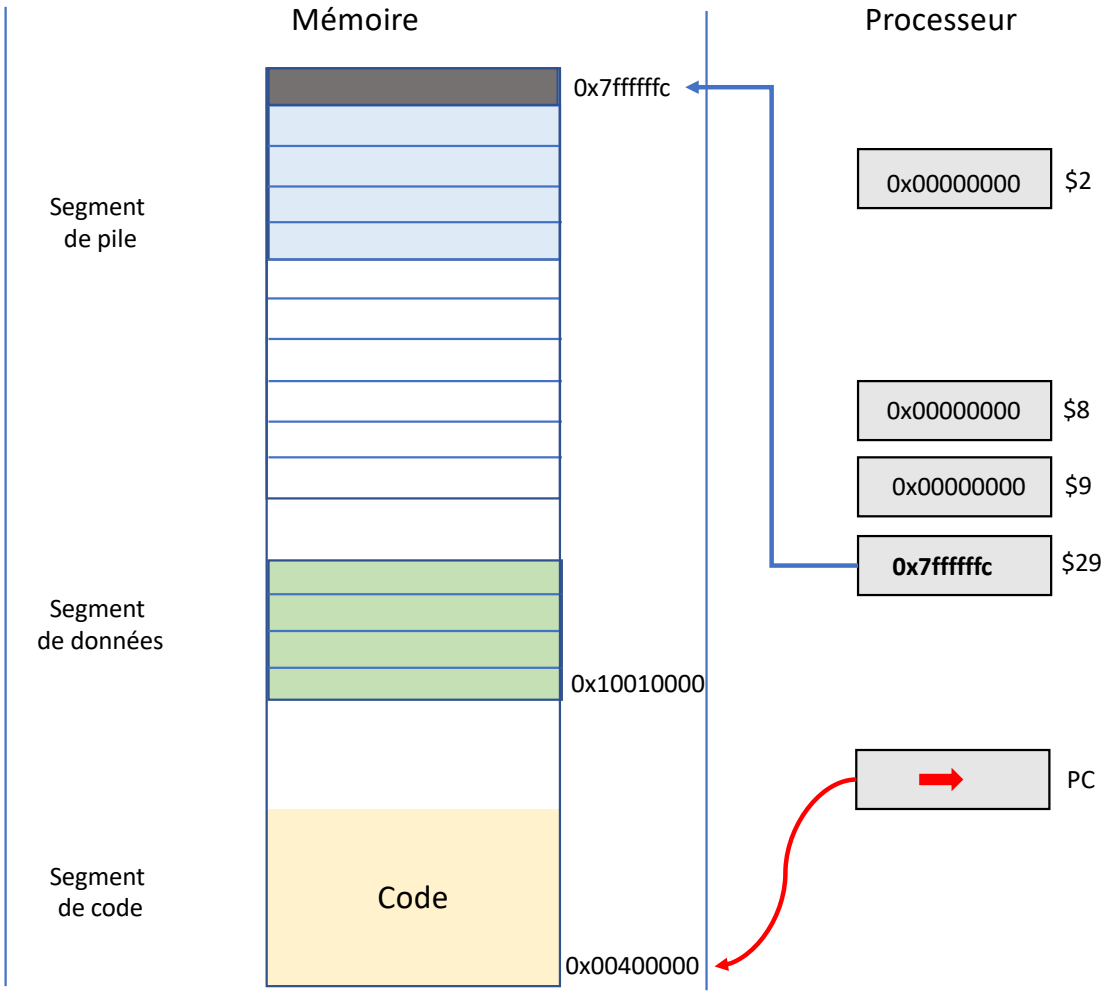
Code ASM

```
.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots
# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5       # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)      # a <- 5
ori   $8, $0, 9       # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)      # b <- 9
# corps du main
lw    $8, 0($29)      # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)      # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9      # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)      # c <- 14  (écriture de c)
# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots
# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```

- Lecture de `a` et `b` sur la pile (adresses $29 et ($29+4)), écriture de la valeur de `c` sur la pile (adresse ($29+8))

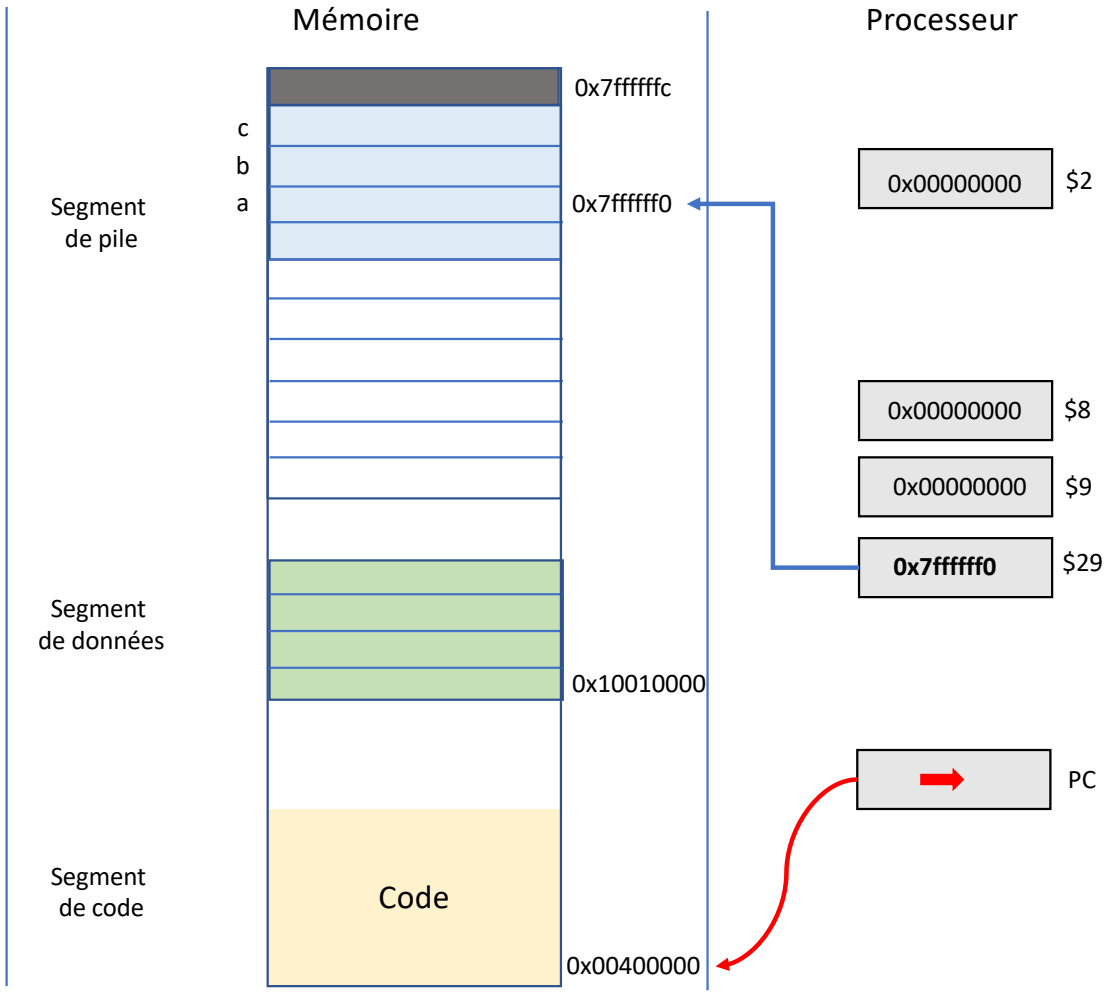
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5      # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)     # a <- 5
ori   $8, $0, 9      # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)     # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)     # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)     # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9     # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)     # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12  # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



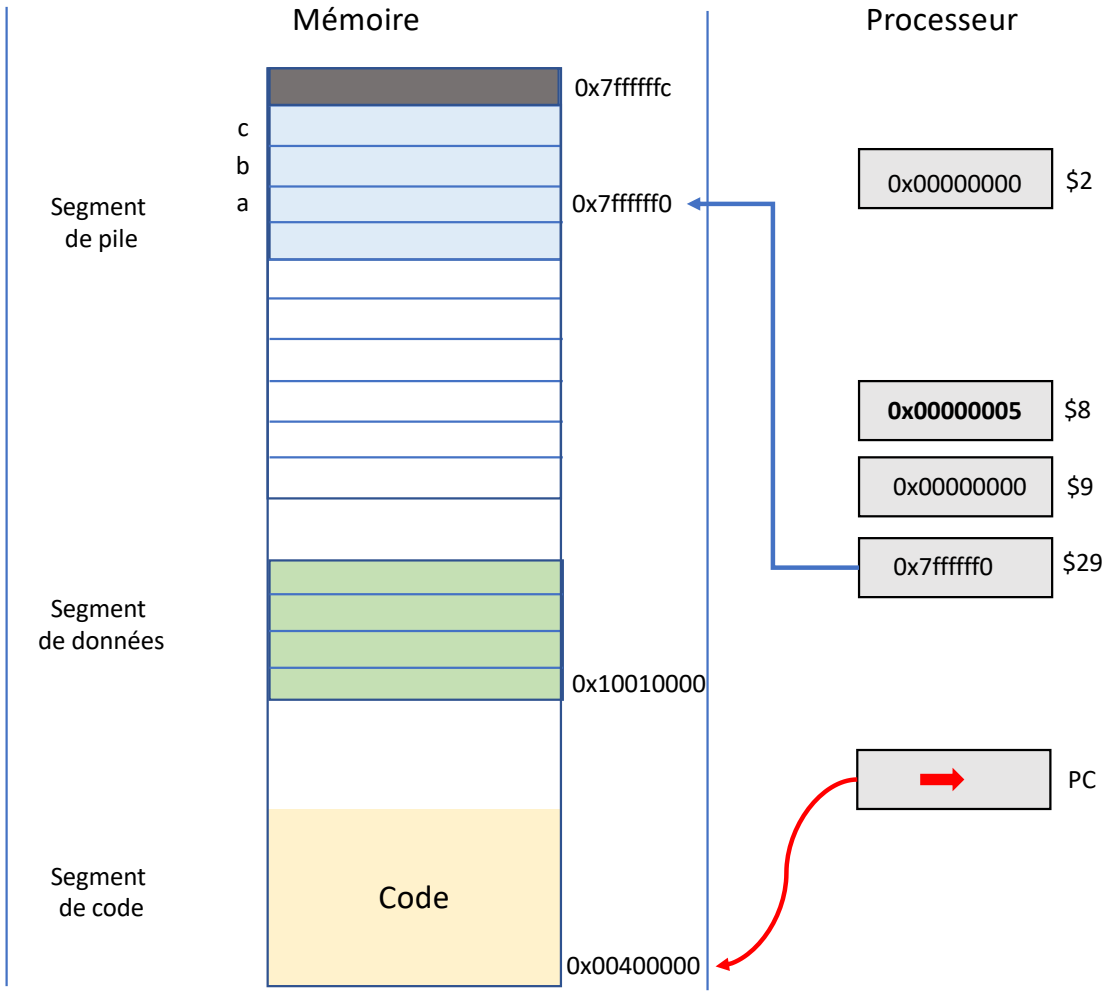
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



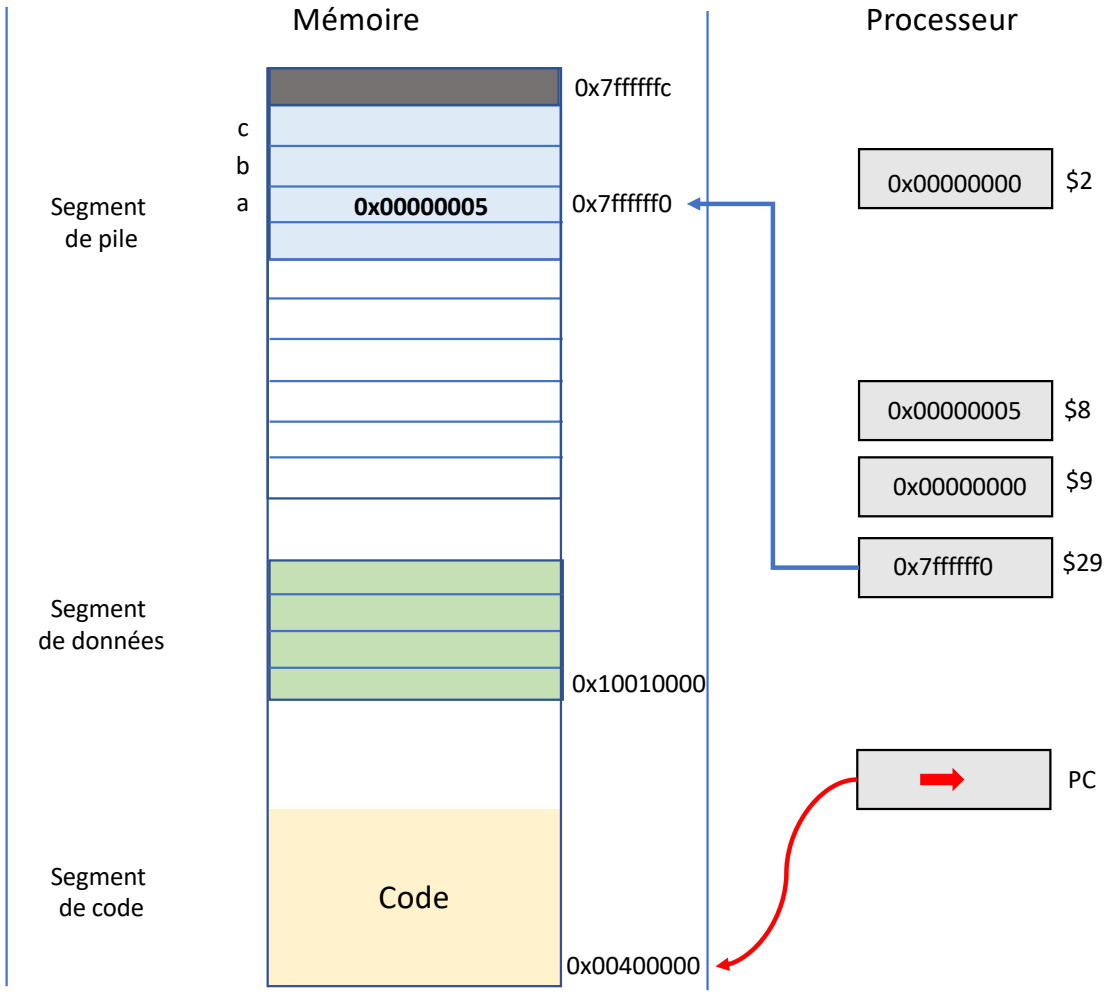
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



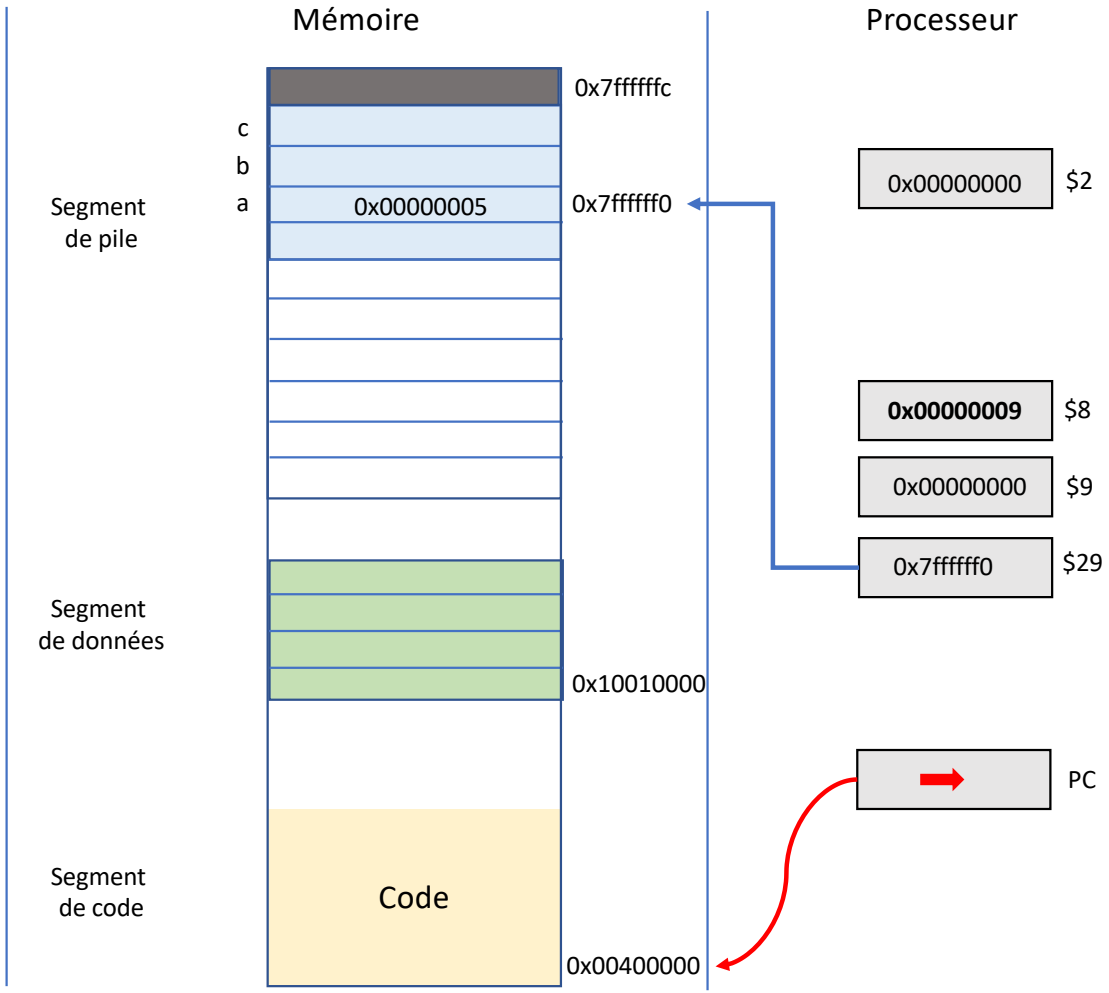
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



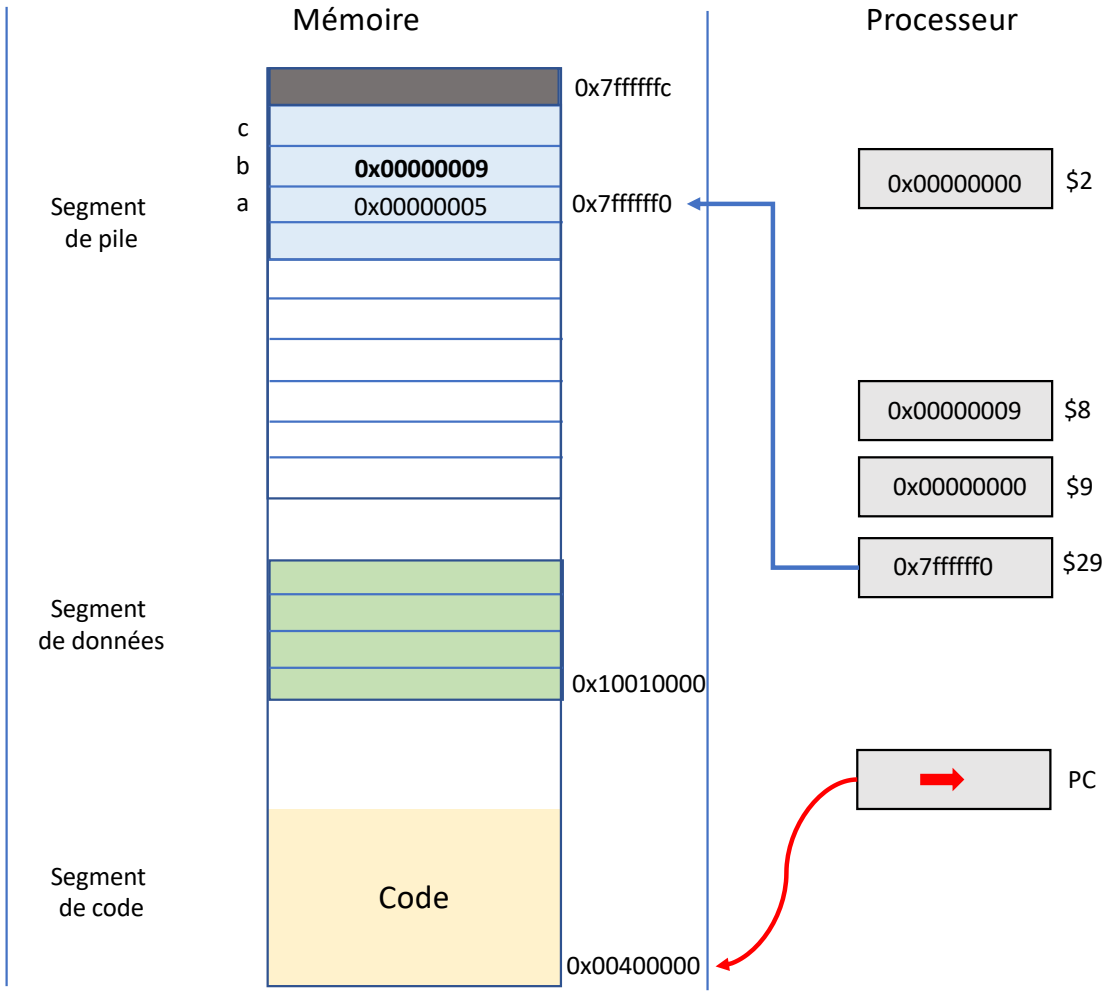
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



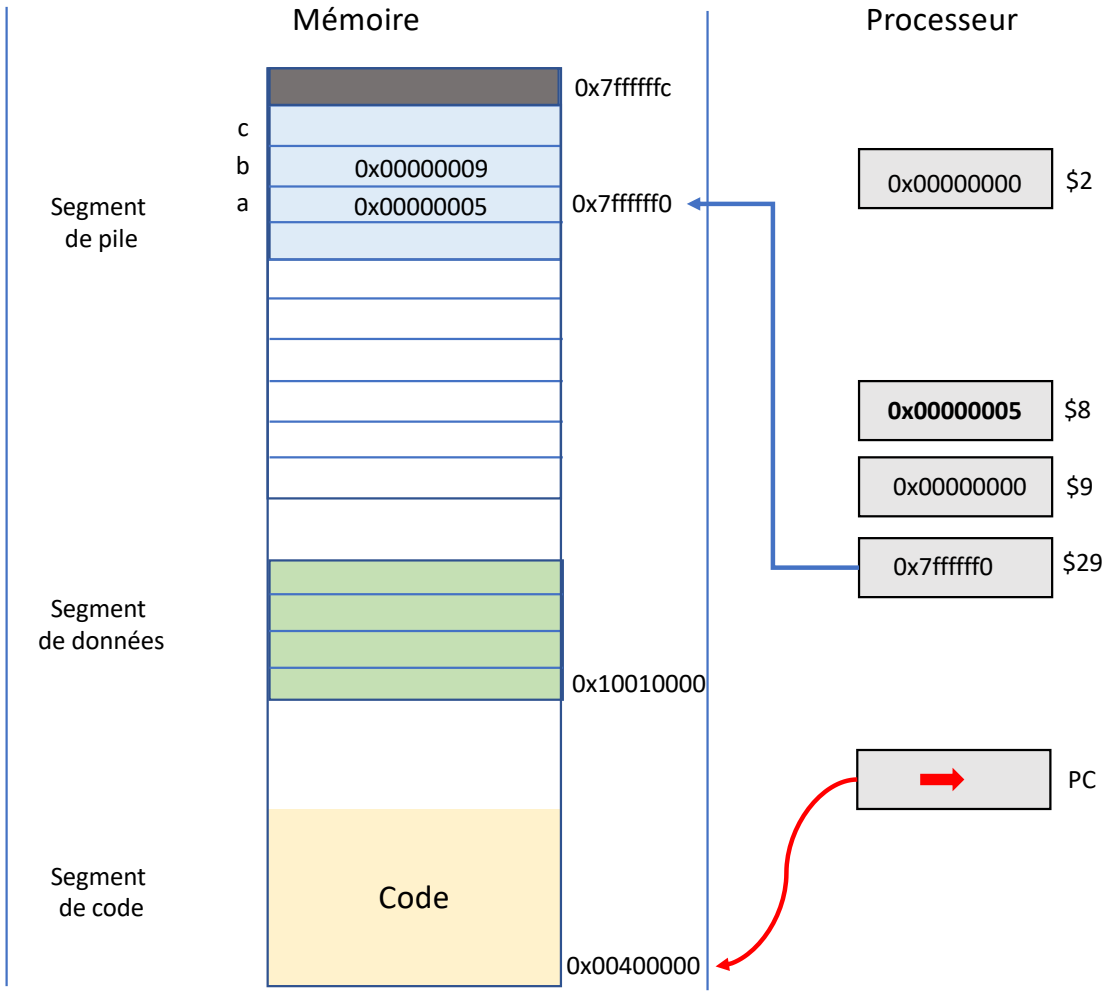
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



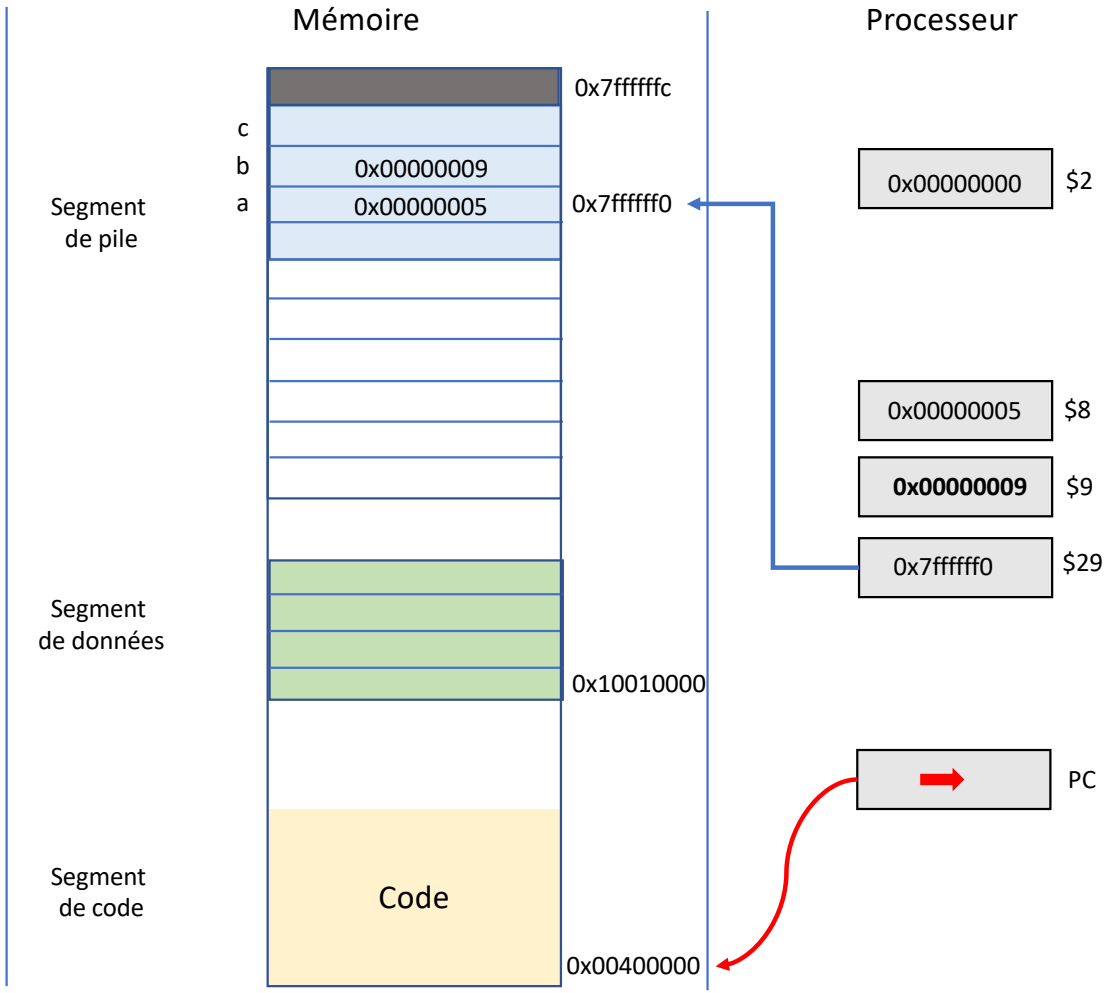
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



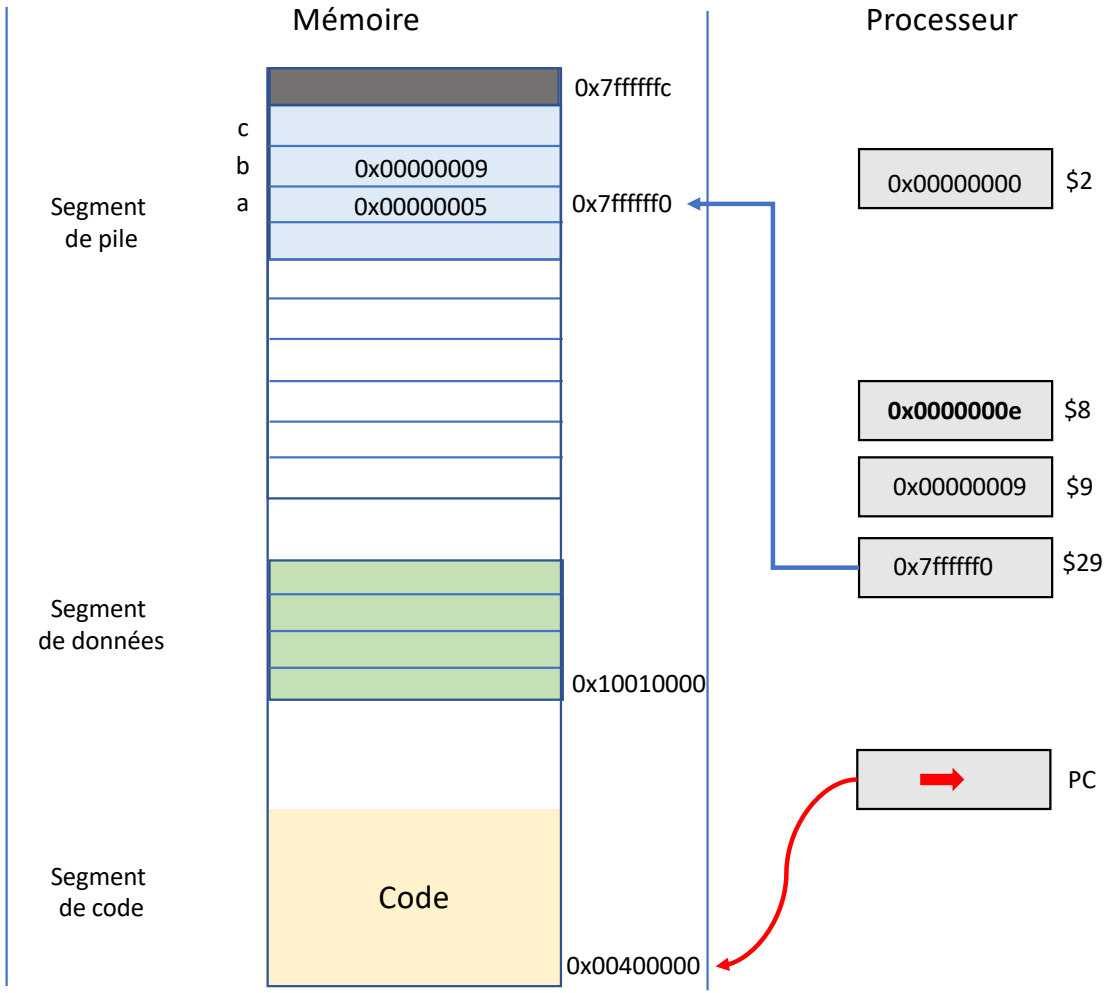
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



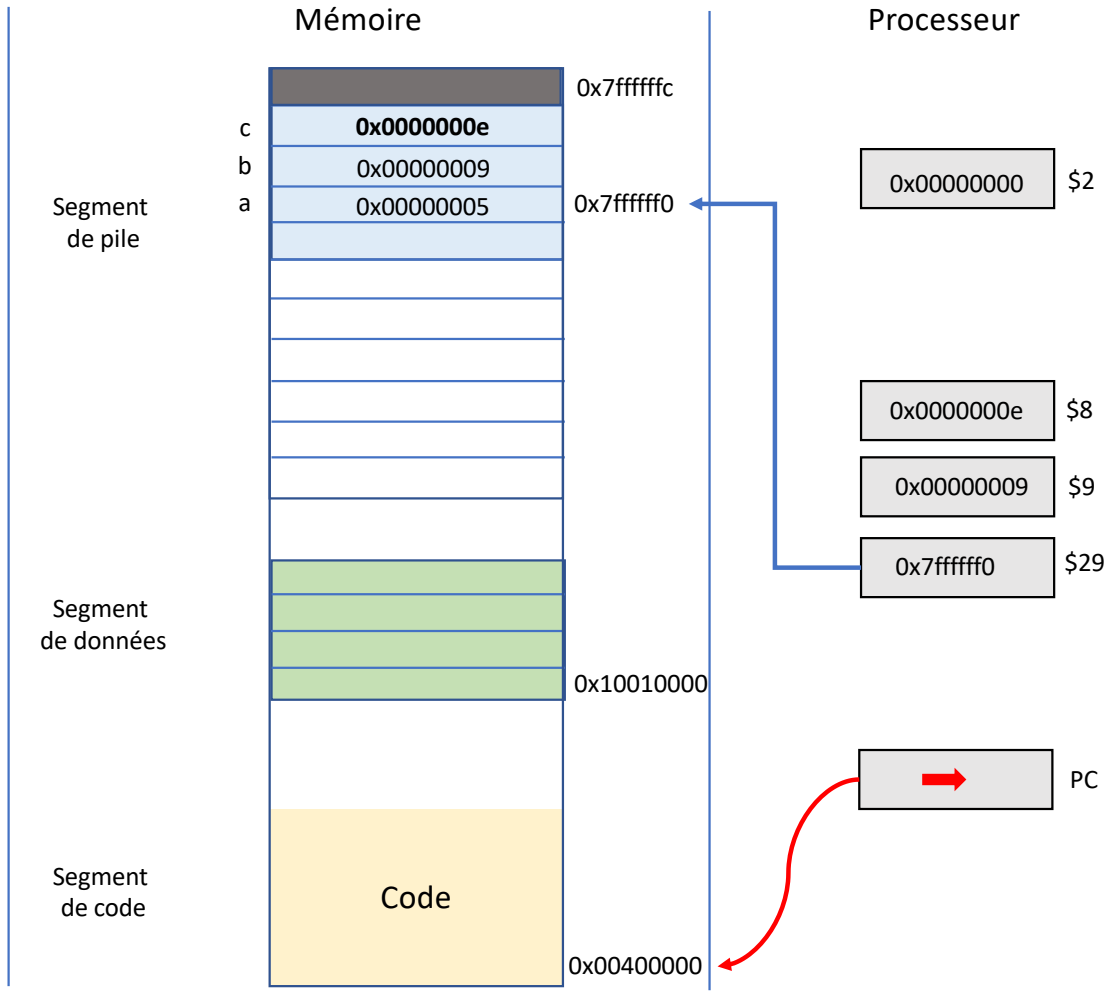
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



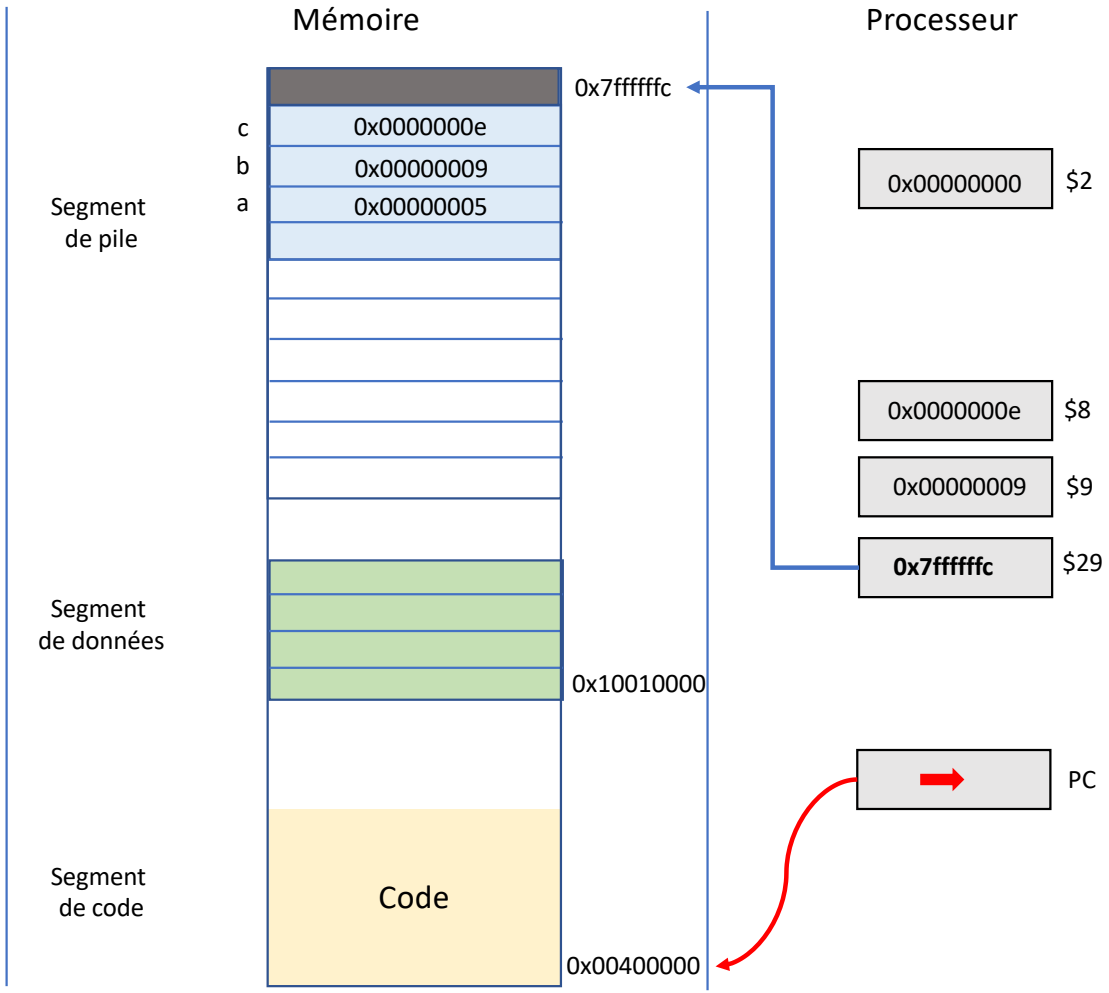
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



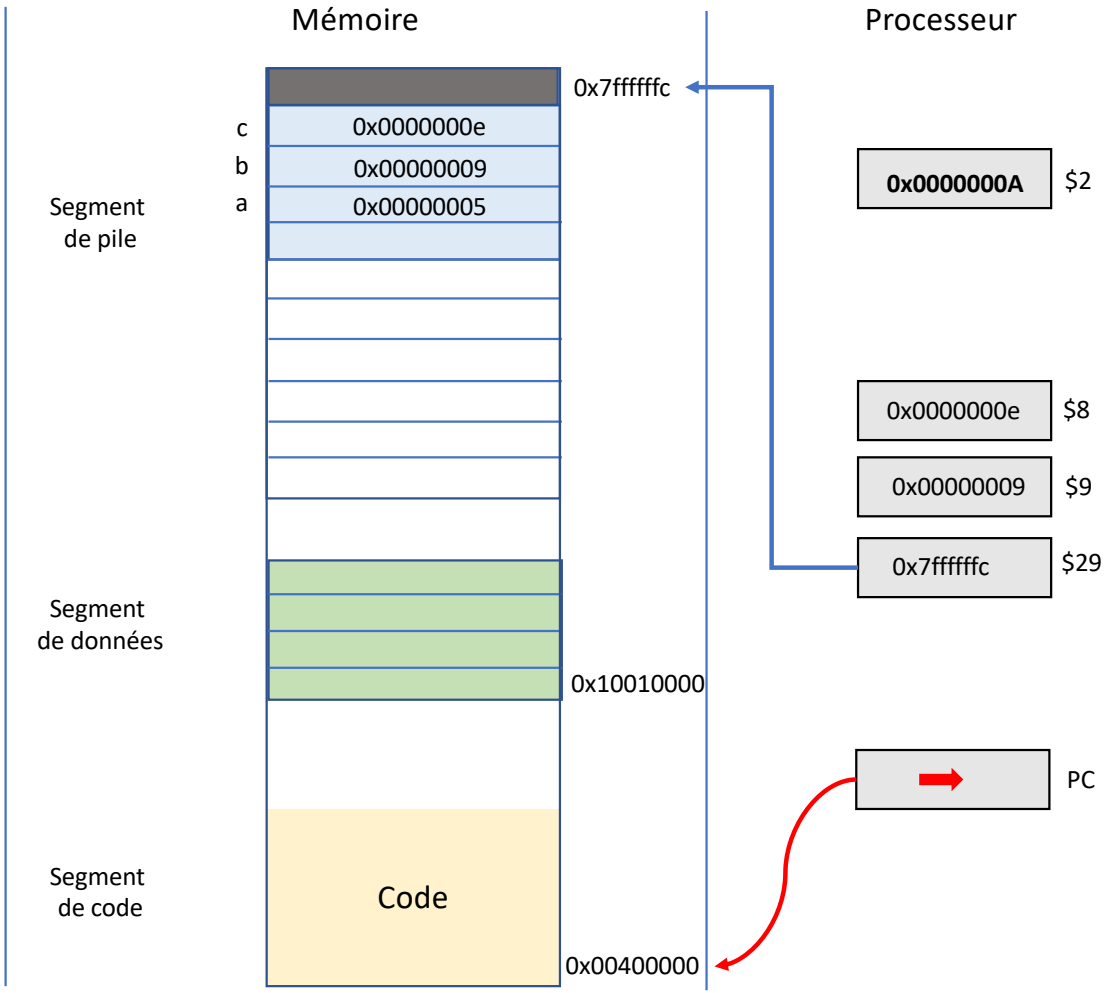
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



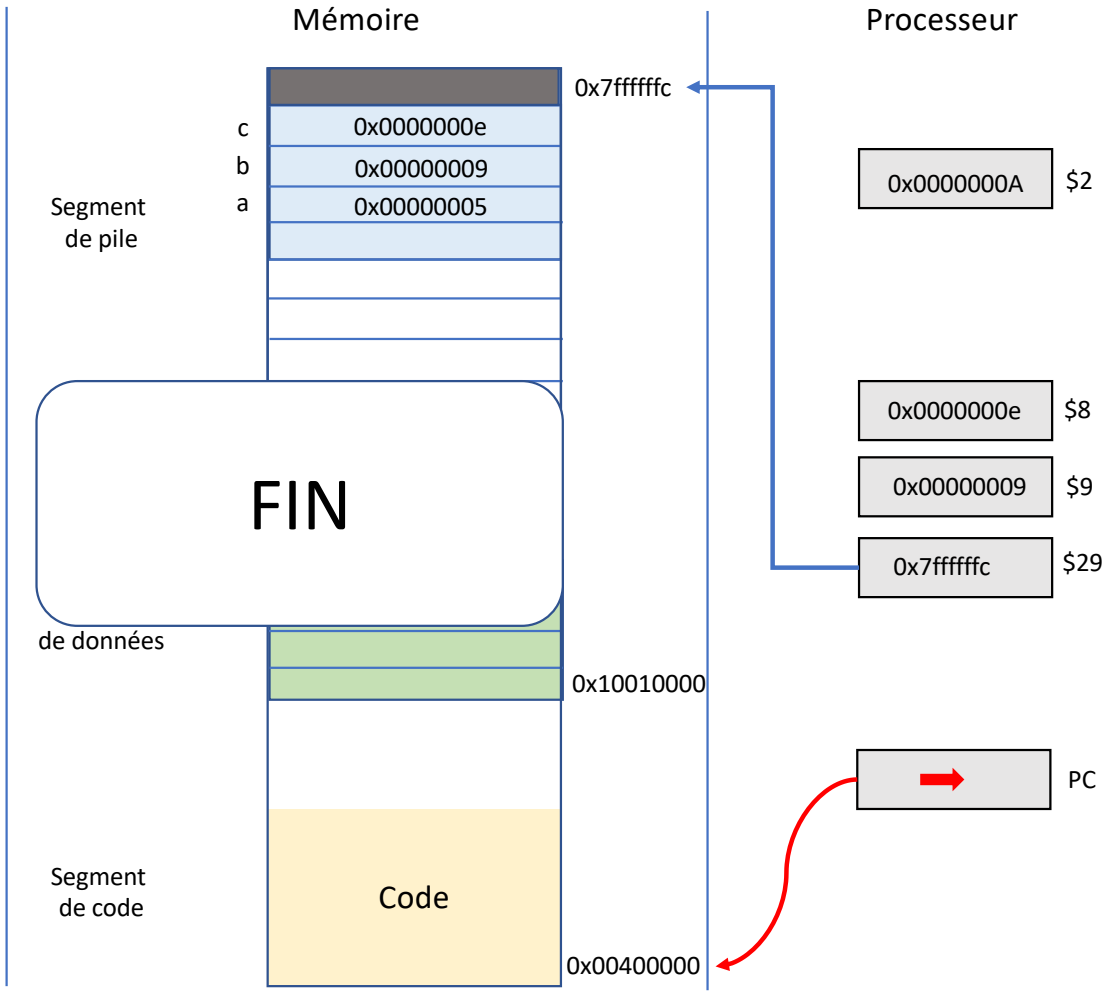
Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# epilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



Simulation de l'exécution de l'exemple

```
.data

.text
#prologue du main
addiu $29, $29, -12 # allocation de 3 mots

# initialisation des variables
ori   $8, $0, 5     # $8 <- 5
sw    $8, 0($29)    # a <- 5
ori   $8, $0, 9     # $8 <- 9
sw    $8, 4($29)    # b <- 9

# corps du main
lw    $8, 0($29)    # $8 <- a (lecture de a)
lw    $9, 4($29)    # $9 <- b (lecture de b)
addu  $8, $8, $9    # $8 <- 14 (a + b)
sw    $8, 8($29)    # c <- 14  (écriture de c)

# épilogue du main
addiu $29, $29, 12 # désallocation des 3 mots

# exit
ori   $2, $0, 10
syscall
```



Optimisation des accès aux variables

- On peut *optimiser* le code assembleur pour réduire le nombre d'instructions du code et donc reduire et sa taille et son temps d'execution
- Optimisation manuelle ou *via* des options spécifiques du compilateur
- Optimisation possible : réduction des accès mémoire aux variables
- Cas des variables locales
  - On peut (parfois) faire l'association d'une variable locale (i.e. dont l'emplacement mémoire est en pile) avec un registre et éliminer les accès à l'emplacement mémoire de la variable locale, mais il faut garder en tête que c'est une optimisation, et non une approche générale
  - Mais même dans ce cas, on doit allouer sur pile la place correspondant à la variable locale optimisée
- Cas des variables globales
  - On peut éviter de relire une variable globale en mémoire lorsque sa valeur est déjà dans un registre et qu'on est sûr qu'elle n'a pas changé
  - On n'a pas le droit d'éliminer les écritures en mémoire des variables globales
- Autre optimisation : élimination de calculs redondants, par exemple une adresse calculée (`&tab[i]`), en conservant la valeur dans un registre

Exemple avec variables locales optimisées en registre

Code C

```
void main() {
   int a = 5;
   int b = 9;
   int c;
   c = a + b;
   exit();
}
```

Code ASM

```
addiu $29, $29, -12 # alloue 3 mots
ori   $8, $0, 5     # a <- 5
ori   $9, $0, 9     # b <- 9
addu  $10, $8, $9   # c <- 14
addiu $29, $29, 12  # désallocation
ori   $2, $0, 10
syscall
```

- `a` est optimisée dans le registre $8, `b` est optimisée dans le registre $9, `c` est optimisée dans le registre $10

Exemple de programme complet

Programme C : passer une chaine en majuscule

```c
char str[] = "helloworld";

int main() {
   int i = 0;
   while (str[i] != '\0') {
      str[i] = str[i] - 0x20;
      i = i + 1;
   }
   return 0;
}
```

Exemple de programme complet

```
.data
str: .asciiz "helloworld"

.text
  # Prologue du main
  addiu $29, $29, -4        # 1 variable locale : i
  sw    $0, 0($29)          # i = 0

  # Corps du main
loop:
  # Condition de la boucle while
  lui   $8, 0x1001              # $8 = 0x10010000 = @str
  lw    $9, 0($29)              # lecture i
  addu  $9, $8, $9              # $9 = &str[i] = @str +
  lb    $9, 0($9)               # $9 = str[i]
  beq   $9, $0, finloop  # test str[i] == 0
  # Corps du while
```

Exemple de programme complet

```
    # Corps du while
        # lecture str[i]
    lui   $8, 0x1001            # $8 = 0x10010000 = @str
    lw    $9, 0($29)            # lecture i
    addu  $9, $8, $9            # $9 = &str[i] = @str + i
    lb    $9, 0($9)             # $9 = str[i]
    addiu $9, $9, -0x20   ;?# str[i] - 0x20 ?;
        # écriture str[i]
    lui   $8, 0x1001        # $8 = 0x10010000 = @str
    lw    $10, 0($29)       # lecture i
    addu  $10, $8, $10      # $10 = &str[i] = @str + i
    sb    $9, 0($10)        # écriture str[i]
        # i = i + 1
    lw    $9, 0($29)            # lecture i
    addiu $9, $9, 1             # i + 1
    sw    $9, 0($29)            # écriture i
    # Retour au début de la boucle
    j     loop

finloop:
    # Epilogue du main
    addiu $29, $29, 4           # Désallocation dans la pile
    ori   $2, $0, 10
    syscall                     # exit
```

Exemple de programme complet

Reqmarques sur le programme Mips

- Un peu long, mais à peu de chose près, c'est exactement le code généré par gcc (sans optimisation)
- Traduction facile à automatiser : c'est ça qu'il faut savoir faire
- Néanmoins, on peut largement optimiser ce code (à la main ou avec une option type -O2)
- Exemples d'optimisations à suivre :
  1. optimisation de la variable `i` en registre + élimination d'accès mémoire et calculs d'adresse redondants
  2. optimisation qui élimine entièrement l'utilisation de la variable i mais pas son emplacement en pile !
- Attention :
  - Vous devez savoir écrire des programmes traduits littéralement et comprendre les optimisations possibles des variables locales
  - Optimisation seulement une fois que la version de base est maitrisée !
- L'optimisation de code relève du domaine de la compilation (= 👍)

Exemple avec optimisation des accès mémoire

```
.data
str: .asciiz "helloworld"

.text
  addiu $29, $29, -4          # 1 variable locale : i
  ori   $8, $0, 0             # i <- 0, $8 <- valeur de i
  # Corps du main
  lui   $9, 0x1001            # $9 = 0x10010000 = @str
loop:
  # Condition de la boucle while
  addu  $10, $9, $8            # $10 <- &(str[i]) = @str + i
  lb    $11, 0($10)            # $11 <- str[i]
  beq   $11, $0, finloop       # test str[i] == 0
  # Corps du while
  addiu $11, $11, -0x20  # $11 <- str[i]-0x20 ($11 déjà contient str[i])
  sb    $11, 0($10)      # str[i]   ($10 déjà contient &(str[i]))
  addiu $8, $8, 1        # incrémentation valeur de i
  # Retour au début de la boucle
  j     loop
finloop:
  addiu $29, $29, 4            # Désallocation dans la pile
  ori   $2, $0, 10
  syscall                      # exit
```

Exemple sans utilisation de la variable locale `i`

```
.data
str: .asciiz "helloworld"

.text
  # Prologue du main
  addiu $29, $29, -4          # 1 variable locale : i

  # Corps du main
  lui   $8, 0x1001            # $8 = &(str[0]) = str
loop:
  lb    $9, 0($8)             # $9 = element courant
  beq   $9, $0, fin           # test element courant  == 0

  addiu $9, $9, -0x20         # $9 = element courant - 0x20
  sb    $9, 0($8)             # écriture élement courant
  addiu $8, $8, 1             # $8 <- adresse element suivant
                              # incrémentation de l'adresse
  j     loop
fin:
  # Epilogue du main
  addiu $29, $29, 4
  ori   $2, $0, 10
  syscall
```

Tableaux et enregistrements en variables locales

- Ce sont des variables locales comme les autres, il faut donc :
  - allouer sur la pile l'espace nécessaire pour ces variables en suivant les consignes,
  - initialiser, en cohérence avec le code source, chaque élément des tableaux, chaque champ des structures avec des instructions d'écriture mémoire
- Le code du programme principal est ensuite la traduction du code C :
  - quand on doit accéder à une variable locale de type tableau ou enregistrement on sait où elle est rangée en pile, son adresse est relative au sommet de pile ;
  - pour simplifier ces accès, on met en général l'adresse du tableau ou de la structure dans un registre qu'on utilise ensuite lors des accès aux éléments/champs.

Exemple de programme complet

Programme C : passer une chaine en majuscule

```c
int main() {
   int i = 0;
   char str[] = "abc";

   while (str[i] != '\0') {
      str[i] = str[i] - 0x20;
      i = i + 1;
   }
   return 0;
}
```

Tableau local et optimisation des accès mémoire

```
.data
.text
  addiu $29, $29, -8          # 1 variable locale : i + ch (4 octets)
  ori   $8, $0, 0x61          # $8 <- 'a'
  sb    $8, 4($29)            # str[0] <- 'a'
  ori   $8, $0, 0x62          # $8 <- 'b'
  sb    $8, 5($29)            # str[1] <- 'b'
  ori   $8, $0, 0x63          # $8 <- 'c'
  sb    $8, 6($29)            # str[3] <- 'c'
  ori   $8, $0, 0             # $8 <- 0x00
  sb    $8, 7($29)            # str[3] <- 0x00
  ori   $9, $0,  0            # i <- 0, $9 <- valeur de i
  # Corps du main
  addiu  $8, $29, 4          # $8 = @str
loop:
  # Condition de la boucle while
  addu  $10, $8, $9             # $10 <- &str[i] = @str + i
  lb    $11, 0($10)             # $11 <- str[i]
  beq   $11, $0, finloop        # test str[i] == 0
  # Corps du while
  addiu $11, $11, -0x20  # $11 <- str[i]-0x20 ($11 contient déjà str[i])

  sb    $11, 0($10)      # écriture str[i]   ($10 contient déjà &str[i])
  addiu $8, $8, 1        # incrémentation valeur de i
  j     loop             # Retour au début de la boucle
```

Conclusion

On a vu

- L'implantation mémoire de données structurées (tableau et enregistrement)
- La notion de contexte d'exécution d'une fonction
- Le segment de pile et son utilisation pour allouer les variables locales du programme principal
- La traduction littérale d'un programme C en assembleur
- Les optimisations possibles
- Les données structurées en variable locale

Vous devez savoir :

- traduire des codes C manipulant des données structurées, ayant des variables locales. Traduction littérale (sans optimisation) puis avec optimisation.

Prochain cours : fonctions et convention d'appels.