Systèmes d'exploitations

Cours 2: De l'architecture matérielle au programme

Matthieu Lemerre
CEA LIST

Année 2023-2024

Introduction

But de ce cours:

1. Rappeler le principe de fonctionnement d'un ordinateur
   - En particulier: couple processeur/mémoire
2. Expliquer pourquoi et comment est organisé le programme pour pouvoir écrire des programmes complexes
   - En particulier: comment est compilé le C?

Quelques applications de ce cours

- Compréhension et écriture de programmes systèmes: systèmes embarqués, garbage collectors, morceaux de systèmes d'exploitations (pilotes), compilateurs
- Assembleur: Reverse engineering et analyses de sécurité
- Connaissances nécessaires pour savoir bien programmer en C (et C++)

Sommaire

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Binary digits, la plus petite unité d'information. Peut valoir 0 ou 1.

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Binary digits, la plus petite unité d'information. Peut valoir 0 ou 1.

Octet (byte)

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Binary digits, la plus petite unité d'information. Peut valoir 0 ou 1.

Octet (byte)

La plus petite unité de mémoire adressable. Généralement 8 bits.

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Binary digits, la plus petite unité d'information. Peut valoir 0 ou 1.

Octet (byte)

La plus petite unité de mémoire adressable. Généralement 8 bits.

Mot (word)

Définitions: bit, octets et mots

Bits

Binary digits, la plus petite unité d'information. Peut valoir 0 ou 1.

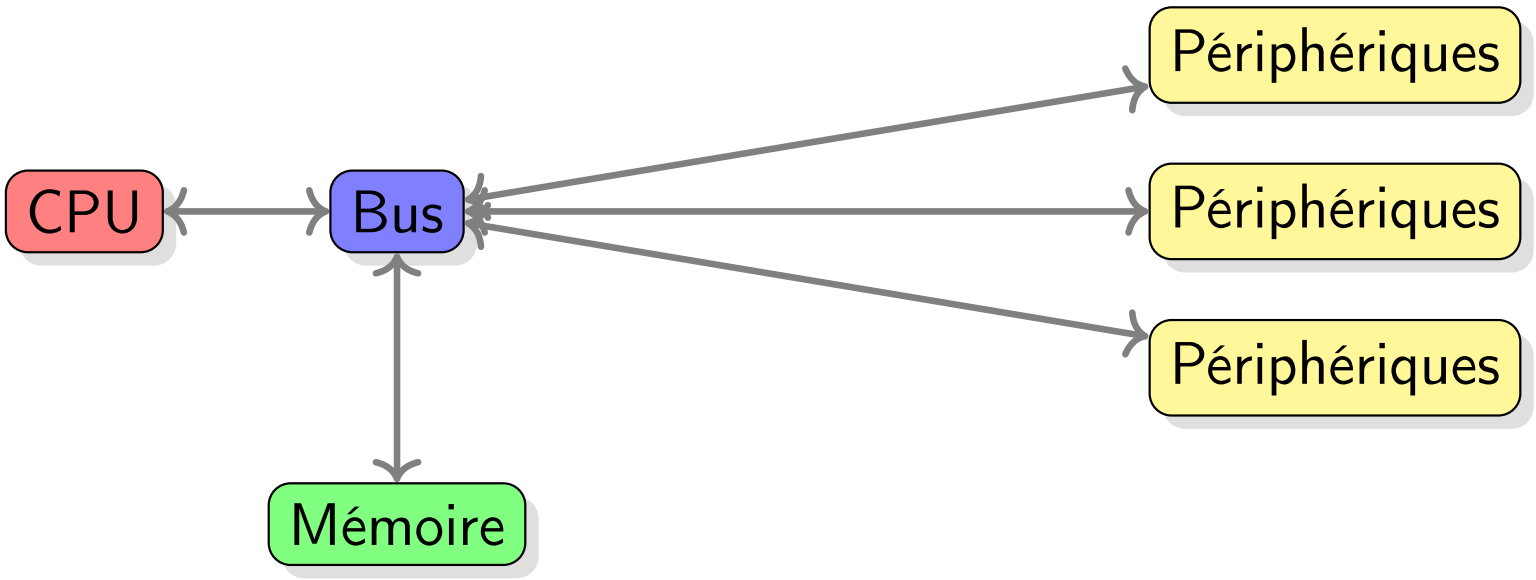
Octet (byte)

La plus petite unité de mémoire adressable. Généralement 8 bits.

Mot (word)

L'unité de mémoire manipulée naturellement par un processeur, composée de plusieurs octets. Généralement 8,16,32,64,ou 128 bits.

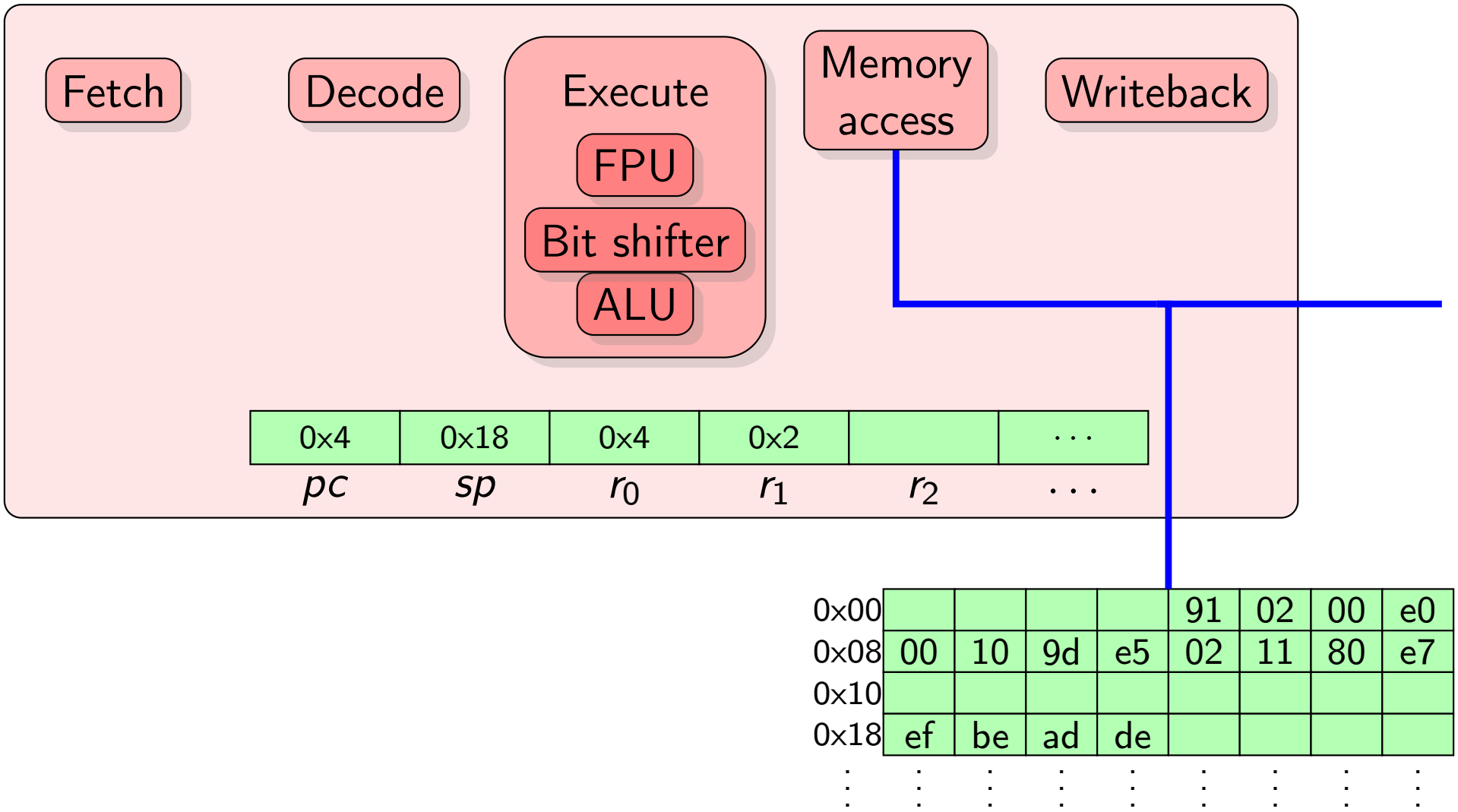
Vue haut-niveau



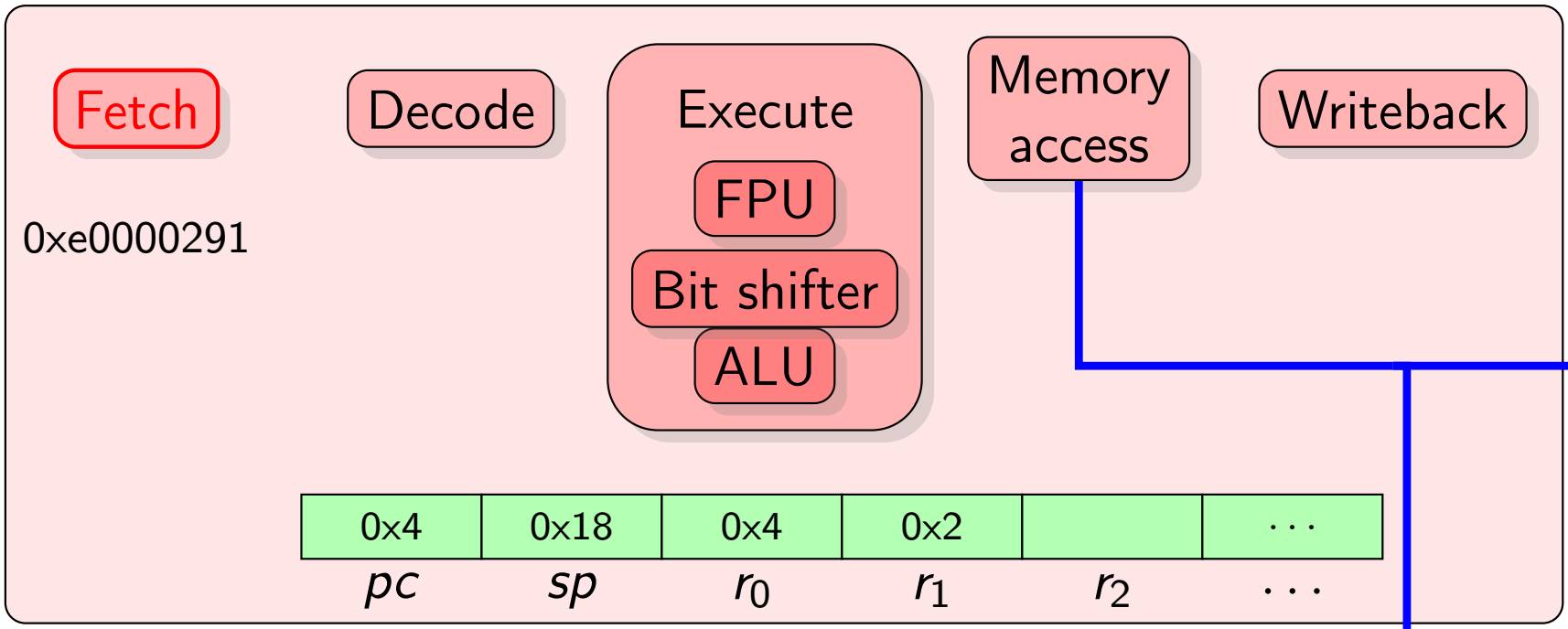
Architecture Von Neumann

La *même* mémoire est utilisée pour stocker les *instructions* et les *données* des programmes.

Fonctionnement du processeur



Fonctionnement du processeur

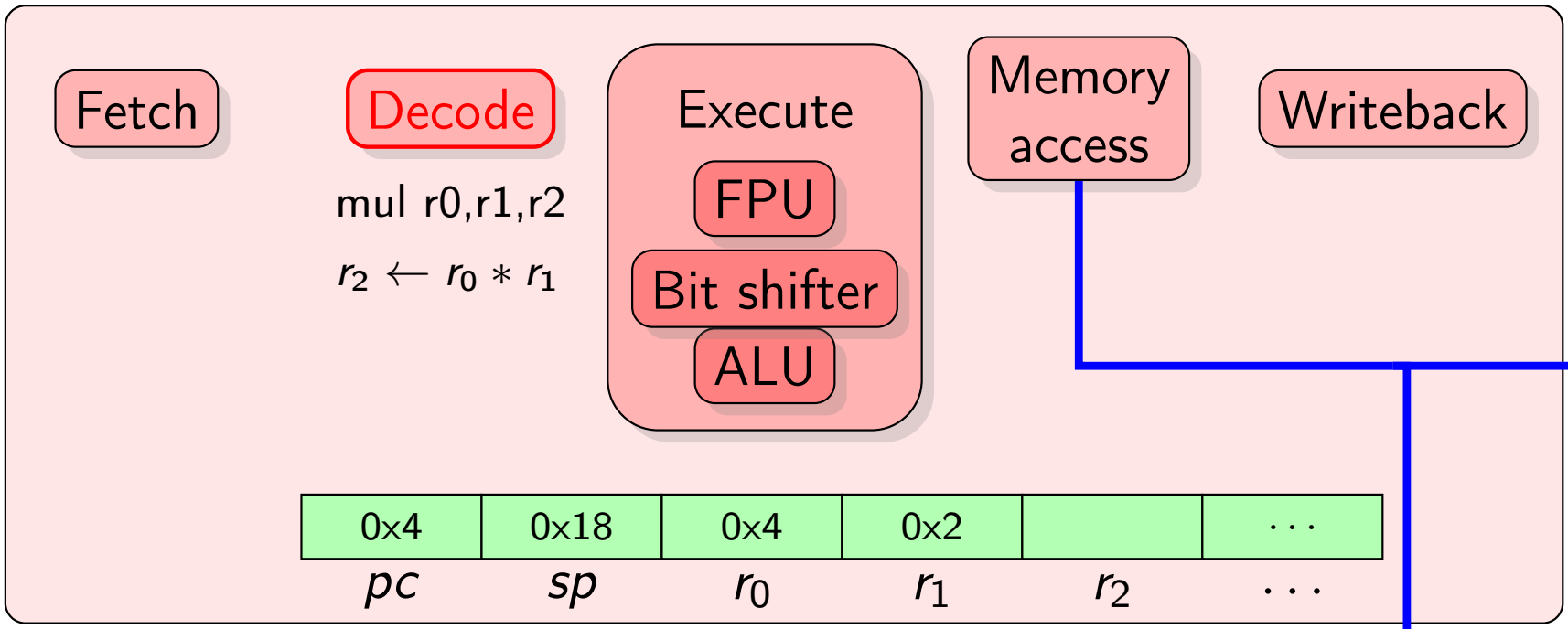


Fetch (récupération)

Récupération du mot d'instruction pointé par le pointeur d'instruction (pc, program counter).

0x00					91	02	00	e0
0x08	00	10	9d	e5	02	11	80	e7
0x10								
0x18	ef	be	ad	de				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fonctionnement du processeur

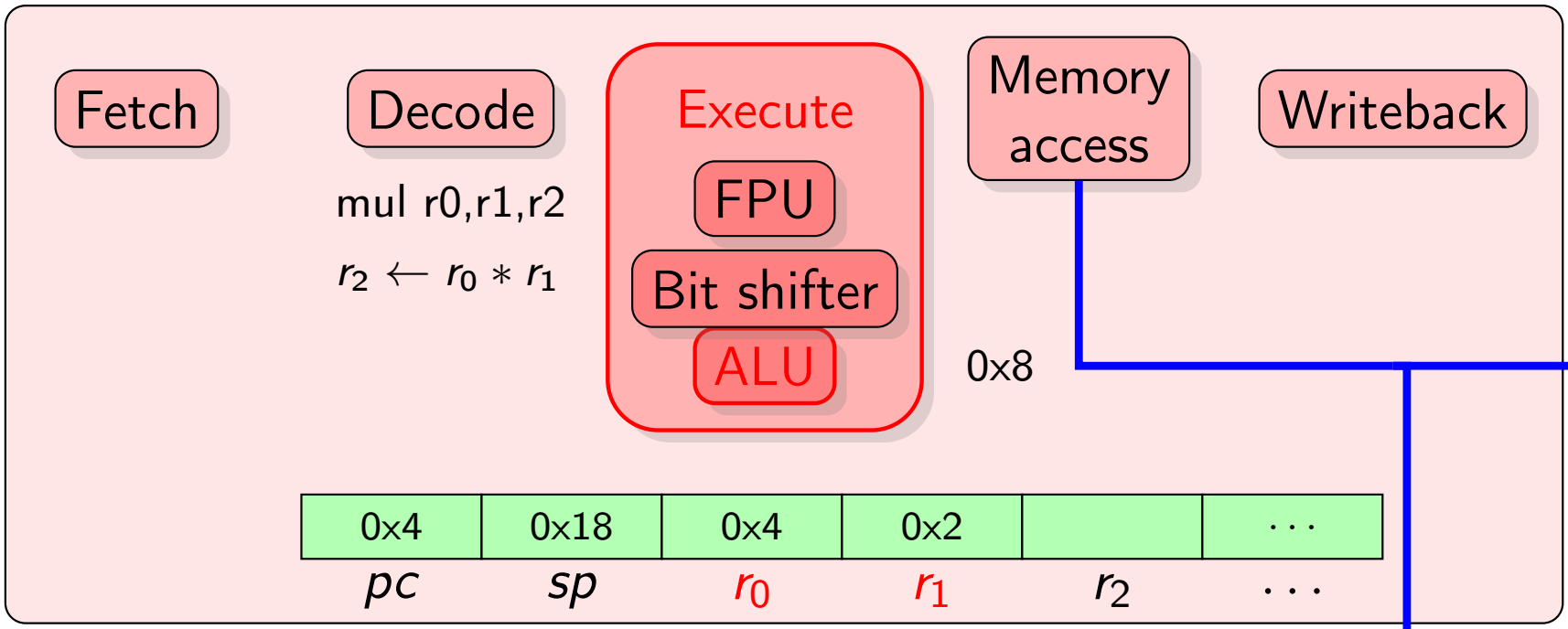


Décodage

Activation des composants et chemins correspondant au traitement de l'instruction

0x00					91	02	00	e0
0x08	00	10	9d	e5	02	11	80	e7
0x10								
0x18	ef	be	ad	de				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fonctionnement du processeur

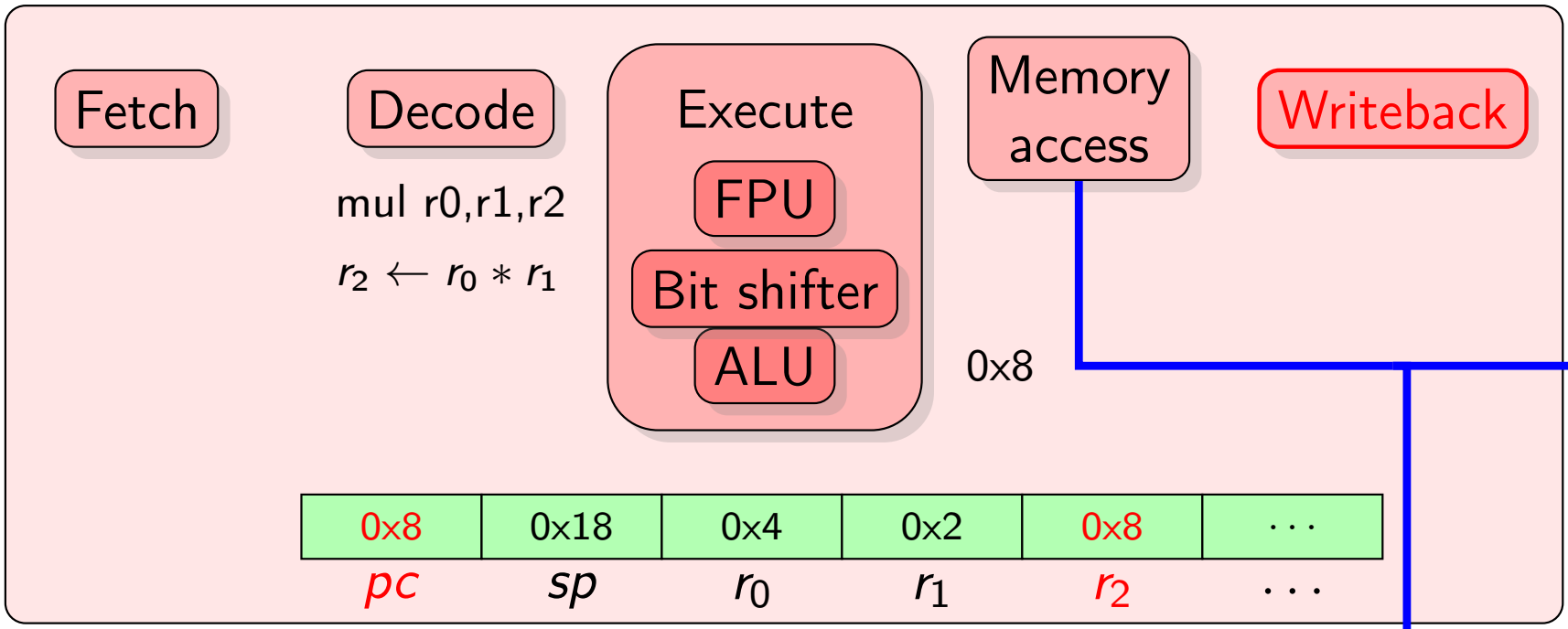


0x00					91	02	00	e0
0x08	00	10	9d	e5	02	11	80	e7
0x10								
0x18	ef	be	ad	de				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Execution

Traitement de l'instruction par les composants activés

Fonctionnement du processeur

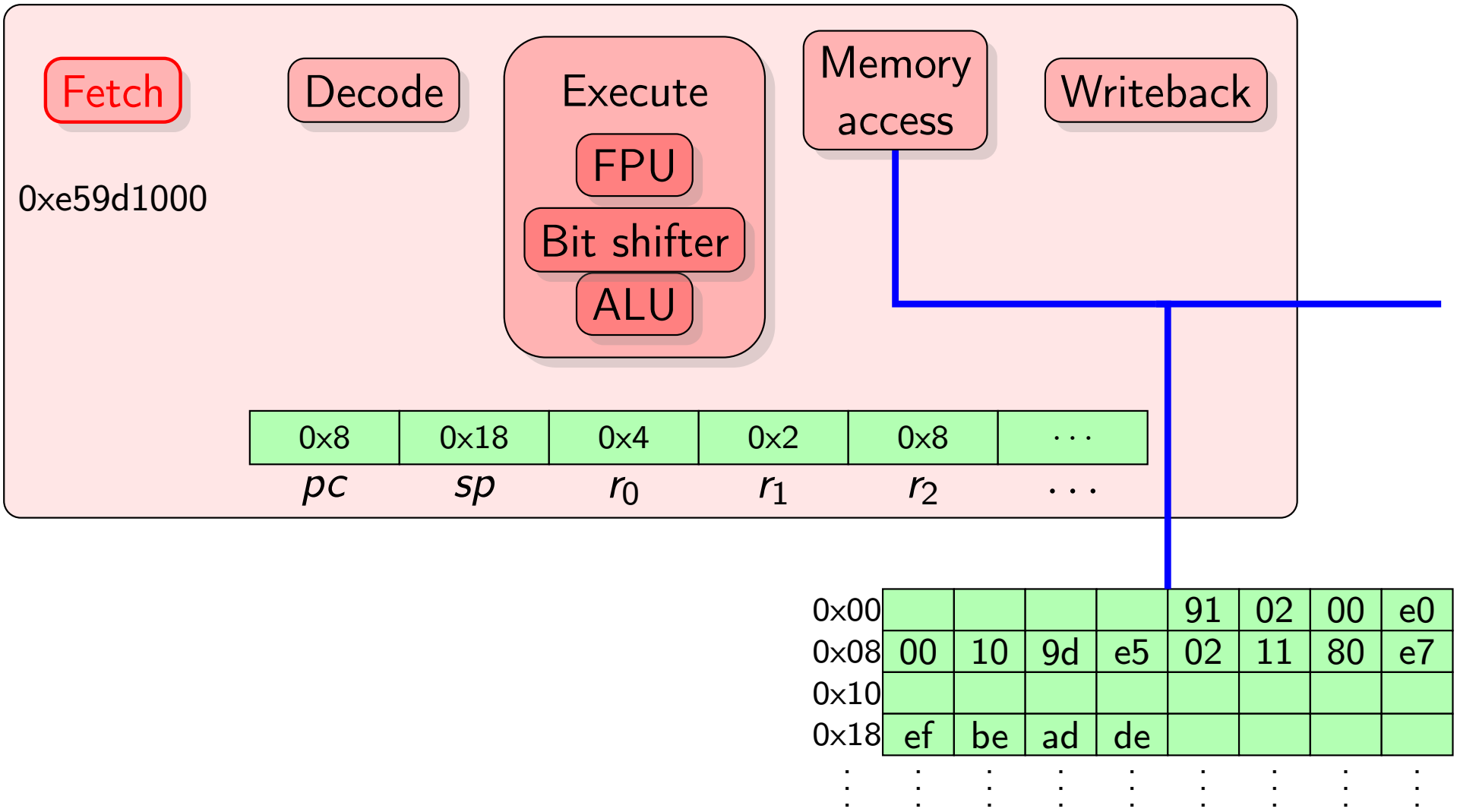


0x00					91	02	00	e0
0x08	00	10	9d	e5	02	11	80	e7
0x10								
0x18	ef	be	ad	de				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

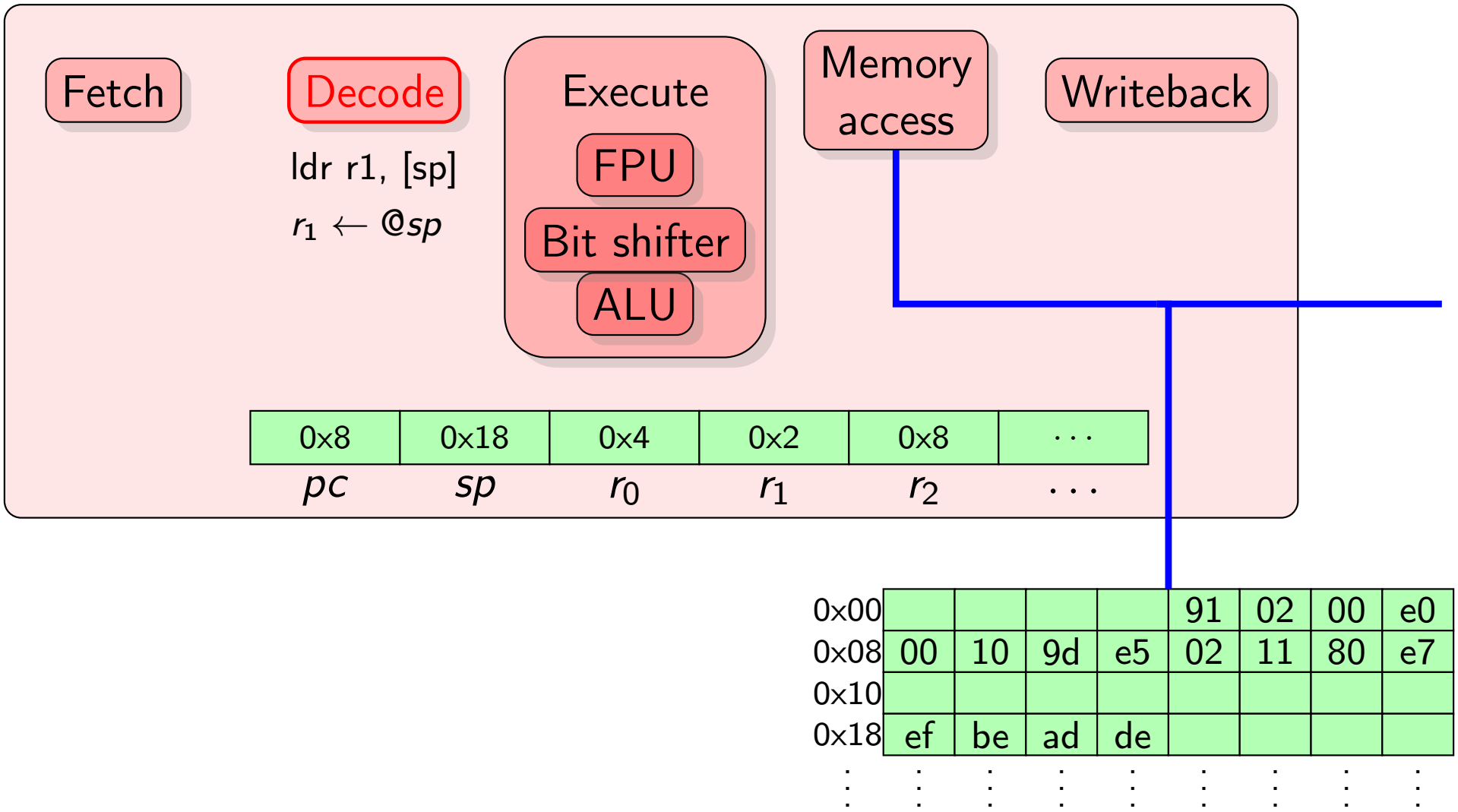
Écriture

Écriture des registres (incluant la mise à jour de pc).

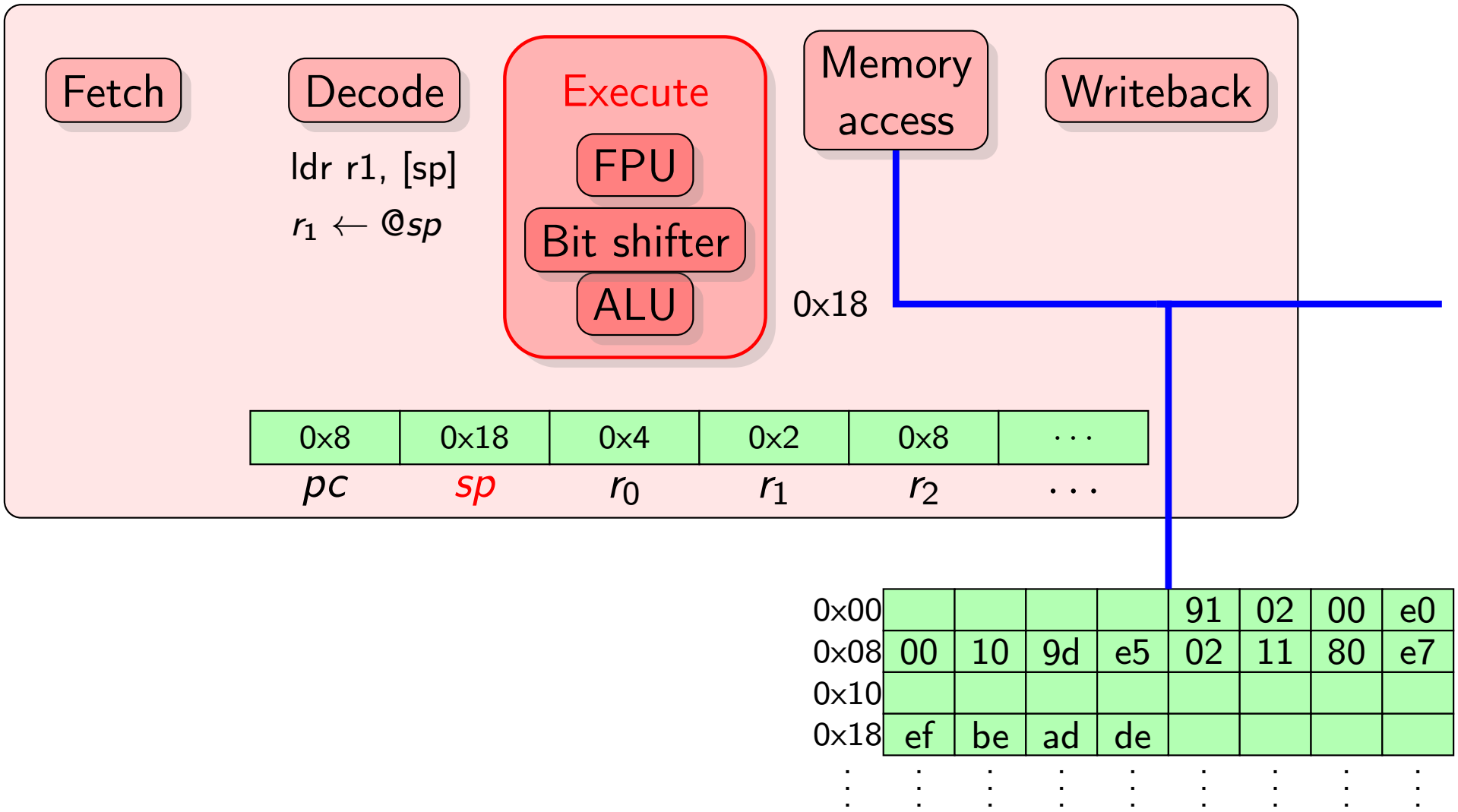
Fonctionnement du processeur



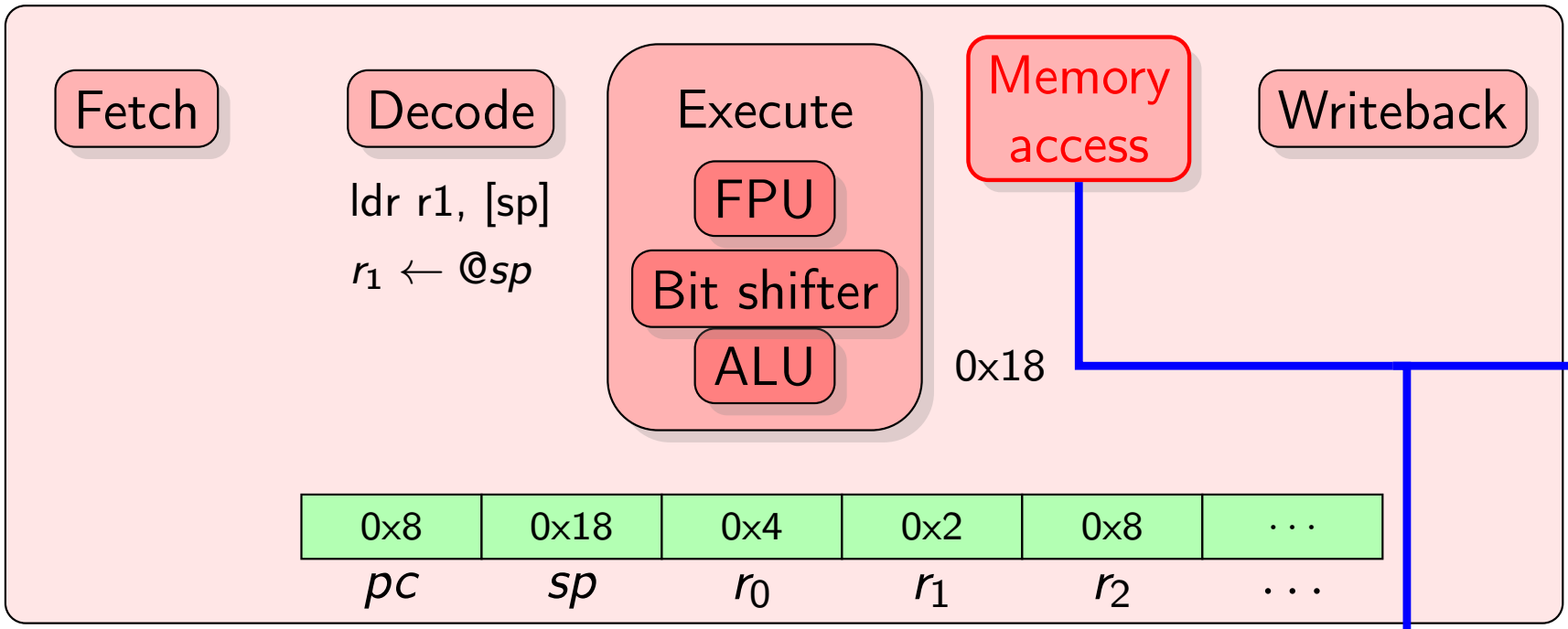
Fonctionnement du processeur

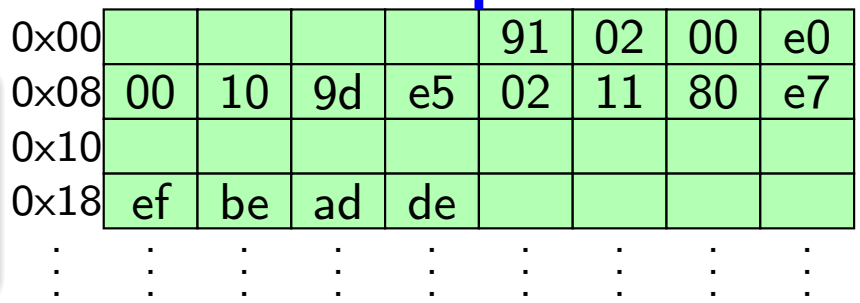


Fonctionnement du processeur



Fonctionnement du processeur

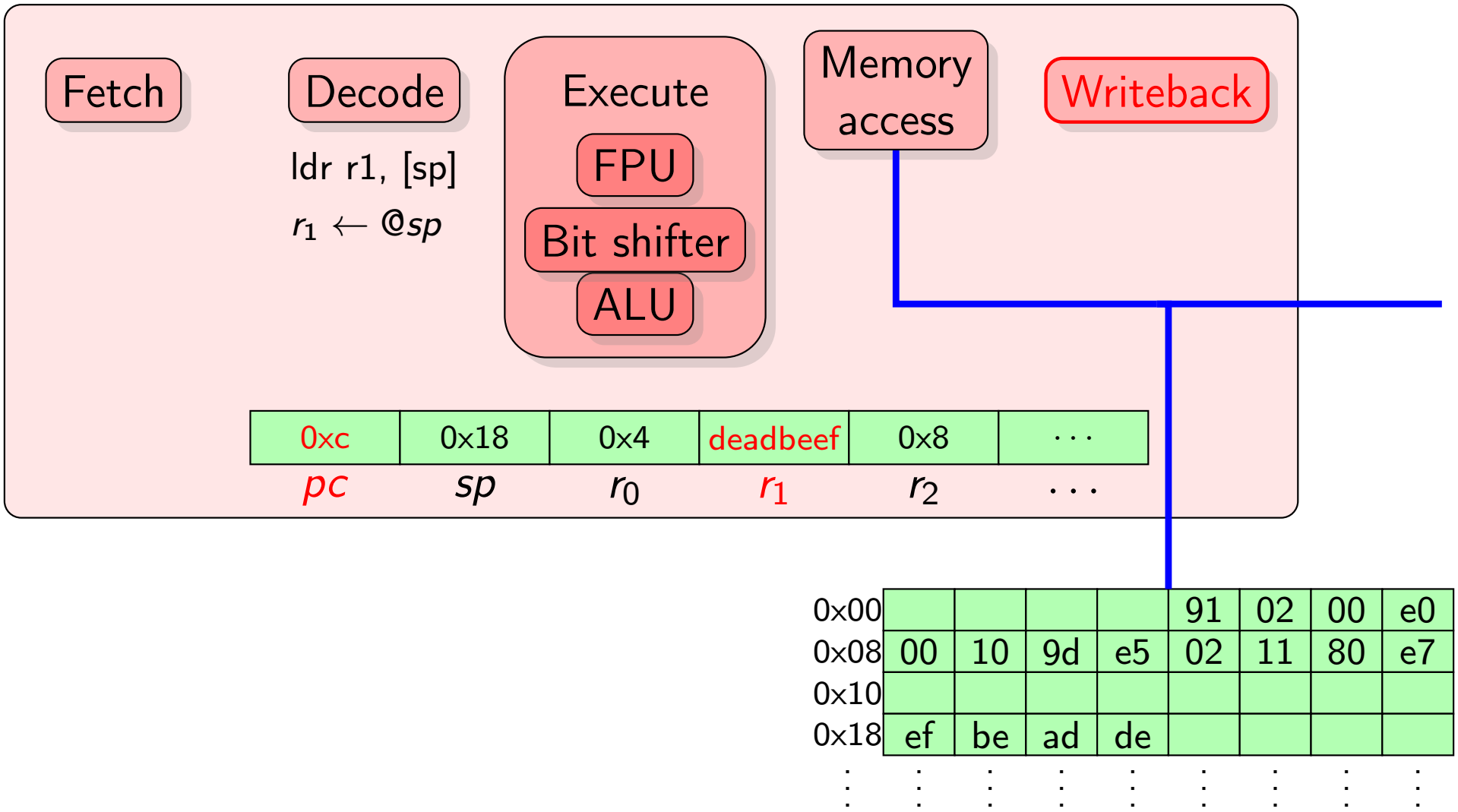




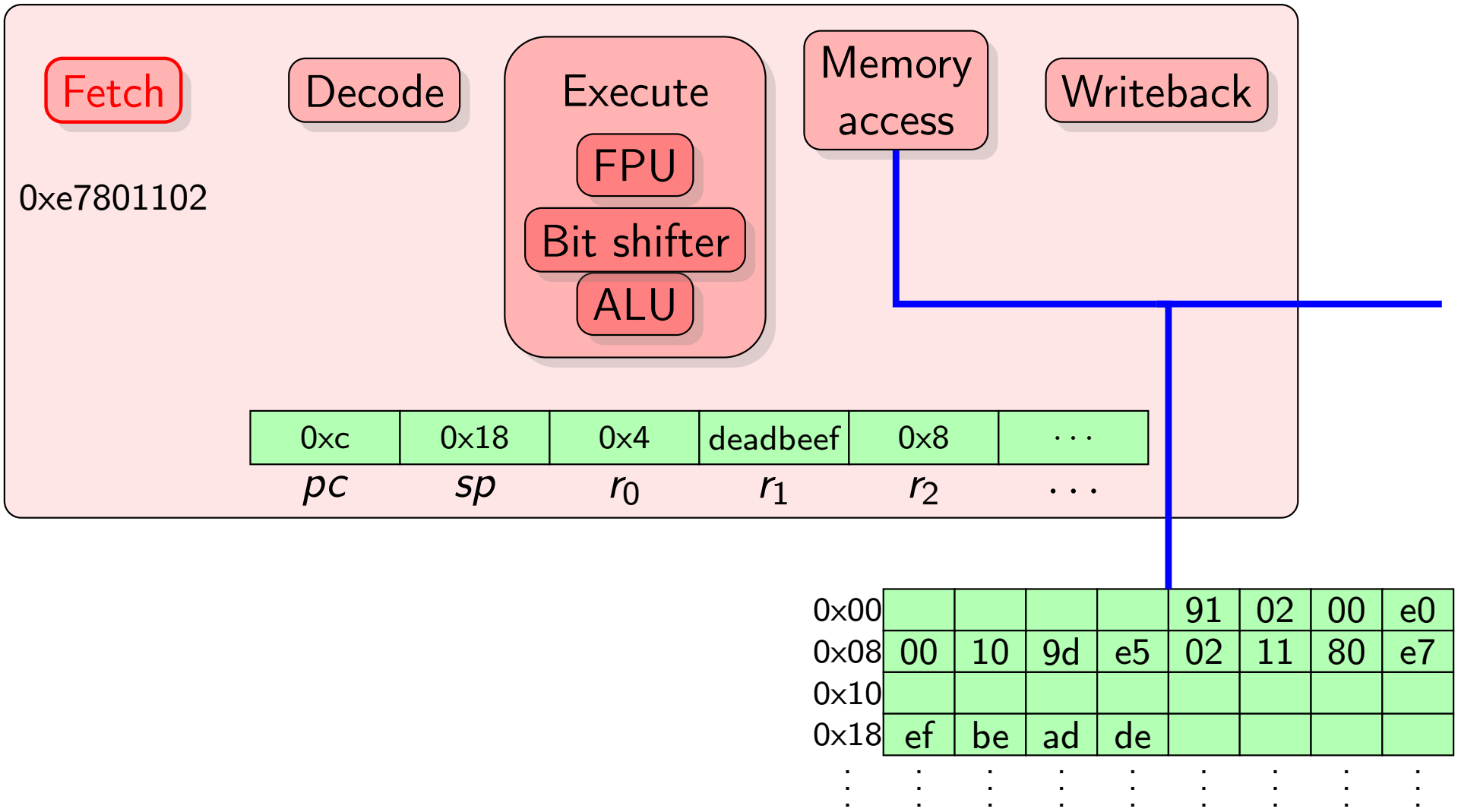
Accès mémoire

Lecture ou écriture des données de la mémoire, transitant par le bus.

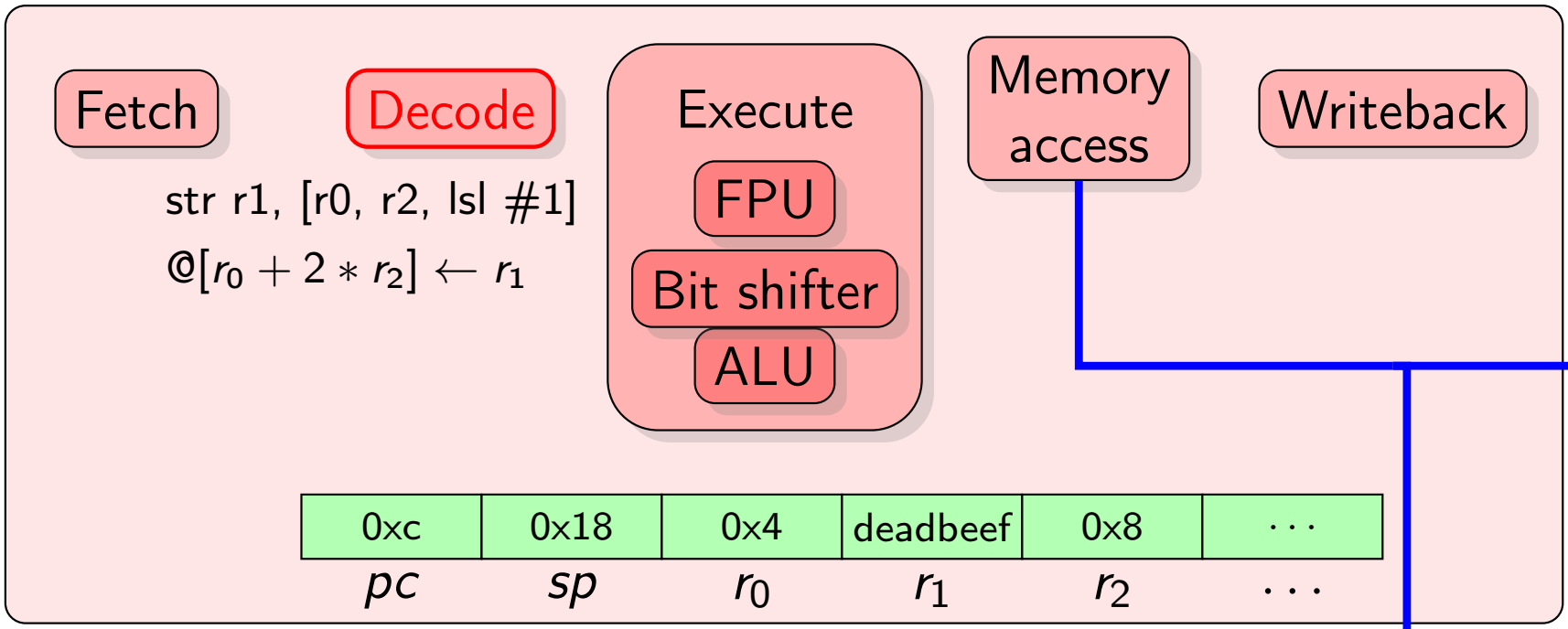
Fonctionnement du processeur

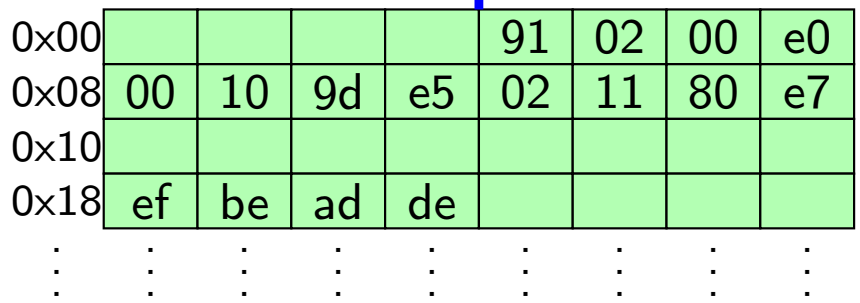


Fonctionnement du processeur

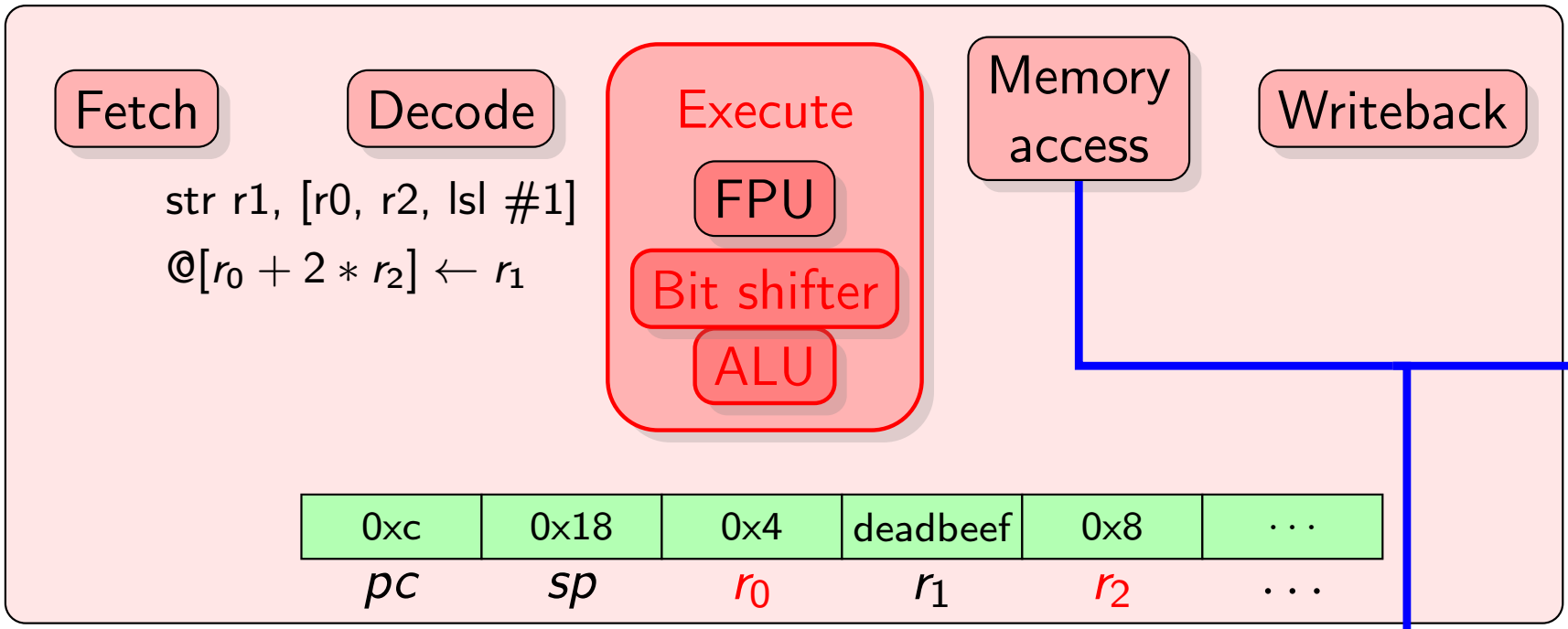


Fonctionnement du processeur





Fonctionnement du processeur

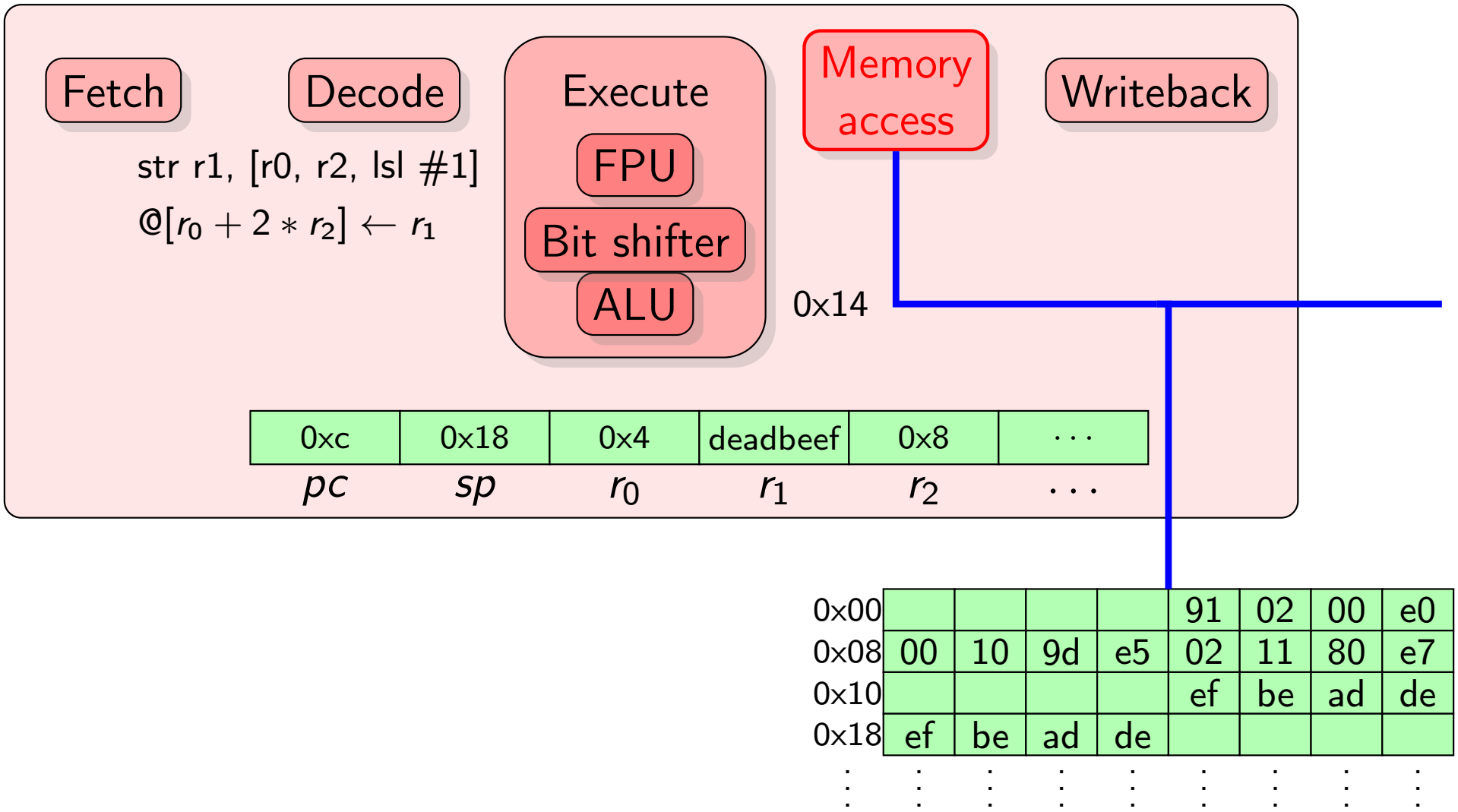


0x00					91	02	00	e0
0x08	00	10	9d	e5	02	11	80	e7
0x10								
0x18	ef	be	ad	de				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

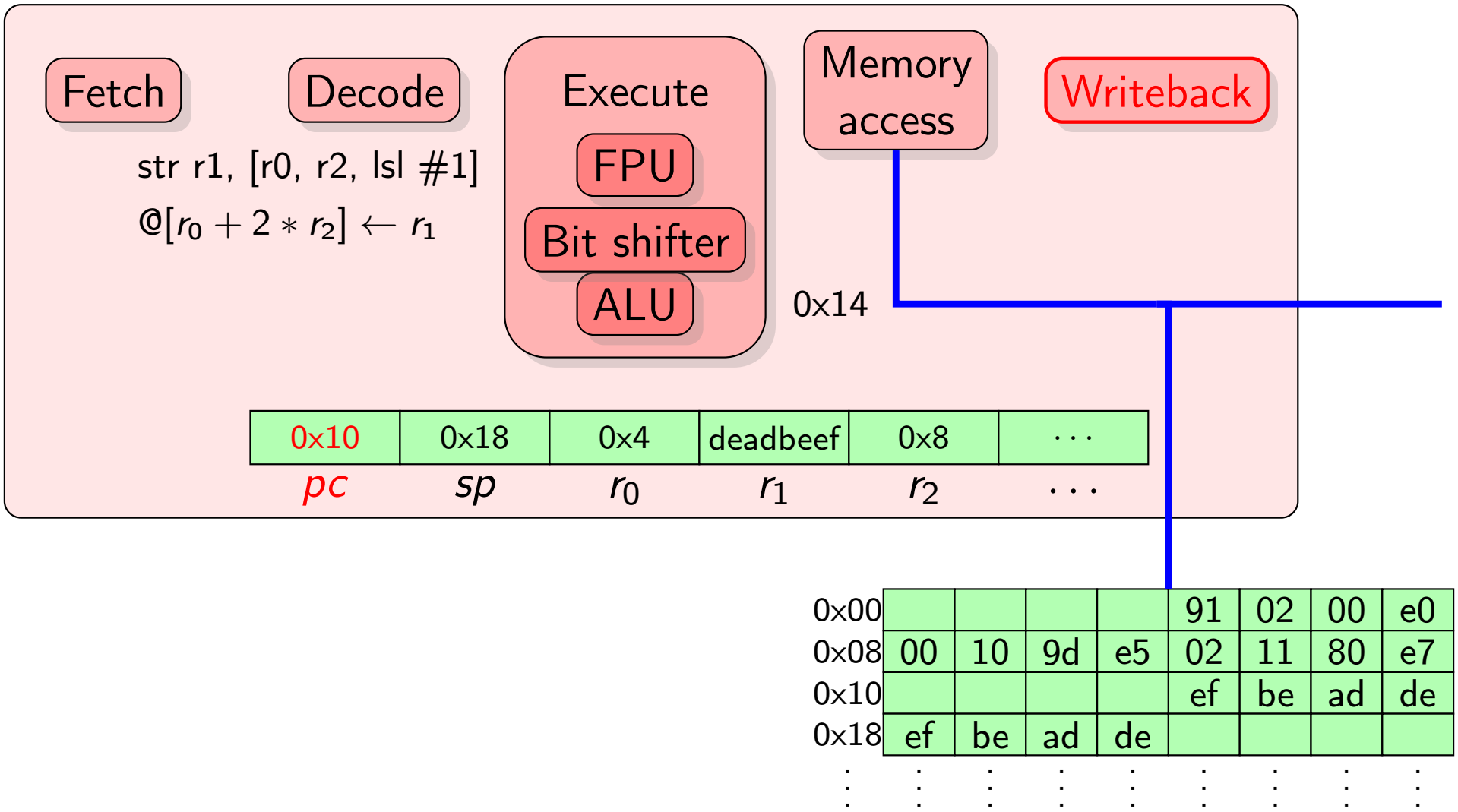
Accès mémoire

Lecture ou écriture des données de la mémoire, transitant par le bus.

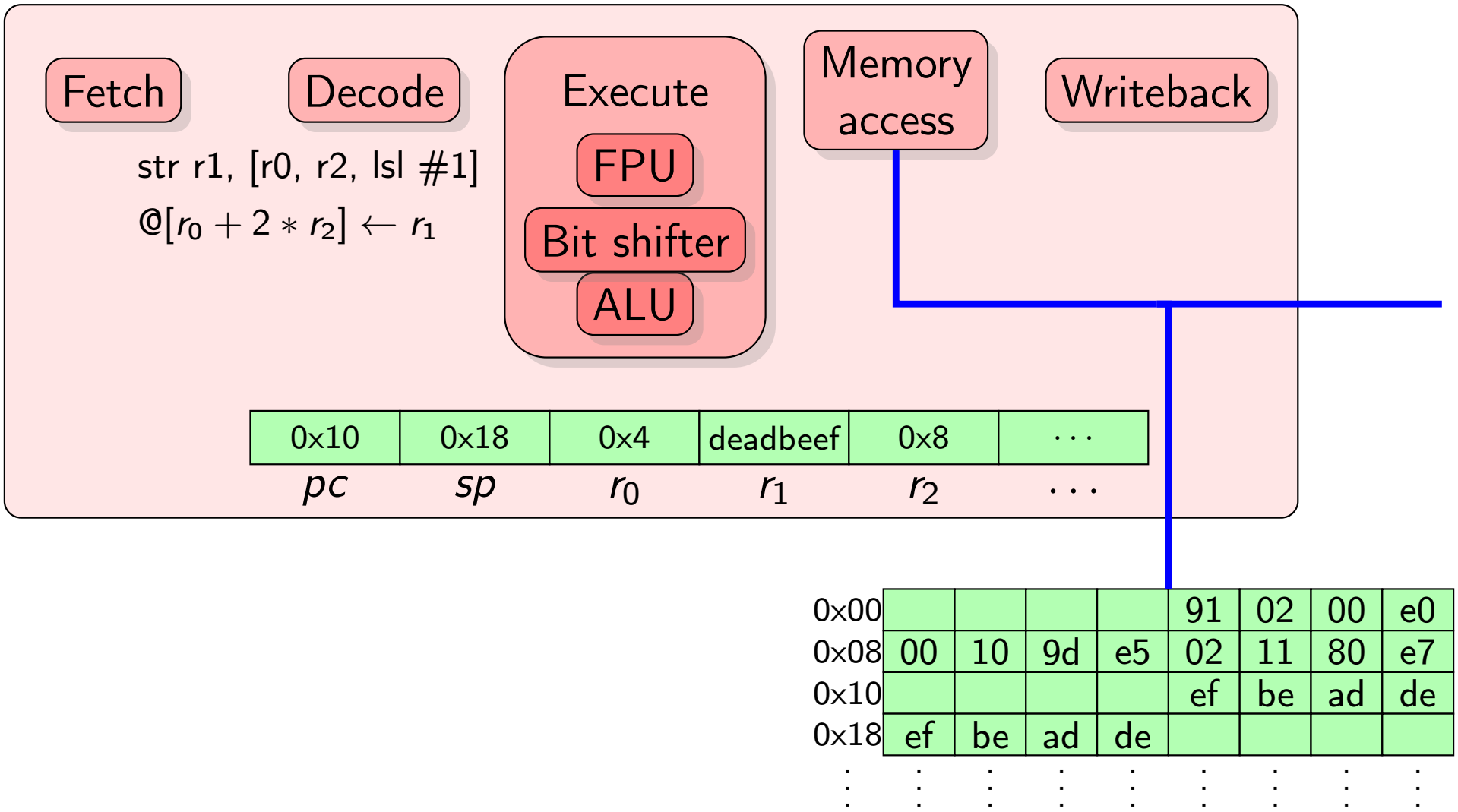
Fonctionnement du processeur



Fonctionnement du processeur



Fonctionnement du processeur



Catégories d'instructions

- Manipulation de données :
  - mov: $r_i \leftarrow const$, $r_i \leftarrow r_j$
  - load et store
- Instructions arithmétiques et logiques :
  - $r_i \leftarrow r_j \oplus r_k$ pour $\oplus \in \{+ \ - \ * \ / \ \% \ \hat{} \ \& \ | \ << \ >> \}$
- Comparaisons :
  - cmp r_i r_j: $z \leftarrow r_i == r_j; s \leftarrow r_i \leq_u r_j$
- Sauts:
  - Sauts inconditionnels : $pc \leftarrow pc + 8$
  - Saut conditionnel: if(z) $pc \leftarrow pc + 8$
  - Saut calculé: $pc \leftarrow r_1$
- Jeux d'instructions étendus
  - Instructions flottantes
  - Instructions vectorisées
  - Instructions cryptographiques
  - Instructions atomiques
- Instructions systèmes

Résumé

- Un processeur:
  - Lit les instructions depuis la mémoire, en suivant le pointeur d'instruction
  - Fait des lectures et écritures entre la mémoire et ses registres
  - Fait des opérations arithmétiques et logiques en combinant ses registres

Résumé

- Un processeur:
  - Lit les instructions depuis la mémoire, en suivant le pointeur d'instruction
  - Fait des lectures et écritures entre la mémoire et ses registres
  - Fait des opérations arithmétiques et logiques en combinant ses registres

Note: Interpréteur de bytecode

Les instructions sont souvent similaires pour les machines virtuelles exécutant du bytecode (bytecode java, .NET, OCaml), sauf qu'elles n'utilisent généralement pas de registres (machine à pile).

Résumé

- Un processeur:
  - Lit les instructions depuis la mémoire, en suivant le pointeur d'instruction
  - Fait des lectures et écritures entre la mémoire et ses registres
  - Fait des opérations arithmétiques et logiques en combinant ses registres

Note: Interpréteur de bytecode

Les instructions sont souvent similaires pour les machines virtuelles exécutant du bytecode (bytecode java, .NET, OCaml), sauf qu'elles n'utilisent généralement pas de registres (machine à pile).

Comment organiser le programme pour faciliter son écriture?

Sommaire

But

- Comprendre pourquoi et comment est organisé le programme pour pouvoir écrire des programmes complexes
  - En particulier: comment est compilé le C?

[1] Attention aux pièges

But

- Comprendre pourquoi et comment est organisé le programme pour pouvoir écrire des programmes complexes
  - En particulier: comment est compilé le C?
- Pourquoi C?
  - Correspondance directe[1] entre ses concepts et de l'assembleur manuel
  - "C comme un assembleur de haut niveau"

[1] Attention aux pièges

But

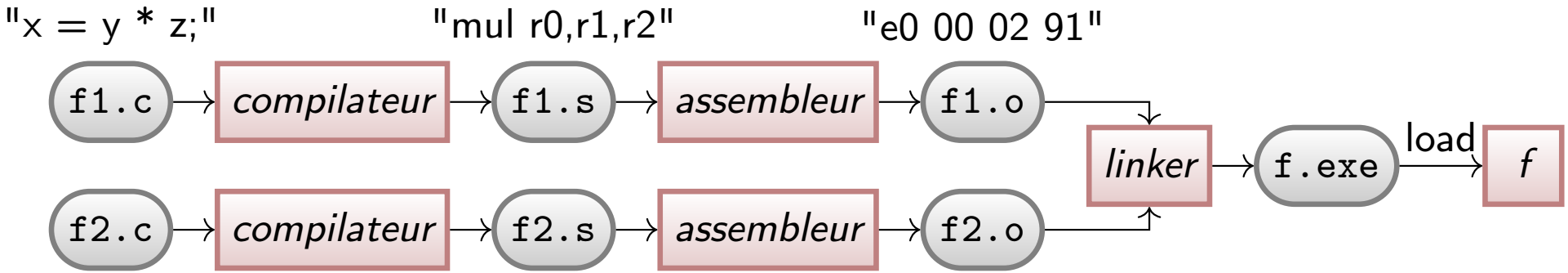
- Comprendre pourquoi et comment est organisé le programme pour pouvoir écrire des programmes complexes
  - En particulier: comment est compilé le C?
- Pourquoi C?
  - Correspondance directe[1] entre ses concepts et de l'assembleur manuel
  - "C comme un assembleur de haut niveau"
- Intérêts:
  - Important pour savoir bien programmer en C
    - Compréhension du langage
    - Modèle de coût d'un programme
    - Programmation système
  - Il faut comprendre comment marche un programme avant de comprendre comment en faire fonctionner plusieurs.

[1] Attention aux pièges

D'un programme à son exécution: compilation et interprétation

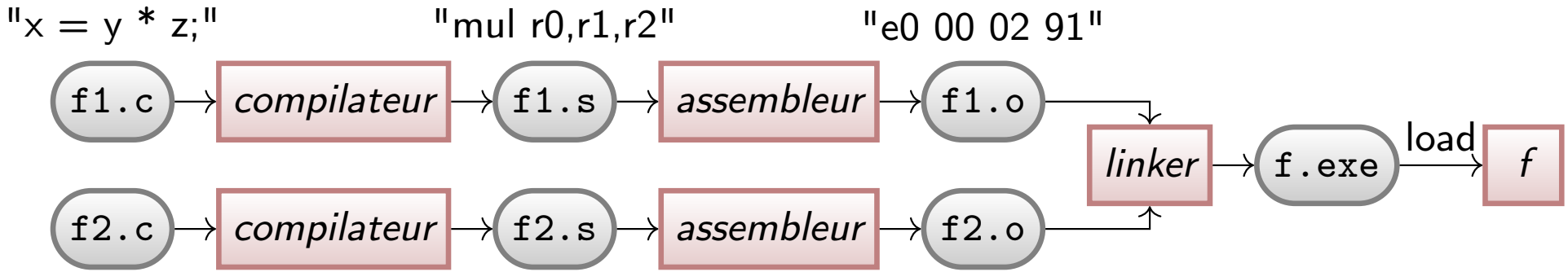
D'un programme à son exécution: compilation et interprétation

- Le C est un langage compilé: il est transformé en instructions machines avant d'être chargé par l'OS pour être exécuté

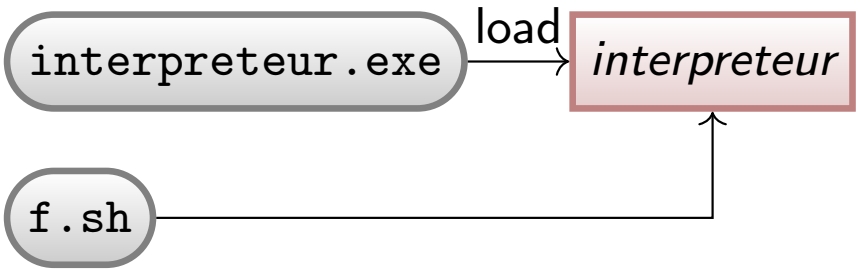


D'un programme à son exécution: compilation et interprétation

- Le C est un langage compilé: il est transformé en instructions machines avant d'être chargé par l'OS pour être exécuté

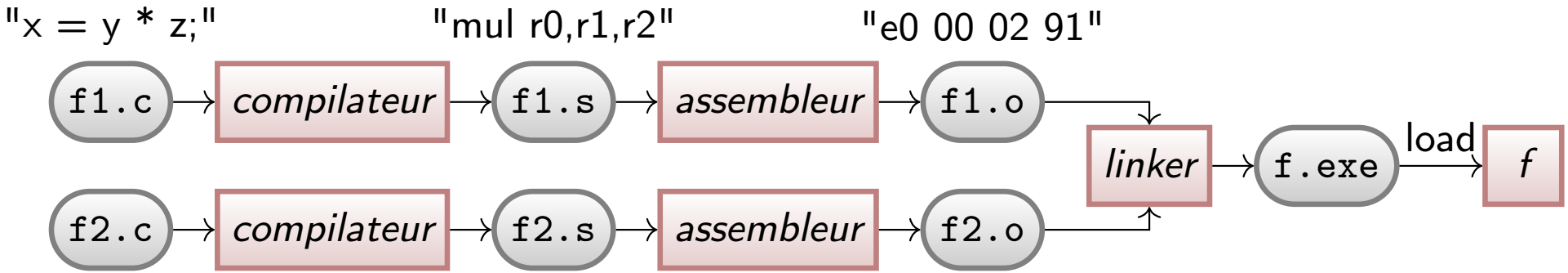


- Certains langages sont interprétés (bash): l'interpréteur exécute les instructions sans les traduire.

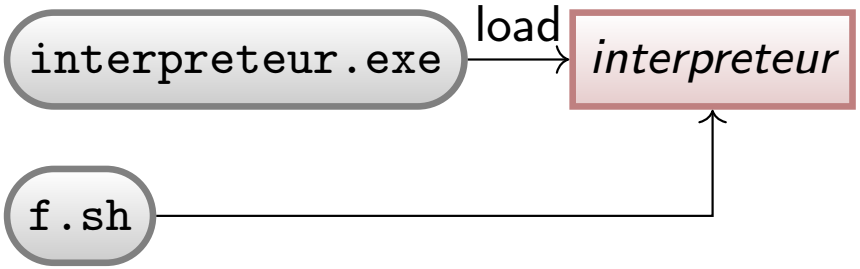


D'un programme à son exécution: compilation et interprétation

- Le C est un langage compilé: il est transformé en instructions machines avant d'être chargé par l'OS pour être exécuté

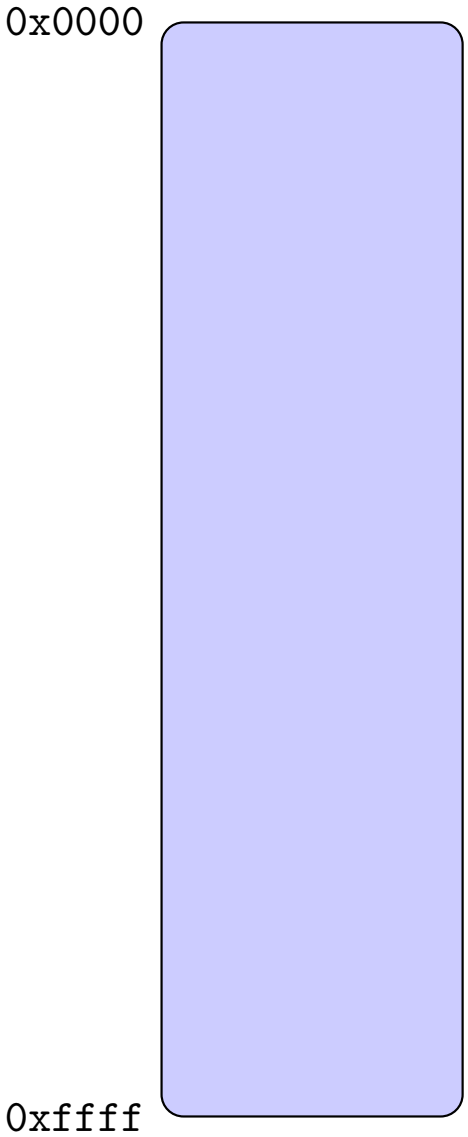


- Certains langages sont interprétés (bash): l'interpréteur exécute les instructions sans les traduire.

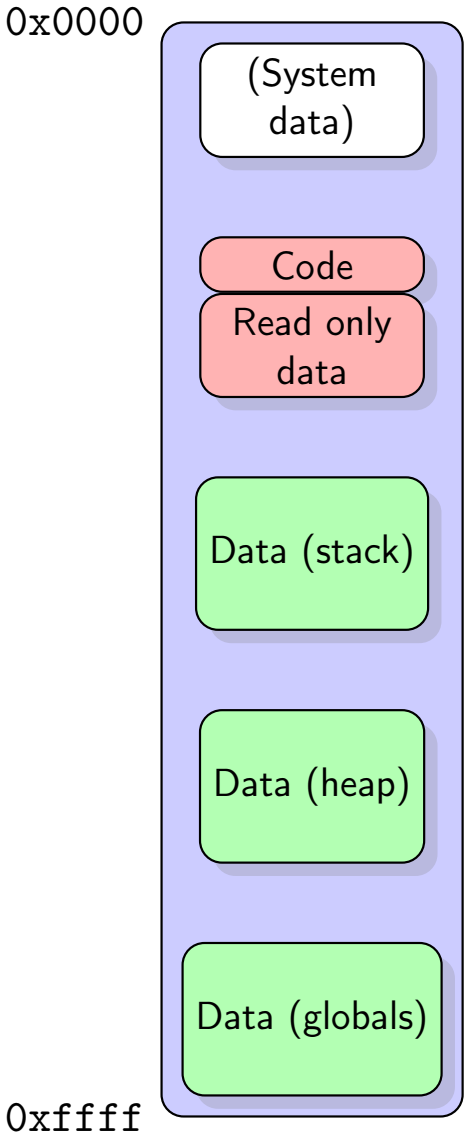


- Il y a aussi des implantations de langage mixtes: compilation vers bytecode, just-in-time compilation

Organisation générale de la mémoire d'un processus



Organisation générale de la mémoire d'un processus



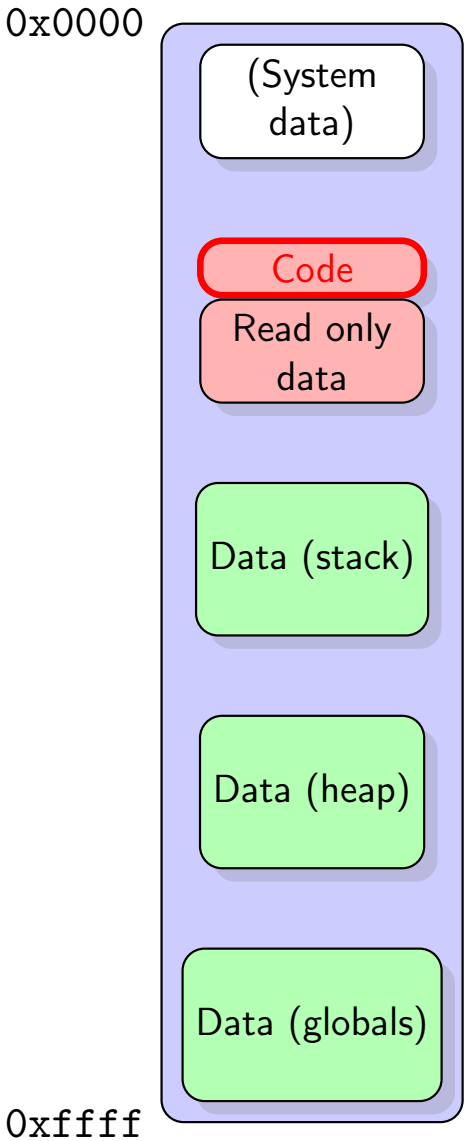
- Code: read-only, contient les instructions
- Données read-only: contient constantes, chaine de caractères...
- Données read-write: séparées en plusieurs zones
  - Piles (stack): variables locales d'un thread (allocation sur *pile*)
  - Globals: variables globales (allocation *statique*)
  - Tas (heap): `malloc` (allocation *dynamique*)

Example réel

```
> readelf -a file.exe

ELF Header:
...
  Type:                              EXEC (Executable file)
  Machine:                           Intel 80386
  Version:                           0x1
  Entry point address:               0x8048730
...
...
Program Headers:
  Type Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz    Flg Align
  LOAD 0x000000 0x08048000 0x08048000 0x8f0f8 0x8f0f8   R E 0x1000
  LOAD 0x08f6dc 0x080d86dc 0x080d86dc 0x02c40 0x1e03914 RW  0x1000
...
```

Sommaire

Organisation du code



Traduction des sauts (goto,break,continue)

Exemple (C)

```
goto next;
...
next:
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
current:
  b next
  ...
  ...
  ...
next:
  ...
```

Traduction des sauts (goto,break,continue)

Exemple (C)

```
goto next;
...
next:
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
current:
  b next    ; pc := pc + 16
  ...
  ...
  ...
next:
  ...
```

C'est le rôle du linker (éditeur de lien) de calculer l'offset correspondant à une cible de saut.

Traduction des instructions conditionnelles

Exemple (C)

```
if(x != 3){
...
}
else {
...
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
  cmp r0, 3   ; update flags
  beq ???   ; if(z) pc := pc + ...
then:
  ...
  ???
else:
  ...
  ???
end:
  ...
```

Traduction des instructions conditionnelles

Exemple (C)

```
if(x != 3){
...
}
else {
...
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
  cmp x, 3   ; update flags
  beq else   ; if(z) pc := pc + ...
then:
  ...
  ???
else:
  ...
  ???
end:
  ...
```

Traduction des instructions conditionnelles

Exemple (C)

```
if(x != 3){
...
}
else {
...
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
  cmp x, 3   ; update flags
  beq else   ; if(z) pc := pc + ...
then:
  ...
  b end      ; pc := pc + ...
else:
  ...
  ???
end:
  ...
```

Traduction des instructions conditionnelles

Exemple (C)

```
if(x != 3){
...
}
else {
...
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
  cmp x, 3   ; update flags
  beq else   ; if(z) pc := pc + ...
then:
  ...
  b end      ; pc := pc + ...
else:
  ...
  ...        ; no need to jump here
end:
  ...
```

Traduction des boucles

Exemple (C)

```
int x = 0;
while(x < 12){
 x++;
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
  mov r0, 0
loop:
  cmp r0, 12    ; update flags
  bge end       ; branch if result
                ; of signed comparison
                ; was >=
  add r0,r0,1   ; r0 := r0 + 1
  b loop        ; pc := pc - 12
end:
```

Traduction des appels de fonctions (1)

Exemple (C)

```
void f(void) {}

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

Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  b after       ; pc <- &after

g:
  b f           ; pc <- &f
after:
  ...
```

Pourquoi est-ce que cette solution ne marche pas en général?

Traduction des appels de fonctions (1)

Exemple (C)

```
void f(void) {}

void g(void) {
  f();
  ...
}

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

Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  b after          ; pc <- &after

g:
  b f              ; pc <- &f
after:
  ...

h:
  b f              ; pc <- &f
after2:
  ...
```

Traduction des appels de fonctions (1)

Exemple (C)

```
void f(void) {}

void g(void) {
  f();
  ...
}

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

Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  bx lr          ; pc <- lr

g:
  mov lr,after   ; lr <- &after
  b f            ; pc <- &f
after:
  ...

h:
  mov lr,after2  ; lr <- &after2
  b f            ; pc <- &f
after2:
  ...
```

Traduction des appels de fonctions (1)

Exemple (C)

```
void f(void) {}

void g(void) {
  f();
  ...
}

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

Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  bx lr          ; pc <- lr

g:
  bl f           ; lr <- pc + 4;  pc -< &f
after:
  ...

h:
  bl f           ; lr <- pc + 4; pc <- &f
after2:
  ...
```

Traduction des appels de fonctions (2): appels imbriqués

Exemple (C)

```
void f2(void) {}
void f1(void) {f2();}
void main(void){
f1();
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f2:
  bx lr    ; pc <- lr
f1:

  bl f2    ; lr <- pc + 4; pc <- &f1

  bx lr    ; pc <- lr
main:
  bl f1    ; lr <- pc + 4; pc <- &f1
```

Que fait ce code?

Traduction des appels de fonctions (2): appels imbriqués

Exemple (C)

```
void f2(void) {}
void f1(void) {f2();}
void main(void){
f1();
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f2:
  bx lr    ; pc <- lr
f1:
  push lr ; sauvegarde lr sur la pile
  bl f2    ; lr <- pc + 4; pc <- &f2
  pop lr   ; restaure lr
  bx lr    ; pc <- lr
main:
  bl f1    ; lr <- pc + 4; pc <- &f1
```

- Besoin de sauvegarder l'adresse de retour
- Besoin mémoire dépend de la profondeur d'appel ($\Rightarrow$ pile)
- Peut on optimiser le retour de f1?

Traduction des appels de fonctions (2): appels imbriqués

Exemple (C)

```
void f2(void) {}
void f1(void) {f2();}
void main(void){
f1();
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f2:
  bx lr    ; pc <- lr
f1:
  push lr ; sauvegarde lr sur la pile
  bl f2    ; lr <- pc + 4; pc <- &f2
  pop lr   ; restaure lr
  bx lr    ; pc <- lr
main:
  bl f1    ; lr <- pc + 4; pc <- &f1
```

- Besoin de sauvegarder l'adresse de retour
- Besoin mémoire dépend de la profondeur d'appel ($\Rightarrow$ pile)
- Peut on optimiser le retour de f1?

Traduction des appels de fonctions (2): appels imbriqués

Exemple (C)

```
void f2(void) {}
void f1(void) {f2();}
void main(void){
f1();
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f2:
  bx lr    ; pc <- lr
f1:
  push lr ; sauvegarde lr sur la pile
  bl f2    ; lr <- pc + 4; pc <- &f2
  pop pc   ; pc <- ancien lr

main:
  bl f1    ; lr <- pc + 4; pc <- &f1
```

- Schémas de traduction classique
  - Fonctions "feuilles" et "non-feuille".

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f:  mul r?,r?,2  ; r? <- r? * 2
    sub r?,r?,r? ; r? <- r? - r?
    bx lr

main: ...
  mov r?, 33    ; r? <- 33
  mov r?, 13    ; r? <- 13
  mov r?, 1     ; r? <- 1
  bl f          ; appelle f
  add r?,r?,r? ; r? <- r? + r?
  ...
```

Convention d'appel (ABI): défini

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f:  mul r?,r1,2  ; r? <- r1 * 2
    sub r?,r0,r? ; r? <- r0 - r?
    bx lr

main: ...
  mov r?, 33    ; r? <- 33
  mov r0, 13    ; r0 <- 13
  mov r1, 1     ; r1 <- 1
  bl f          ; appelle f
  add r?,r?,r?  ; r? <- r? + r?
  ...
```

Convention d'appel (ABI): défini

- Comment sont passés les arguments (ARM: les premiers dans r0...r3)

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f:  mul r?,r1,2  ; r? <- r1 * 2
    sub r0,r0,r? ; r0 <- r0 - r?
    bx lr

main: ...
  mov r?, 33    ; r? <- 33
  mov r0, 13    ; r0 <- 13
  mov r1, 1     ; r1 <- 1
  bl f          ; appelle f
  add r?,r?,r0  ; r? <- r? + r0
  ...
```

Convention d'appel (ABI): défini

- Comment sont passés les arguments (ARM: les premiers dans r0...r3)
- Comment sont renvoyés les résultats (ARM: dans r0)

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f:  mul r2,r1,2  ; r2 <- r1 * 2
    sub r0,r0,r2 ; r0 <- r0 - r2
    bx lr

main: ...
  mov r2, 33    ; r2 <- 33
  mov r0, 13    ; r0 <- 13
  mov r1, 1     ; r1 <- 1
  bl f          ; appelle f
  add r?,r2,r0  ; r? <- r2 + r0
  ...
```

Convention d'appel (ABI): défini

- Comment sont passés les arguments (ARM: les premiers dans r0...r3)
- Comment sont renvoyés les résultats (ARM: dans r0)
- Erreur

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

```
f:  mul r2,r1,2  ; r2 <- r1 * 2
    sub r0,r0,r2 ; r0 <- r0 - r2
    bx lr

main: ...
  mov r2, 33    ; r2 <- 33
  mov r0, 13    ; r0 <- 13
  mov r1, 1     ; r1 <- 1
  push r2
  bl f
  pop r2
  add r?,r2,r0 ; r? <- r2 + r0
```

Convention d'appel (ABI): défini

- Comment sont passés les arguments (ARM: les premiers dans r0...r3)
- Comment sont renvoyés les résultats (ARM: dans r0)
- Quels registres sont preservés par l'appellant (ARM: r4...r11 + sp)

Traduction des appels de fonctions (3): convention d'appel

Exemple (C)

```
f.c:
int f(int a, int b)
{ return a - 2 * b }
--------------------
main.c:
...
int x = 33;
int y = x + f(13,1)
...
```

Exemple (ARM assembly language)

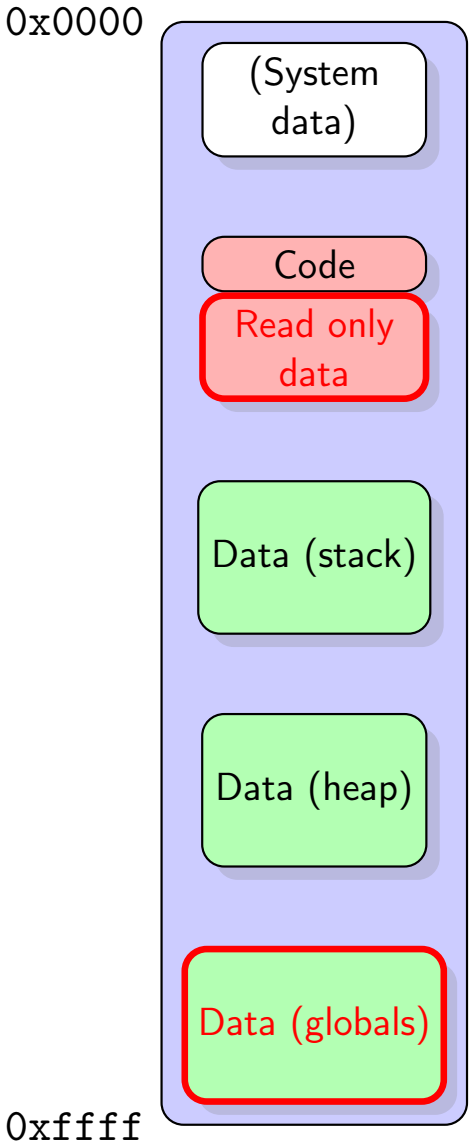
```
f:  mul r2,r1,2  ; r2 <- r1 * 2
    sub r0,r0,r2 ; r0 <- r0 - r2
    bx lr

main: ...
  mov r4, 33    ; r4 <- 33
  mov r0, 13    ; r0 <- 13
  mov r1, 1     ; r1 <- 1
  bl f          ; appelle f
  add r?,r4,r0  ; r? <- r4 + r0
  ...
```

Convention d'appel (ABI): défini

- Comment sont passés les arguments (ARM: les premiers dans r0...r3)
- Comment sont renvoyés les résultats (ARM: dans r0)
- Quels registres sont preservés par l'appellant (ARM: r4...r11 + sp)

Sommaire

Organisation des variables globales



Traduction des variables globales

Exemple (C)

```
struct point {
    int x;
    int y;
} p = {3,4};
char c = 'q';

main() {
  int r = p.y;
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
p:
 .word 3
 .word 4
c:
 .char 'q'

main:
  mov32 r2, &p
  ldr r0, [r2, #4]
```

Traduction des variables globales

Exemple (C)

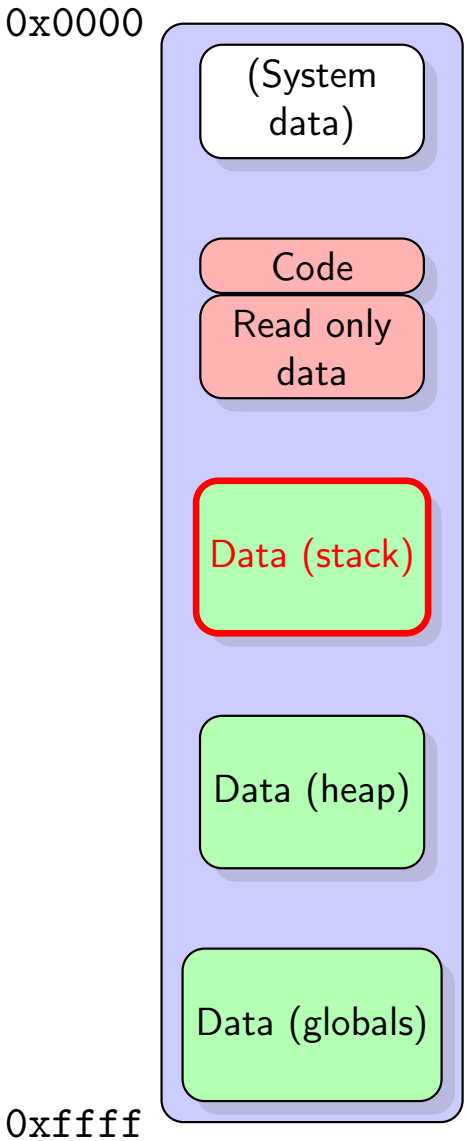
```
struct point {
    int x;
    int y;
} p = {3,4};
char c = 'q';

main() {
  int r = p.y;
}
```

Exemple (ARM assembly language)

```
0x804022a0:
          03 00 00 00
          04 00 00 00
0x804022a8:
          71

main:
  mov  r2, 0x22a0   ; poids faible
  movt r2, 0x8040   ; poids fort
  ldr  r0, [r2]
```

- Les variables globales ont une adresse constante.
- C'est le rôle du linker (éditeur de lien) de placer les variables et d'insérer leur adresse dans le code.

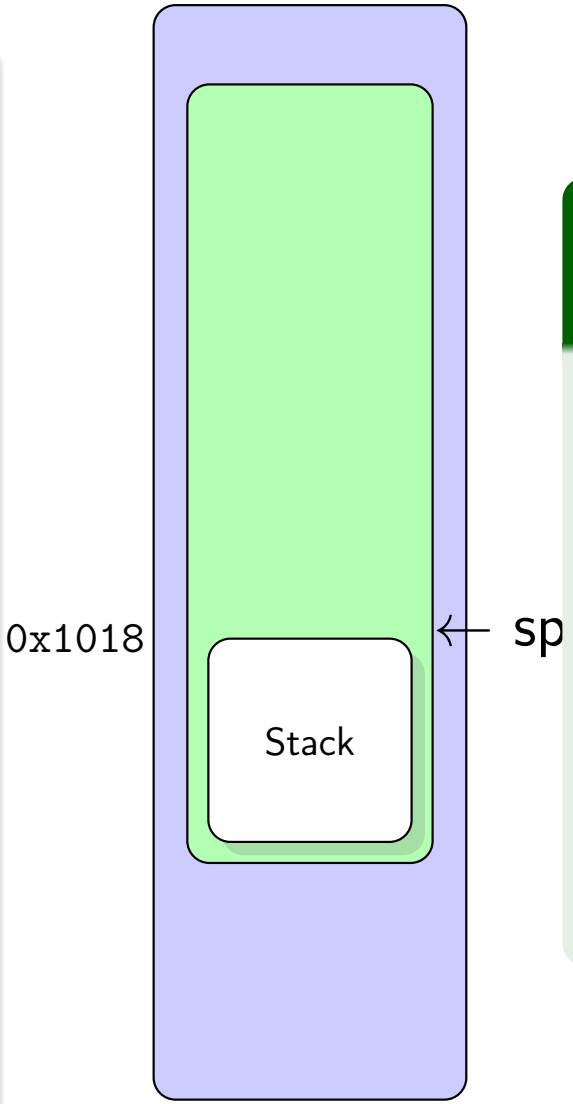
Organisation de la pile



Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```

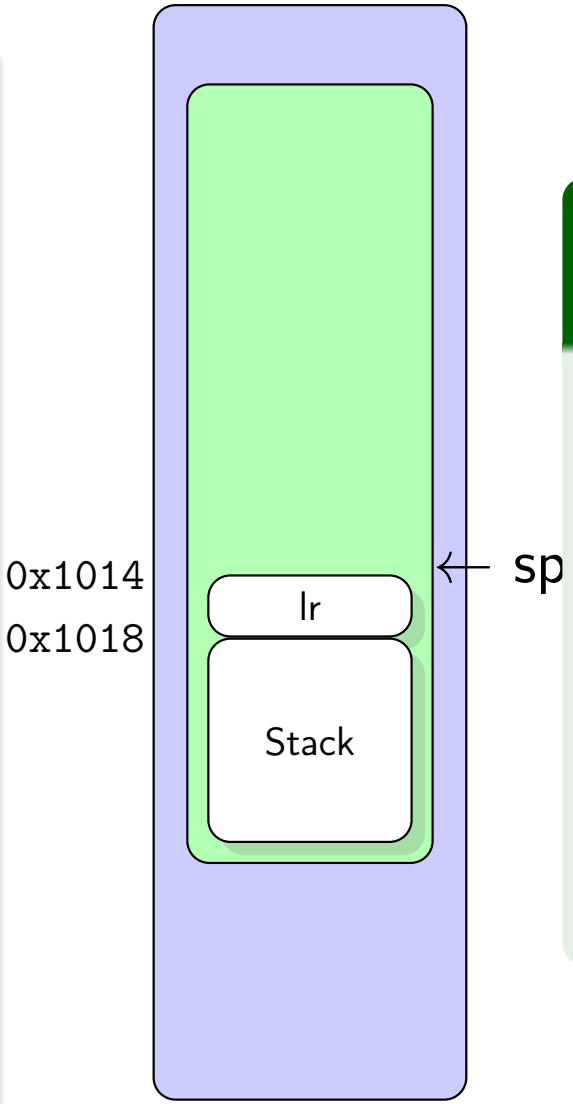


Exemple (ARM assembly language)

Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



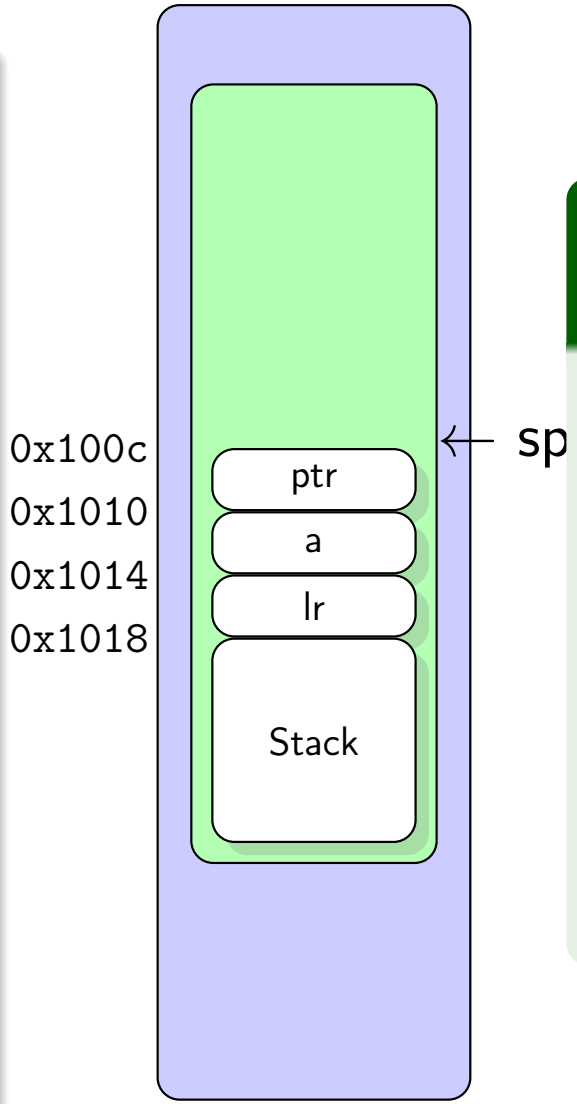
Exemple (ARM assembly language)

```
g:
  push lr              ; *sp := lr
```

Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



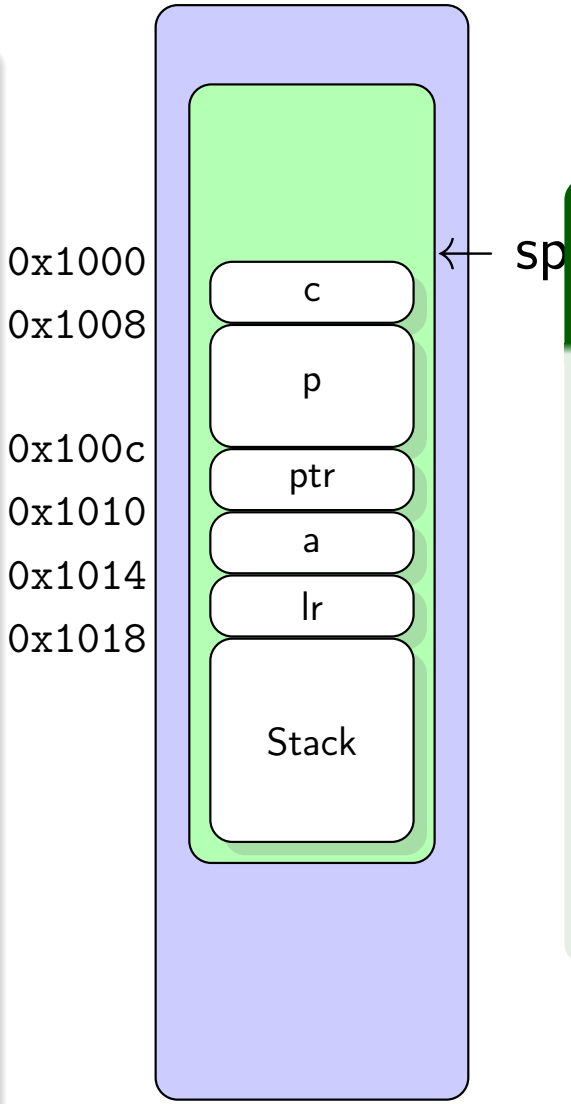
Exemple (ARM assembly language)

```
g:
  push lr              ; *sp := lr
  sub sp, sp, #8       ; sp := sp
  mov r0, #3           ; r0 := #3
  str r0, [sp]         ; *sp := r0
  str sp, [sp, #4]     ; *(sp + 4)
  bl f                 ; lr :=
```

Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



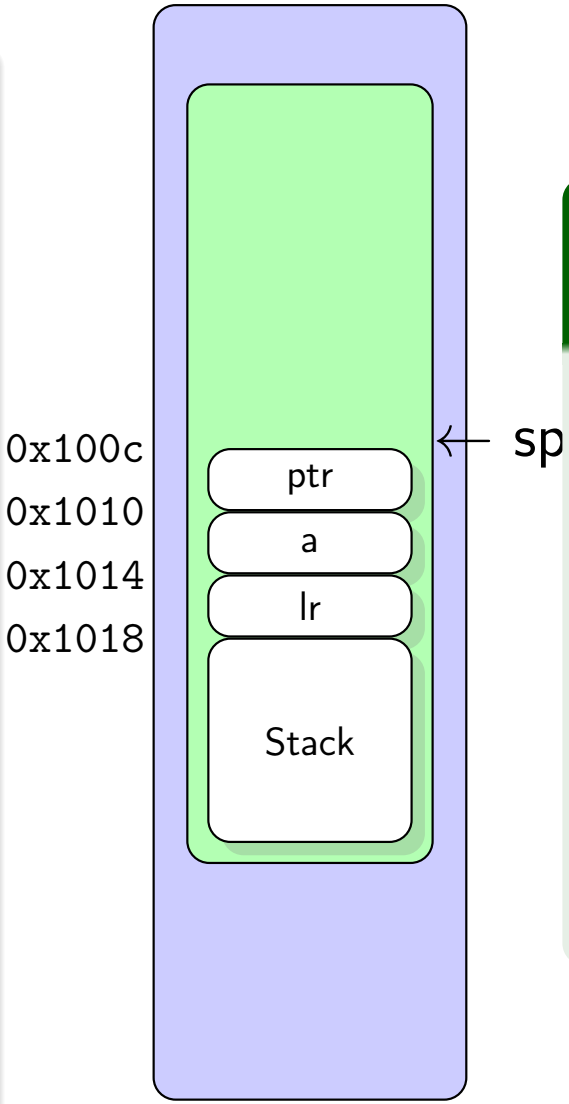
Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  sub sp, sp, #12   ; sp := sp
  mov r0, #3        ; r0 := 3
  str r0, [sp, #4]  ; *(sp + 4)
  add r1, r0, #2    ; r1 := r0
  str r1, [sp]      ; *sp := r0
  add sp, sp, #12   ; sp := sp
```

Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



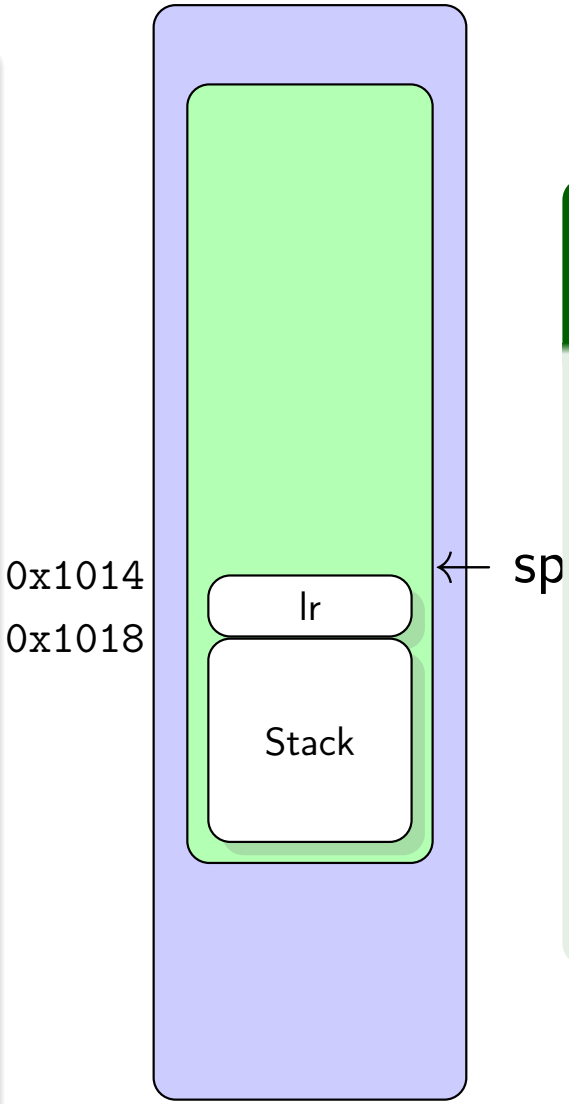
Exemple (ARM assembly language)

```
f:
  sub sp, sp, #12   ; sp := sp
  mov r0, #3        ; r0 := 3
  str r0, [sp, #4]  ; *(sp + 4)
  add r1, r0, #2    ; r1 := r0
  str r1, [sp]      ; *sp := r0
  add sp, sp, #12   ; sp := sp
  bx lr
```

Traduction des variables locales

Exemple (C)

```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



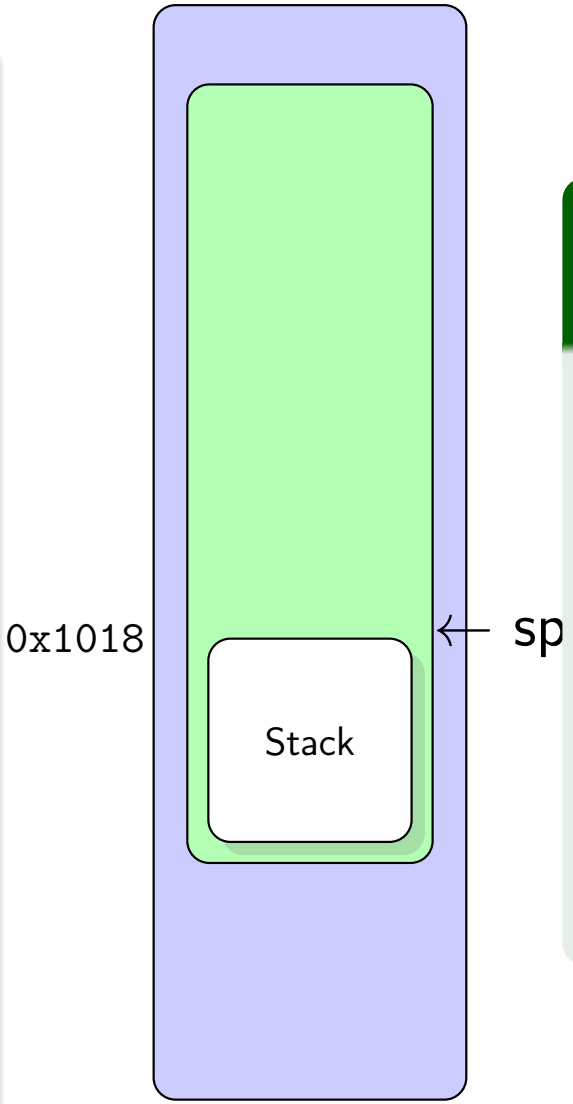
Exemple (ARM assembly language)

```
g:
  push lr              ; *sp := lr
  sub sp, sp, #8       ; sp := sp
  mov r0, #3           ; r0 := #3
  str r0, [sp]         ; *sp := r0
  str sp, [sp, #4]     ; *(sp + 4)
  bl f                 ; lr :=
  add sp, sp, #8       ; sp := sp
```

Traduction des variables locales

Exemple (C)

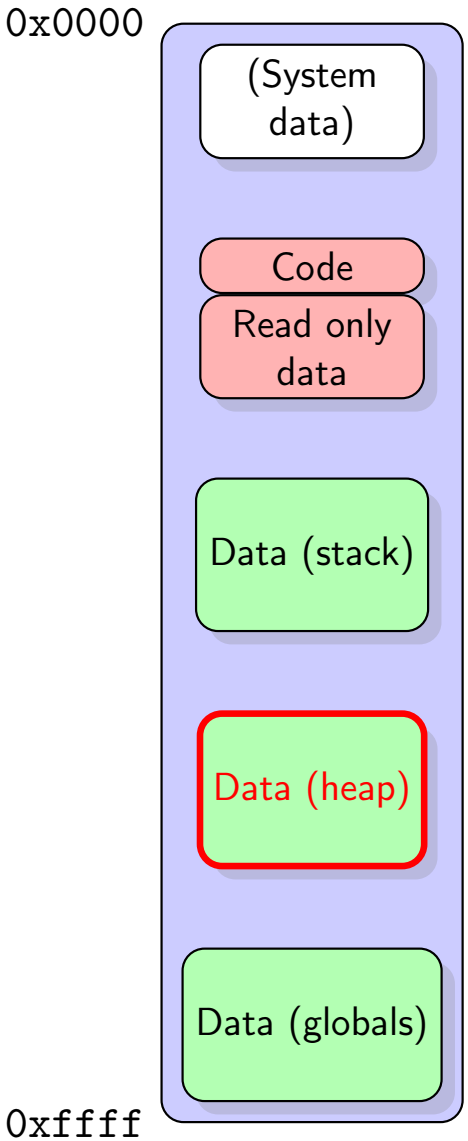
```
void f(void){
  struct point {
     int x;
     int y;
  } p;
  char c;
  p.y = 3;
  p.x = p.y + 2;
}

void g(void){
 int a = 3;
 int *ptr = &a;
 f();
}
```



Exemple (ARM assembly language)

```
g:
  push lr              ; *sp := lr
  sub sp, sp, #8       ; sp := sp
  mov r0, #3           ; r0 := #3
  str r0, [sp]         ; *sp := r0
  str sp, [sp, #4]     ; *(sp + 4)
  bl f                 ; lr :=
  add sp, sp, #8       ; sp := sp
  pop pc               ; sp := sp
```

Organisation du tas



- Allocation de la mémoire du tas avec `malloc` et `free`
- Nécessité de différencier les zones libres des zones déjà allouées
- On verra comment en TP

Résumé du cours

- Un processeur:
  - Lit des instructions en mémoire
  - Manipule des registres
  - Fait des lectures et écritures
- La mémoire d'un programme est organisée en 5 grandes zones
  - Code
  - Données constantes
  - Variables globales
  - Piles
  - Tas
- Le compilateur, l'assembleur et le linker:
  - Transforme le code C en code machine en suivant des schémas pré-établis
  - S'occupent de l'allocation statique du code et des données globales