

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

# Pratique du C

## Pile d'exécution

Licence Informatique — Université Lille 1

Pour toutes remarques : [Alexandre.Sedoglavic@univ-lille1.fr](mailto:Alexandre.Sedoglavic@univ-lille1.fr)

Semestre 5 — 2013-2014

Schématiquement, une pile est une structure de données linéaire pour laquelle les insertions et les suppressions d'éléments se font toutes *du même côté*. On parle de structure LIFO : Last In First Out.

Plus formellement, on peut considérer un ensemble d'éléments  $E$  et noter  $\text{Pil}(E)$  l'ensemble de toutes les piles sur  $E$ . Par exemple, les entiers peuvent constituer l'ensemble  $E$ ; la pile vide  $P_0$  est dans  $\text{Pil}(E)$ . Les opérations usuelles sur une pile sont :

- ▶  $\text{estVide}$  est une application de  $\text{Pil}(E)$  dans (vrai, faux),  $\text{estVide}(P)$  est vrai si, et seulement si,  $P$  est la pile  $P_0$ .
- ▶  $\text{empiler}$  est une application de  $E \times \text{Pil}(E)$  dans  $\text{Pil}(E)$ .
- ▶  $\text{depiler}$  est une application de  $\text{Pil}(E) \setminus P_0$  dans  $E$ .
- ▶  $\text{supprimer}$  est une application de  $\text{Pil}(E) \setminus P_0$  dans  $\text{Pil}(E)$ .

Si  $x$  est un élément de  $E$ , les relations satisfaites par une pile  $P$  et ces opérations sont :

1.  $\text{estVide}(P_0) = \text{vrai}$
2.  $\text{supprimer}(\text{empiler}(x, P)) = P$
3.  $\text{estVide}(\text{empiler}(x, P)) = \text{faux}$
4.  $\text{depiler}(\text{empiler}(x, P)) = x$

Cette dernière règle caractérise les piles.

# Implantation d'une pile (architecture Intel 32)

Notion de pile en assembleur :  
définitions théoriques et pratiques

Représentation des variables automatiques

Appel de fonction en C

Passage de paramètres par la pile

Passage de paramètre : une copie est faite sur la pile

Un segment de la mémoire est dévolu à la pile.

Les registres `%SS` et `%ESP` sont deux registres servant à gérer la pile :

**`%SS`** (Stack Segment i.e. segment de pile) est un registre 16 bits contenant l'adresse du segment de pile courant ;

L'assembleur vous fera manipuler une pile qui est stockée "en fond de panier", c.à.d dans les adresses les plus hautes de la mémoire. Ainsi, la base de la pile se trouve à l'adresse maximale, et elle s'accroît vers les adresses basses.

**`%ESP`** (Stack Pointer i.e. pointeur de pile) est le déplacement pour atteindre le sommet de la pile.

Ainsi, `%ESP` pointe sur le dernier mot machine occupé de la pile en mémoire.

# Notion de pile en assembleur : instructions assembleurs associées (Intel 32)

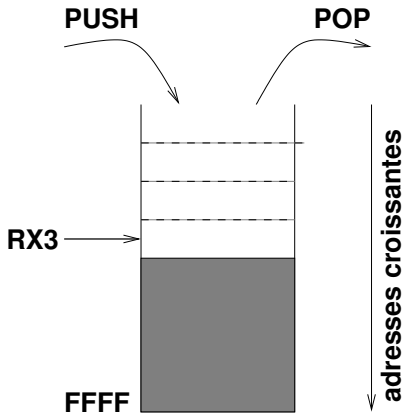
Les modification de la structure de la pile se font par les instructions :

- ▶ **push** reg : (empiler depuis le registre reg). Lorsque l'on empile un élément sur la pile, l'adresse contenue dans %ESP est décrémentée de 4 octets (car un emplacement de la pile est un mot machine de 32 shannons). En effet, lorsque l'on parcourt la pile de la base vers le sommet, les adresses décroissent.
- ▶ **pop** reg : (dépiler vers le registre reg). Cette instruction incrémente de 4 octets la valeur de %ESP. Attention, lorsque la pile est vide %ESP pointe sous la pile (l'emplacement mémoire en-dessous de la base de la pile) et un nouveau pop provoquera une erreur.

Il est aussi possible — pour lire ou modifier des valeurs dans la pile — d'utiliser les références mémoire :

```
movl %SS :4(%ESP),%EAX
```

- ▶ RX3 est %ESP ;
- ▶ %ESP pointe sur l'octet venant d'être empilé ;
- ▶ On empile un mot machine (4 octets).



Les variables *automatiques* (locales à une fonction) sont stockées dans la pile.

Le registre %EBP (Base Pointer) contient un déplacement correspondant à une position dans la pile.

Il sert à pointer sur une donnée dans la pile.

Représentation d'une variable automatique dans la pile :

```
int globale = 7 ;           .globl globale .data
                             globale: .long   7
                             .text
int                           .globl main .type main,@function
main                         main:
(void)                        ....
{                             movl    %esp, %ebp
    int locale ;              subl    $8, %esp
    locale = 1 ;              ....
    return 0 ;                movl    $1, -4(%ebp)
}                             ....
```

# Représentation des variables automatiques

`movl %esp, %ebp`

%ESP	data
	4 octets
	⋮
FFFF	bas de pile

%EBP mis en place

`subl $8, %esp`

%ESP	vide
	vide
%EBP	data
	4 octets
	⋮
FFFF	bas de pile

réserver de l'espace

`movl $1, -4(%ebp)`

%ESP	vide
	1
%EBP	data
	4 octets
	⋮
FFFF	bas de pile

affecter la variable

Notion de pile en assembleur :  
définitions théoriques et pratiques

Représentation des variables automatiques

Appel de fonction en C

Passage de paramètres par la pile

Passage de paramètre : une copie est faite sur la pile



# Représentation de variables de types différents et manipulation

Peu importe le type des variables automatiques que l'on veut représenter, la méthode est la même :

```
int                                     .text
main                                  .globl main
(void)                                .type main, @function
{                                     main: ....
    struct Gauss{                    movl %esp, %ebp
        int re ;                      subl $24, %esp
        int im ;                      ....
    } var = {                         movl    $1, -8(%ebp)
        .re = 1 ,                     movl    $1, -4(%ebp)
        .im = 1 ,                     movb    $97, -10(%ebp)
    } ;                               movb    $98, -9(%ebp)
                                     movb    -9(%ebp), %dl
                                     leal    -10(%ebp), %eax
                                     addb    %dl, (%eax)
                                     ....

    char tab[2] = {'a', 'b'} ;
    tab[0] += tab[1] ;
    return 0 ;
}
```

# Rappel sur les registres associés à l'exécution du code

Notion de pile en assembleur :  
définitions  
théoriques et pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

Le code exécutable d'un programme se présente sous la forme d'une suite finie contigüe d'octets stockée dans un segment de la mémoire.

**Le registre %CS (Code Segment).** Ce registre 16 bits contient le numéro du segment mémoire dans lequel sont stocké les instructions assembleur du code à exécuter. On ne peut pas accéder directement à ce registre.

**Le registre %EIP (Instruction Pointer).** Le registre %EIP contient l'offset de la prochaine instruction à exécuter. Il est modifié automatique à chaque exécution et peut être manipulé par des instruction du type `jmp`, `call`, `ret`, etc. On ne peut pas accéder directement à ce registre.

# Les instructions assembleur `call` et `ret`

L'appel d'une *routine* se fait par `call label_routine`. Soit un code implanté à l'adresse 1000 et une routine à l'adresse 1100.

1000	<code>mov \$1,%eax</code>	+--->	label:	1100	<code>shl \$1,%eax</code>
1002	<code>mov \$3,%ebx</code>			1102	<code>add %ebx,%eax</code>
1004	<code>CALL label</code>	-----		1104	<code>and \$7,%eax</code>
1007	<code>mov \$2,%eax</code>	<-----		1106	<code>add '0',%eax</code>
1009	<code>int 0x80</code>	_____		1108	<code>RET</code>

Le sous-programme doit contenir l'instruction `RET` qui permet de revenir au programme appelant.

Lors du `CALL`, `%EIP` reçoit la valeur 1100, adresse de la prochaine instruction à exécuter, tandis que l'adresse de retour 1007 est empilée sur la pile.

Sur le `RET`, le sommet de pile de valeur 1007 est dépilé, et son contenu est rangé dans `%EIP`.

# Appel de fonction en C (sans paramètre)

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

```
int UN(void)
{
    return 1 ;
}

int main(void)
{
    int var ;
    var = UN() ;
    return 0 ;
}
/* Remarquez que la valeur
   de retour transite par
   le registre %eax */

        .text
        .globl UN
UN:
    ...
    movl    $1, %eax
    ...
    ret

        .globl main
main:
    ...
    movl    %esp, %ebp
    subl    $8, %esp
    ....
    call    UN
    movl    %eax, -4(%ebp)
    movl    $0, %eax
    ...
    ret
    ...
```

# Ce qui se passe sur la pile

Notion de pile en assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

%ESP	vide
	var. aut.
%EBP	data
	4 octets
FFFF	bas de pile

avant le call

%ESP	adresse de retour
	vide
	var. aut.
%EBP	data
	4 octets
FFFF	bas de pile



pendant le call



%ESP	vide
	var. aut.
%EBP	data
	4 octets
FFFF	bas de pile

après le ret

Comme toutes variables automatiques, les paramètres sont stockés dans la pile. Dans une fonction C les variables et les paramètres sont gérés en suivant les étapes :

1. Sauver le pointeur de base de pile courant sur la pile ;
2. Se donner un nouveau pointeur de base de pile ;
3. Déclarer les variables automatiques sur la pile ;

En cas d'appel de fonction avec passage de paramètres :

4. Empiler les paramètres sur la pile ;
5. Effectuer un `call` (qui empile automatiquement l'adresse de retour sur la pile) ;

Dans la fonction appelée, on peut utiliser l'espace de pile associée aux paramètres ; Cette fonction se termine par un `ret` (qui dépile automatiquement l'adresse de retour) ;

6. Supprimer l'espace de pile — maintenant inutile — associé aux paramètres.

```
int                                     .text
PlusUn                               .globl PlusUn
(int par)                            PlusUn:
{                                    pushl    %ebp
    return par+1 ;                 movl    %esp, %ebp
}                                    movl    8(%ebp), %eax
                                    incl     %eax
                                    leave    ret
                                    .globl main
main:
                                    pushl    %ebp
                                    movl    %esp, %ebp
                                    subl     $8, %esp
                                    movl    $7, -4(%ebp)
                                    subl     $12, %esp
                                    pushl    -4(%ebp)
                                    call     PlusUn
                                    addl     $16, %esp
                                    leave
                                    ret
```

# Ce qui se passe sur la pile

Notion de pile en assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

%ESP	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

début de fonction

%ESP	%EBP_old
	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

empilement de l'ancien  
pointeur de base



# Ce qui se passe sur la pile

Notion de pile en assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

%ESP ↓ %EBP1	%EBP_old
	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

placement du nouveau  
pointeur de base

%ESP	
	var. loc.
%EBP1	%EBP_old
	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

création de variables  
automatiques

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

%ESP	paramètres
	var. loc.
%EBP1	%EBP_old
	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

empilement de paramètres

%ESP	adresse de retour
	paramètres
	var. loc.
%EBP1	%EBP_old
	adresse de retour
	4 octets
FFFF	bas de pile

après un call

### Pile (fonction appelée)

%ESP	var. loc.
%EBP	%EBP1
	adresse de retour
	paramètres
	var. loc.
%EBP	%EBP_old
	adresse de retour
	⋮

2) l'instruction `ret` dépile l'adresse de retour et positionne le registre pointeur d'instruction à cette adresse.

À la fin de la fonction appelée  
1) une instruction `leave` permet d'enlever de la pile l'espace associé aux variables automatiques et au stockage du pointeur de base. De plus, elle réaffecte au registre `%EBP` la valeur du pointeur de base de la fonction appelante.

3) il ne reste plus qu'à supprimer de la pile l'espace associé aux paramètres (`addl $16,%esp`) pour se retrouver dans la situation d'avant l'appel de fonction.

# Exemple incorrect de permutation

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

```
void
PER
(int alpha, int beta)
{
    int tmp ;
    tmp = alpha ;
    alpha = beta ;
    beta = tmp;
    return ;
}
```

```
.text
.globl PER

PER:
    pushl %ebp
    movl  %esp, %ebp
    subl  $4, %esp
    movl  8(%ebp), %eax
    movl  %eax, -4(%ebp)
    movl  12(%ebp), %eax
    movl  %eax, 8(%ebp)
    movl  -4(%ebp), %eax
    movl  %eax, 12(%ebp)
    leave
    ret
```

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

```
int  
main  
(void)  
{  
    int a = 1 ;  
    int b = 2 ;  
    PER(a,b) ;  
    return 0 ;  
}  
  
/* certains compilateurs  
placent variables  
automatiques et param\`etres  
aux m\^emes endroits  
(pas de push) */
```

```
.globl main  
main:  
    pushl %ebp  
    movl %esp, %ebp  
    subl $8, %esp  
    andl $-16, %esp  
    movl $1, -4(%ebp)  
    movl $2, -8(%ebp)  
    subl $8, %esp  
    pushl -8(%ebp)  
    pushl -4(%ebp)  
    call PER  
    addl $16, %esp  
    movl $0, %eax  
    leave  
    ret
```

# Passage de paramètre par adresse : les adresses sont copiées sur la pile

Notion de pile en assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

```
void  
PER  
(int *alpha, int *beta)  
{  
    int tmp ;  
    tmp = *alpha ;  
    *alpha = *beta ;  
    *beta = tmp ;  
    return ;  
}
```

```
.text  
.globl PER  
  
PER:  
    pushl %ebp  
    movl  %esp, %ebp  
    subl  $24, %esp  
    movl  8(%ebp), %eax  
    movl  (%eax), %eax  
    movl  %eax, -12(%ebp)  
    movl  12(%ebp), %eax  
    movl  (%eax), %edx  
    movl  8(%ebp), %eax  
    movl  %edx, (%eax)  
    movl  12(%ebp), %edx  
    movl  -12(%ebp), %eax  
    movl  %eax, (%edx)  
    leave  
    ret
```

# La fonction appelante

Notion de pile en  
assembleur :  
définitions  
théoriques et  
pratiques

Représentation  
des variables  
automatiques

Appel de fonction  
en C

Passage de  
paramètres par la  
pile

Passage de  
paramètre : une  
copie est faite sur  
la pile

```
int
main
(void)
{
    int a ;
    int b ;
    a = 1 ;
    b = 2 ;

    PER(&a,&b) ;
    return 0;
}
```

```
        .globl main
main:
    pushl %ebp
    movl  %esp, %ebp
    subl  $8, %esp
    andl  $-16, %esp
    movl  $1, -4(%ebp)
    movl  $2, -8(%ebp)
    subl  $8, %esp
    leal  -8(%ebp), %eax
    pushl %eax
    leal  -4(%ebp), %eax
    pushl %eax
    call  PER
    addl  $16, %esp
    movl  $0, %eax
    leave
    ret
```