Pratique du C
Pile d'exécution

Licence Informatique — Université Lille 1
Pour toutes remarques : 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 coté*. On parle de structure LIFO : Last In First Out.
Plus formellement, on peut considérer un ensemble d'éléments E et noter $\mathrm{Pil}(E)$ l'ensemble de toutes les piles sur E. Par exemple, les entiers peuvent constituer l'ensemble E ; la pile vide P_0 est dans $\mathrm{Pil}(E)$. Les opérations usuelles sur une pile sont :

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

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

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

Cette dernière règle caractérise les piles.

Implantation d'une pile (architecture Intel 32)

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'accroit 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.

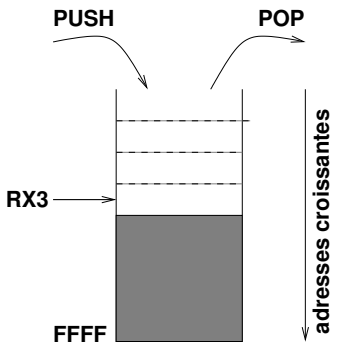
Notion de pile en assembleur : instructions assembleurs associées (Intel 32)

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 ;
int
main
(void)
{
  int locale ;
  locale = 1 ;
  return 0 ;
}
```

```
          .globl globale .data
globale:  .long   7
          .text
          .globl main .type main,@function
main:
          ....
          movl    %esp, %ebp
          subl    $8, %esp
          ....
          movl    $1, -4(%ebp)
          ....
```


Pratique du C
Pile d'exécution

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

Pratique du C
Pile d'exécution

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
main
(void)
{
  struct Gauss{
    int re ;
    int im ;
  } var = {
    .re = 1 ,
    .im = 1 ,
  } ;

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

```
          .text
          .globl main
          .type main, @function
main:     ....
          movl %esp, %ebp
          subl $24, %esp
          ....
          movl   $1, -8(%ebp)
          movl   $1, -4(%ebp)
          movb   $97, -10(%ebp)
          movb   $98, -9(%ebp)
          movb   -9(%ebp), %dl
          leal   -10(%ebp), %eax
          addb   %dl, (%eax)
          ....
```


Pratique du C
Pile d'exécution

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

Rappel sur les registres associés à l'exécution du code

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.

Pratique du C
Pile d'exécution

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

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

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.

Pratique du C
Pile d'exécution

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

Appel de fonction en C (sans paramètre)

```
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

%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. Suprimer 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
int                          movl    %esp, %ebp
main                         subl    $8, %esp
(void)                       movl    $7, -4(%ebp)
{                            subl    $12, %esp
  int var ;                  pushl   -4(%ebp)
  var = 7 ;                  call    PlusUn
  return PlusUn(var) ;       addl    $16, %esp
}                            leave
                             ret
```


Ce qui se passe 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

%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

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

À la fin de la fonction appellée 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.

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

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.

Pratique du C
Pile d'exécution

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

Exemple incorrect de permutation

```
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
```


Pratique du C
Pile d'exécution

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
```


Pratique du C
Pile d'exécution

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

Passage de paramètre par adresse : les adresses sont copiées 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
```


Pratique du C
Pile d'exécution

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

La fonction appelante

```
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
```