ALMO

Convention d'appel des fonctions

plan

- Convention d'appel des fonctions

  La convention d'appel des fonctions est à la fin du document sur le langage d'assemblage
  https://www-soc.lip6.fr/trac/sesi-almo/chrome/site/docs/ALMO-mips32-asm.pdf

Programmation structurée

Un programme est structurée en fonctions

Une fonction est un morceau de programme
- qui reçoit des arguments
- qui rend un résultat
- qui peut accéder aux données globales du programme
- qui dispose d'un espace de travail propre.

Définition en C :

```
type_var_globale  var_globale;
type_retour nom_fonction (type_args args)
{
    type_var_globale  var_locale;
    instructions;
    return valeur_retour_fonction;
}
```

corps

bloc d'inst.

Usage :

l'appel d'une fonction est une instruction

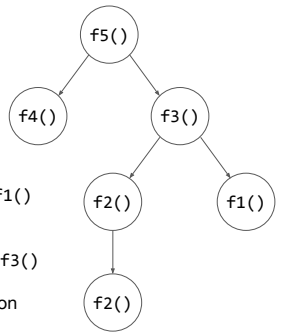
```
instruction_1;
instruction_2;
v = nom_fonction( arg);
instruction_4;
```


Une fonction peut appeler d'autres fonctions

Le comportement d'une fonction est défini par un bloc d'instructions qui peut contenir des appels d'autres fonctions.

```
f1() {
    …
}
f2() {
    f2();
}
f3() {
    f1();
    f2();
}
f4() {
    …
}
f5() {
    f4();
    f3();
}
```

Arbre d'appels



`f3()` est la fonction **appelante** de `f2()` et `f1()`

`f2()` et `f1()` sont les fonctions **appelées** de `f3()`

`f3()` est aussi la fonction **appelée** de `f5()`

Exécution d'un programme

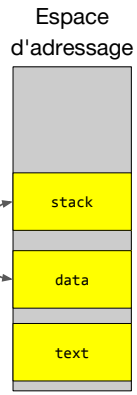
Un programme qui s'exécute est défini par

- un espace d'adressage dans lequel se trouve son code, ses données globales, et sa (ou ses) pile(s) d'exécution pour ses données locales.
- Le programme a une fonction d'entrée (en C c'est `main()`). La valeur de retour de la fonction `main()` est la valeur de retour du programme.
- La fonction `main()` va appeler d'autres fonctions.
- le *système* crée au moins un **fil d'exécution**, défini par :
  - **l'état de registres** du processeur dont le pointeur de programme (PC) désignant l'instruction en cours
  - et une **pile d'exécution** des fonctions

Variables globales — Variables locales

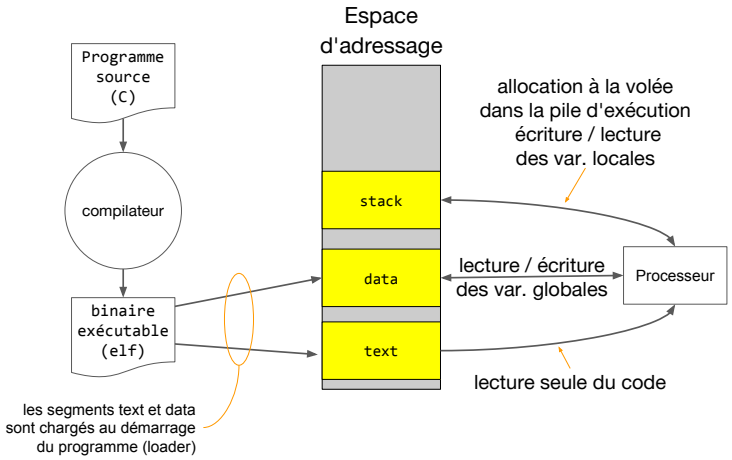
Une fonction peut utiliser :

- les variables globales du programme, lesquelles sont visibles (accessibles) de toutes les fonctions *
  - Les variables globales sont allouées à la compilation
  - Elles placées dans le segment **`data`**
  - Leur valeur initiale est connue (0 par défaut)
  - Elles sont détruites à la terminaison du programme
- les variables locales, lesquelles sont visibles des instructions du bloc (et sous-blocs) où elles sont définies.
  - Les variables sont allouées à l'appel de la fonction
  - Elles placées dans le segment **`stack`**
  - Leur valeur initiale est indéfinie par défaut
  - Elles sont détruites à la sortie de la fonction



* *en utilisant le mot **static** devant leur déclaration, leur visibilité est réduite au seul fichier où elles sont définies*

Allocation des variables



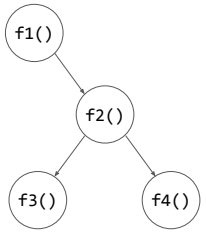
Services de la pile d'exécution

- La **pile d'exécution** offre de la place pour **3 services** :
  1. le passage des **arguments** des fonctions
  2. la sauvegarde du contenu des **registres** de travail du processeur
     En effet, les calculs sont faits dans les registres GPR.
     En conséquence quand on appelle une fonction, les registres contiennent des valeurs appartenant à la fonction appelante.
     Or la fonction appelée va aussi avoir besoin de registres pour ces calculs.
     Il faut donc sauver le contenu des registres quand on entre dans une fonction et il faut les restaurer en sortant, mais nous allons le voir, pas tous.
  3. l'allocation temporaire des **variables locales**
- Une fonction qui s'exécute, se réserve de la place dans la pile pour ces 3 services. Cette place est appelée le **contexte d'exécution** de la fonction.
- Le contexte d'exécution d'une fonction est donc constitué de 3 zones pour :
  1. ses propres arguments
  2. la sauvegarde de ces registres de travail (afin de les restaurer en sortant)
  3. ses propres variables locales

Empilement des contextes 1/2

Soit le programme

```
f1( int a1 ) {
     int v1;
     f2( x2 );
     I1;
}
f2( int a2 ) {
     int v2;
     f3( x3 );
     f4( x4 );
     I2:
}
f3( int a3 ) {
     int v3;
     I3;
}
f4( int a4 ) {
     int v4;
     I4;
}
```



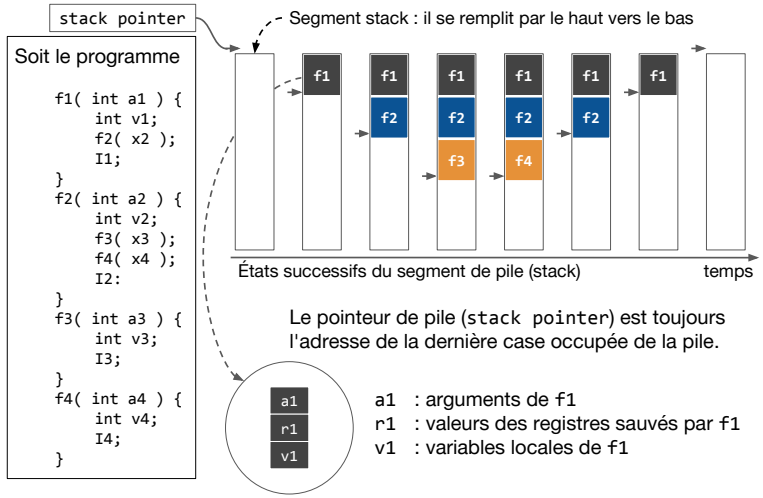
`Vocabulaire :`

`f2()` est la fonction :
- appelée de `f1()`
- appelante de `f3()` et `f4()`

`f3()` et `f4()`
- sont des fonctions **terminales**

L'exécution du programme consiste à
- entrer dans `f1()`
  - entrer dans `f2()`
    - entrer dans `f3()` sortir de `f3()`
    - entrer dans `f4()` sortir de `f4()`
  - sortir de `f2()`
- sortir de `f1()`

Empilement des contextes 2/2



Allocation des contextes 1/2

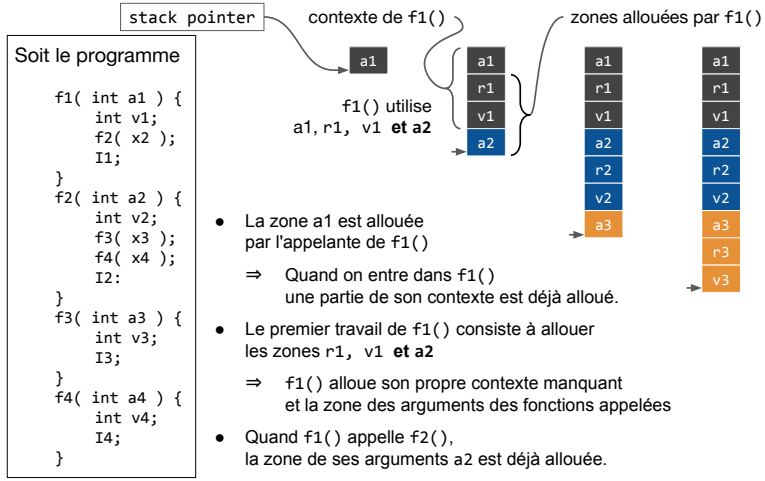
Rappel : Le contexte d'exécution d'une fonction est constituée de 3 zones
1. `(a)` ses propres arguments
2. `(r)` la sauvegarde de ces propres registres de travail
3. `(v)` ses propres variables locales

Soit
une fonction appelante `f1()` appelle une fonction appelée `f2()`
qui appelle une fonction `f3()`
`f2()` est donc l'appelée de `f1()` et l'appelante de `f3()`

Le contexte d'une fonction appelée `f2()` est alloué en deux temps :

1. La fonction appelante `f1()` alloue la place
   - pour les arguments de la fonction appelée `f2()`
2. La fonction appelée `f2()` alloue de la place
   - pour la sauvegarde de ses propre registres de travail
   - pour ses propres variables locales
   - **et aussi pour les arguments de la fonction** `f3()`

Allocation des contextes 2/2



- La zone a1 est allouée par l'appelante de `f1()`

  ⇒ Quand on entre dans `f1()` une partie de son contexte est déjà alloué.
- Le premier travail de `f1()` consiste à allouer les zones `r1, v1` **et a2**

  ⇒ `f1()` alloue son propre contexte manquant et la zone des arguments des fonctions appelées
- Quand `f1()` appelle `f2()`, la zone de ses arguments `a2` est déjà allouée.

Spécialisation des registres

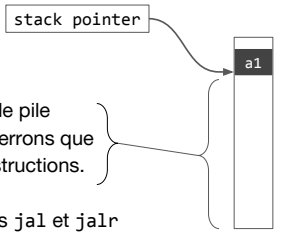
Le MIPS impose un usage pour ces registres dans le document MIPS ABI (Abstraction Binary Interface). C'est dans ce document qu'est défini la convention d'appel des fonctions que nous voyons ici en partie.

Le tableau ci-dessous résume les usages, nous allons le détailler plus loin, notez que chaque registre porte un nom symbolique en rapport avec son usage.

$0	Vaut 0 en lecture. Non modifié par une écriture
$1 (at)	Réservé à l'assembleur pour les macros.
$2, $3 (v0, V1)	Utilisés pour les calculs temporaires et la valeur de retour des fonctions,
$4 . $7 (a0 .. a3)	Utilisés pour le passage des arguments de fonctions, les valeurs ne sont pas préservées lors des appels de fonctions. Les autres arguments sont placés dans la pile.
$8..$15, $24, $25 (t0..t9)	Registres temporaires de travail, les valeurs ne sont pas préservées lors des appels de fonctions
$16 ,… $23, $30 (s0 … s8)	Registres persistants dont les valeurs sont préservées par les appels de fonctions
$26,$27 (K0, k1)	Réservés aux procédures noyau.
$28 (gp)	Pointeur sur la zone des variables globales (segment data)
$29 (sp)	Pointeur de pile
$31(ra)	Contient l'adresse de retour d'une fonction

Pointeur de pile et Appel de fonction

Le pointeur de pile utilise le registre `$29`



A tout instant le pointeur de pile pointe sur la dernière case occupée dans la pile.

⇒ Les cases mémoires sous le pointeur de pile ne doivent jamais être utilisées, nous verrons que leur valeur peut changer entre deux instructions.

L'appel d'une fonction se fait par les instructions `jal` et `jalr`

`jal` signifie *jump and link*

jump parce qu'on saute à la première instruction de la fonction,

link parce qu'on doit se souvenir de l'adresse de l'instruction de retour l'adresse de retour est stockée implicitement dans le registre `$31`

- `jal label` : $31 ← PC+4 puis PC ← label
- `jalr $r` : $31 ← PC+4 puis PC ← $r

Retour de fonction

- Lorsqu'on entre dans une fonction, le registre $31 contient l'adresse de retour.
  Le retour dans la fonction appelante se fait par :

  ```
  jr $31
  ```

- Lorsqu'on sort d'une fonction,

  $2 doit contenir la valeur de retour
  $3 également si c'est une valeur sur 64 bits

- Le registre $29 pointe au même endroit qu'à l'entrée (c'est-à-dire sur la case du premier argument).
  Si $29 a été modifié, il devra être restauré.

Registres temporaires et persistants

L'ABI du MIPS distingue deux types de registres :
1. Les registres persistants : $16 à $23 et $30
2. les registres temporaires : tous les autres

Un registre persistant n'est pas modifié par l'appel d'une fonction appelée.

Par exemple, si `f1()` place la valeur `42` dans le registre persistant `$18`, puis appelle la fonction `f2()`, lorsque `f2()` retourne dans `f1()`, `$18` contient toujours `42`.

Un registre temporaire peut être modifié par l'appel d'une fonction appelée.

Par exemple, si `f1()` place la valeur `42` dans le registre temporaire `$10`, puis appelle la fonction `f2()`, lorsque `f2()` retourne dans `f1()`, `$10` ne contient pas toujours `42`.

Lorsqu'on entre dans une fonction `f()`, seuls les registres persistants qui vont être modifiés par l'exécution de la fonction `f()` doivent être sauvés dans le contexte de la fonction `f()` afin de les restaurer en sortant.
L'ordre des registres dans la pile est tel que le registre index le plus petit est à l'adresse la plus petite.
$29 et $31 ne sont pas des registres persistants mais ils sont également restaurés.

Arguments d'une fonction

Une fonction appelante réserve une zone dans la pile pour TOUS les arguments des fonctions qu'elle appelle.

- Si une fonction appelée a 1 argument entier, sa zone d'argument fait un mot
- Si une fonction appelée a 10 arguments, sa zone d'argument fait 10 mots
- L'ordre des arguments est imposé, le premier est à l'adresse la plus petite

MAIS l'ABI du MIPS impose une optimisation

Les 4 premiers arguments d'une fonction sont pas écrits dans la pile, ils sont placés dans les registres $4, $5, $6 et $7.

Attention, j'insiste, la fonction appelante a prévu la place dans la pile pour TOUS les arguments, même les 4 premiers, mais la fonction appelante ne place que les arguments au delà du 5ème dans la pile.

Convention d'appel des fonctions

La fonction appelante a fait en sorte que :

- $29 pointe sur la case réservée au premier argument de la fonction appelée
- $4 à $7 contiennent la valeurs des 4 premiers arguments, les autres sont en pile

La fonction appelée est composé de trois parties et doit :

Prologue 1.
- allouer de la place pour les registres persistants qu'elle utilise, ses variables locales et pour les arguments de ses propres fonctions appelées.
  - Soit **nr** le nombre de registres persistants (y compris $31)
  - Soit **nv** le nombre de variables locales
  - Soit **na** le nombre maximum d'arguments de ses propres fonctions appelées
    ATTENTION **a** n'est pas le nombre d'arguments de la fonction appelée
  - la place réservée est (**nr** + **nv** + **na**) x 4 octets
- sauvegarder les registres persistants qu'elle utilise
- si besoin, écrire les arguments reçus dans les registres $4 à $7 dans la pile

Corps 2.
- exécuter le corps de la fonction

Epilogue 3.
- placer dans $2 la valeur de retour
- restaurer l'état des registres persistants,
- restaurer le pointeur de pile
- revenir à la fonction appelante

un peu de code

```
fonction:     # ---------------------------- PROLOGUE
              addiu     $29,  $29, -X      # X = (nr + nv + na) x 4
              sw        $31, X-4 ($29)     # sauvegarde de l'adresse de retour
              sw        $RP, X-8 ($29)     # sauvegarde des registres persistants
              …
              sw        $4,  X ($29)       # sauvegardes des arguments (si besoin)
              …
              # ---------------------------- CORPS de fonction
              …

              # ---------------------------- EPILOGUE
              add       $2, $0, $R         # hyp: $R contient la valeur de retour
              lw        $31, X-4 ($29)     # restauration de l'adresse de retour
              lw        $RP, X-8 ($29)     # restauration des registres persistants
              addiu     $29, $29, X        # restauration du pointeur de pile
              jr        $31                # retour
```

toujours positis !

Notez bien que lors de l'exécution d'une fonction

- le pointeur de pile n'est modifié que deux fois : 1 fois en entrant et 1 fois en sortant
- on ne restaure pas les registres $4, $5, etc, car ils sont temporaires

Appel d'une fonction

Dans le corps d'une fonction `f()`, quand on doit appeler une fonction `f()`, il n'est jamais utile de déplacer le pointeur de pile pour les arguments de `g()` puisque cela a déjà été fait dans le prologue de `f()`

- Si `g()` a moins de 4 arguments, on les écrit dans $4 à $7 sinon les arguments à partir du 5ème sont placés dans la pile
- on exécute `jal g`
- au retour `$2` contient la valeur de retour

Exemple : programmer la fonction f()

```
int g(int *t, int z);
void h(int *x);
int f(int x, int *s) {
     int v;
     v = g(s, 2);
     if ( v == x )
          return -1;
      v = h(s);
     return v;
}
```

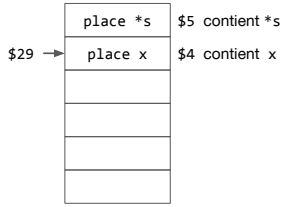
1. Dessiner l'état de la pile telle qu'elle a été mise par la fonction appelante.
2. Ecrire le corps de la fonction
   Cette étape est faite avant le prologue parce qu'on ne connaît pas encore le nombre de registres persistants nécessaires.
   - Assignez des registres pour les variables en privilégiant les registres temporaires, sauf si c'est "moins efficace" que les persistants
   - Ecrire le code assembleur (1ère passe)
3. Ecrire le prologue et l'épilogue
   - Déterminer **nr**, nv, na
   - Dessiner l'état de la pile après prologue
   - Ecrire le code assembleur du prologue et de l'épilogue
4. Une fois connu tous les registres, corriger le corps concernant les accès en pile


```
int g(int *t, int z);
void h(int *v);
int f(int x, int *s) {
     int v;
     v = g(s, 2);
     if ( v == x )
          return -1;
     v = h(s);
     return v;
}
```

fonction f()

2. Ecrire le corps de la fonction
   - Assignez des registres
     ```
     $8  : v
     $4  : x
     $5  : s
     ```
   - assembleur du corps de f()

1. Etat de la pile et argument à l'entrée f()



La place des arguments de g() est déjà réservée

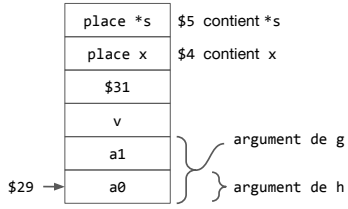
```
# v = g(s, 2);
     add  $4, $0, $5     # s
     li   $5,2           # 2
     jal  g              # appel
     add  $8, $0, $2     # retour
# if ( v == x ) return -1;
     lw   $4, ?1 ($29)  # x
     bne  $8, $4, suite
     li   $2, -1
     j    fin
suite:
     lw  $4, ?2 ($29)    # s
     jal h               # appel
fin:
```



```
int g(int *t, int z);
void h(int *v);
int f(int x, int *s) {
     int v;
     v = g(s, 2);
     if ( v == x )
          return -1;
     v = h(s);
     return v;
}
```

fonction f()

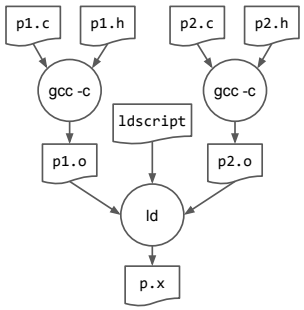
Etat de la pile et argument après le prologue de f()



3. Ecrire le prologue et l'épilogue
   - déterminer **nr**, **nv**, et **na**
     - **nr** = 1 (seulement $31)
     - **nv** = 1 (seulement v)
     - **na** = 2 (= MAX(2,1))
   - prologue
     ```
     add  $29, $29, -16
     sw   $31, 12 ($29)
     sw   $4,  16 ($29)
     sw   $5,  20 ($29)
     ```
   - épilogue
     ```
     # la valeur de retour est déja
     # dans $2 à la fin du corps
     lw   $31, 12 ($29)
     add  $29, $29, 16
     jr   $31
     ```
4. Correction du code du corps
   - ?1 = 16
   - ?2 = 20

Prochaine séance

Chaîne de compilation



GIET