Appels de fonction

Alexis Nasr
Carlos Ramisch
Manon Scholivet
Franck Dary

Compilation – L3 Informatique
Département Informatique et Interactions
Aix Marseille Université

Appels de fonction I

- Les fonctions (et procédures) en assembleur sont simplement des adresses dans le code.
- Un appel de fonction consiste à :
  - “sauter” à l’adresse de la première instruction de la fonction appelée,
  - exécuter les instructions de la fonction appelée,
  - revenir à la prochaine instruction de la fonction appelante (l’instruction qui suit l’appel).

Appels de fonction II

- La fonction appelée communique avec la fonction appelante à travers :
  - les paramètres d'appel,
  - la valeur de retour.
- De plus, la fonction appelée peut définir des variables locales.
- Où stocker les paramètres, la valeur de retour et les variables locales ?
- On ne peut pas les stocker dans des registres, ni dans la zone mémoire dédiée aux variables, car on ne peut savoir à l'avance combien il peut y avoir d'appels imbriqués.

Arbre d'activation

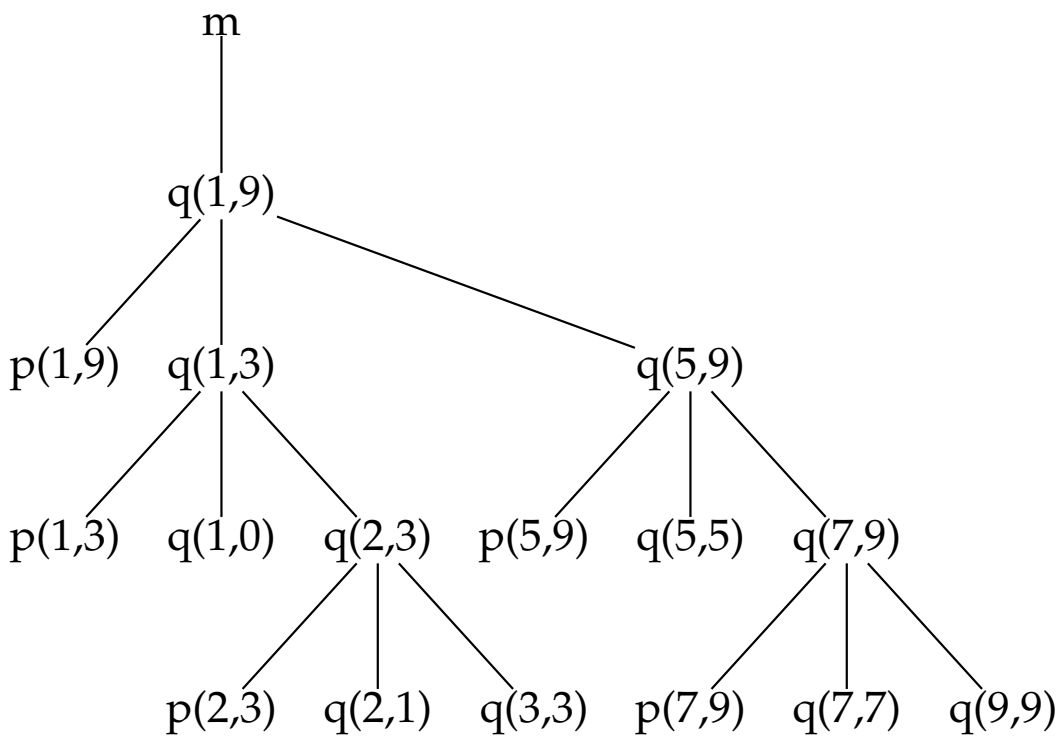
- Une fonction peut en appeler une autre, qui peut en appeler une autre …
- A tout moment de l'exécution d'un programme, une seule fonction est *active*
- Les activations successives forment un arbre d'activation.
- Les activations se trouvant sur la branche de la fonction active sont en attente.

Exemple : arbre d'activation du quicksort

```
int partition( int m, int n ) {
  ...
}

int quicksort(int m, int n) {
  if(n > m) {
    int i = partition(m, n);
    quicksort(m, i-1);
    quicksort(i+1,n);
  }
}

int main() {
  quicksort(1,9);
}
```

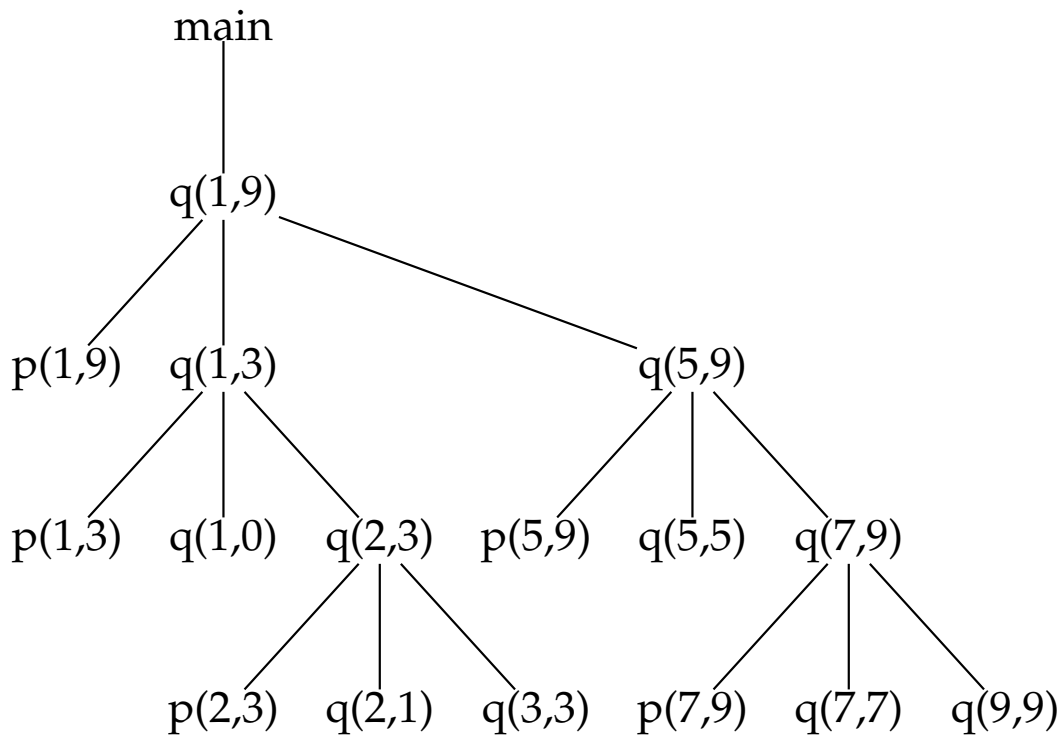


- Si la fonction active est `q(3,3)` alors `main`, `q(1,9)`, `q(1,3)` et `q(2,3)` sont en attente.
- Leurs paramètres doivent être sauvegarder en attendant la fin de `q(3,3)`.

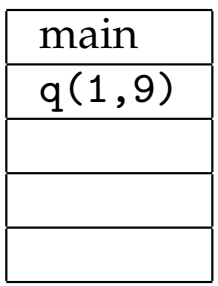
Trame de pile

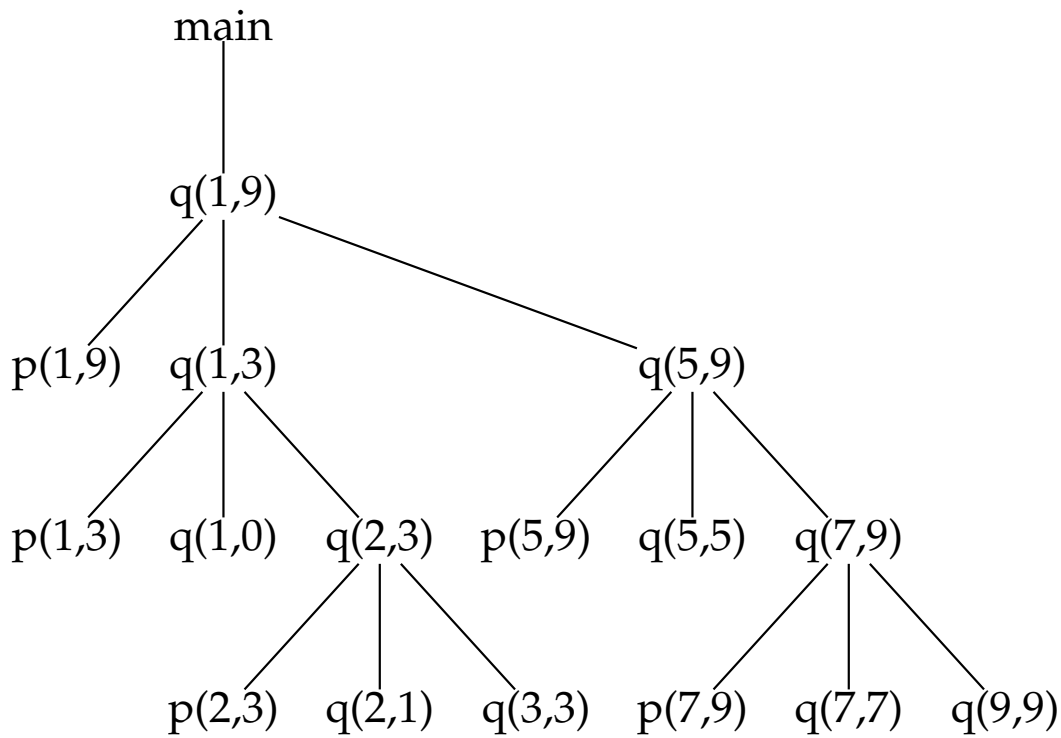
- Bloc mémoire sur la pile, contenant toutes les informations sur une fonction n'ayant pas terminé son exécution
  - l'adresse à laquelle poursuivre l'exécution après l'appel
  - la valeur de retour de la fonction
  - ses paramètres
  - ses variables locales
- A chaque appel de fonction, une trame est créée et empilée.
- A la fin de l'appel, la trame est dépilée.

Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort



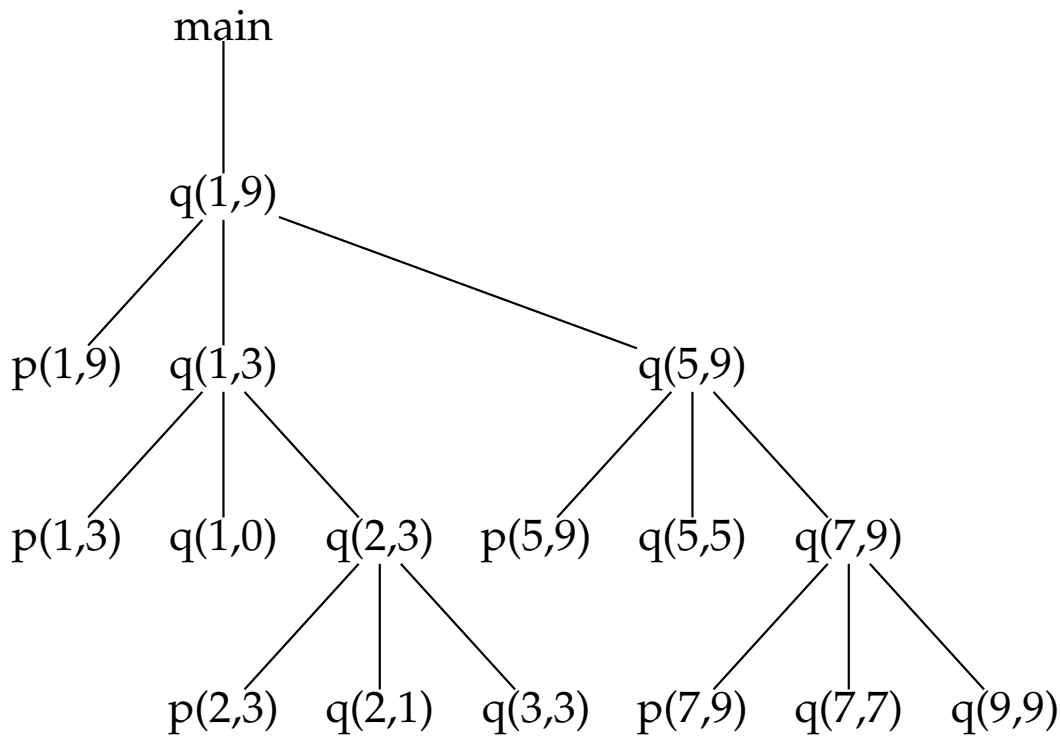
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort



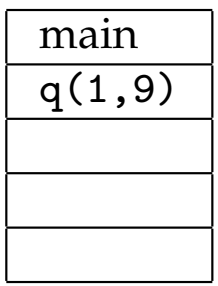


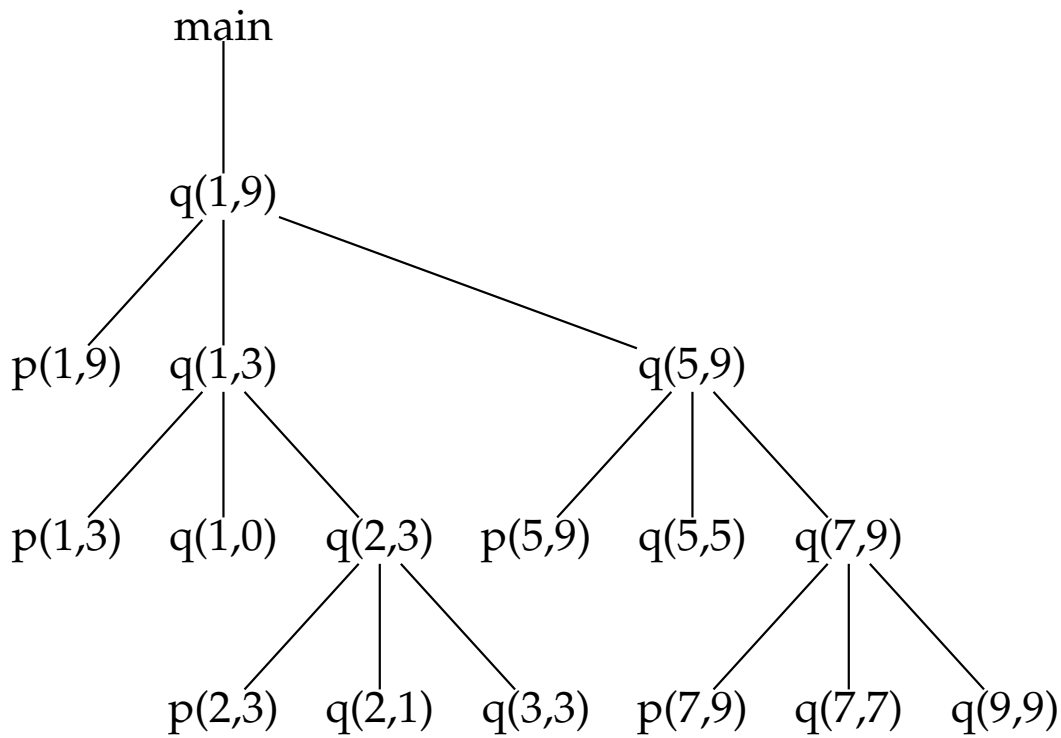
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
p(1,9)



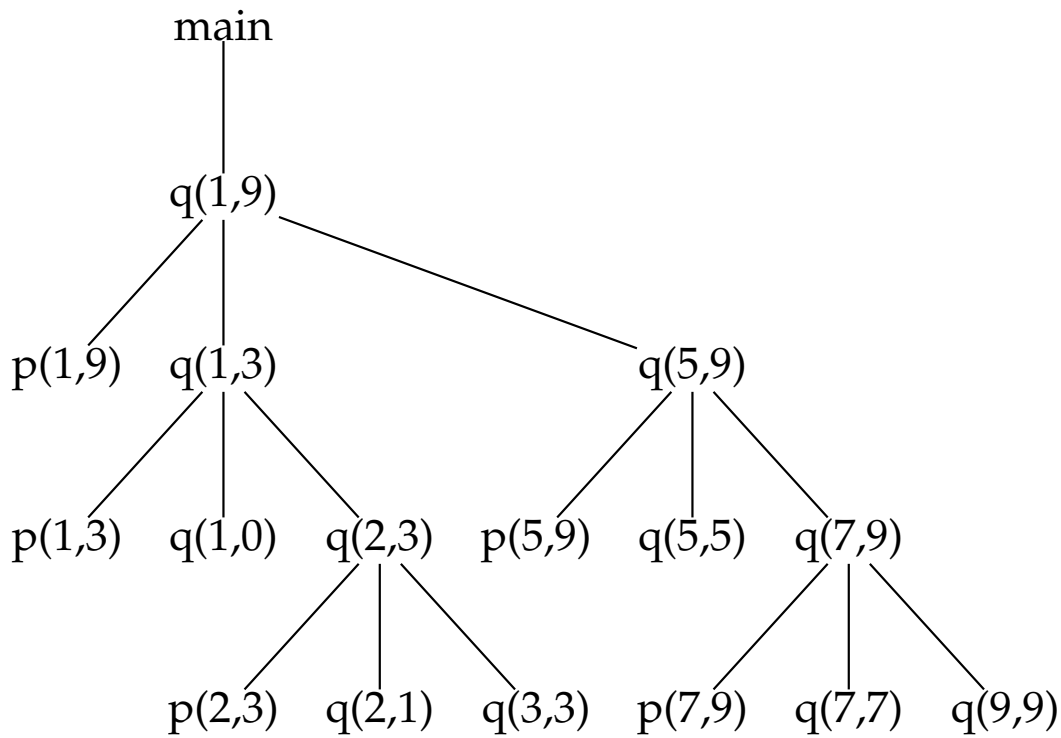
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort





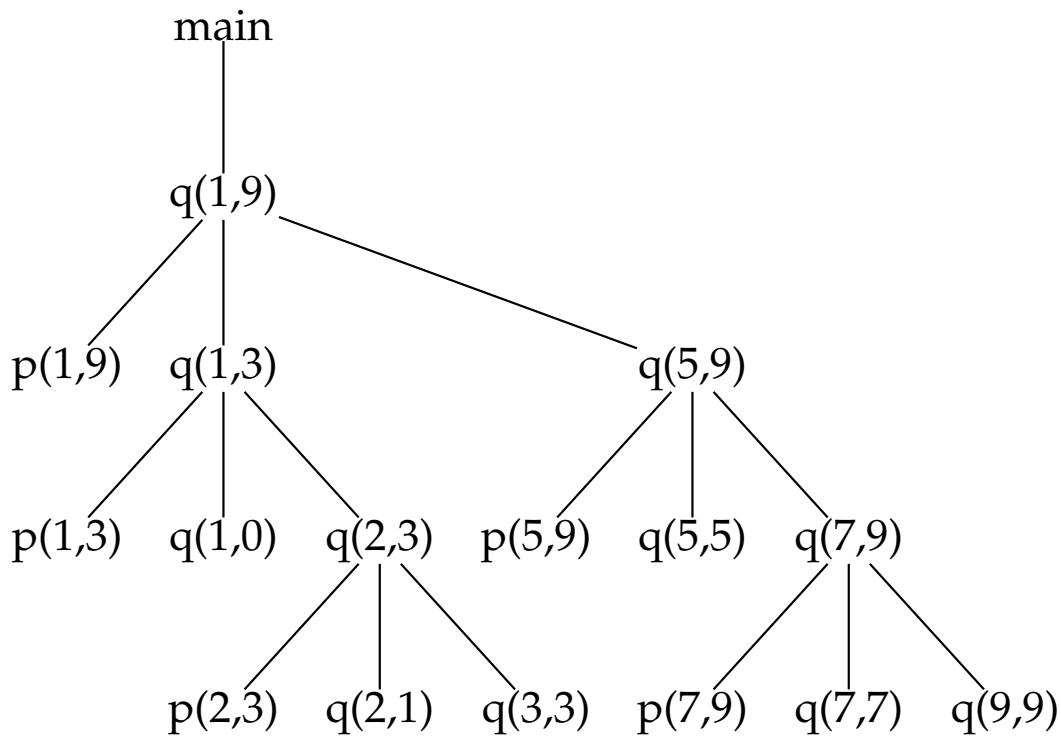
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)



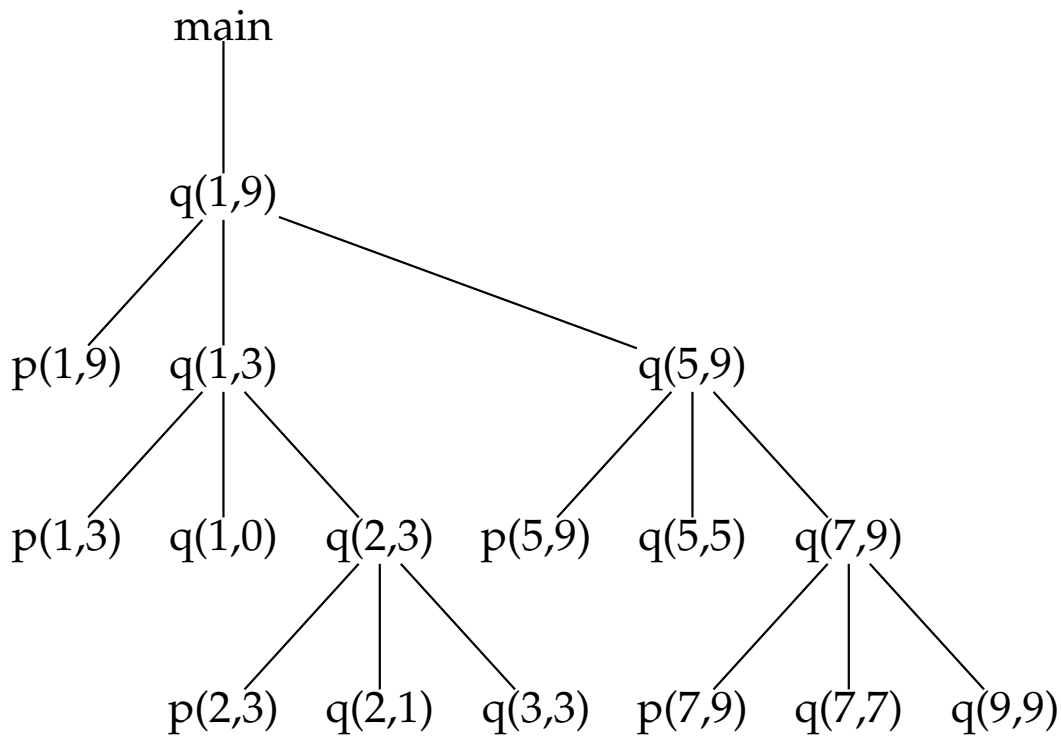
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
`q(1,9)`
`q(1,3)`
`p(1,3)`



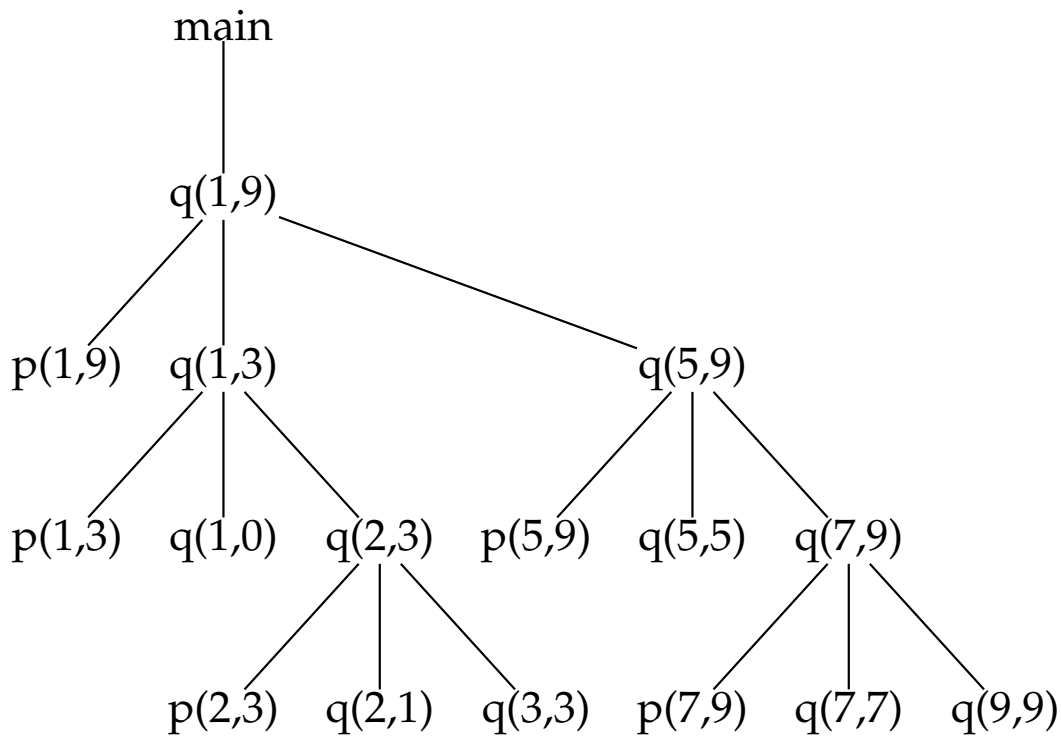
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)



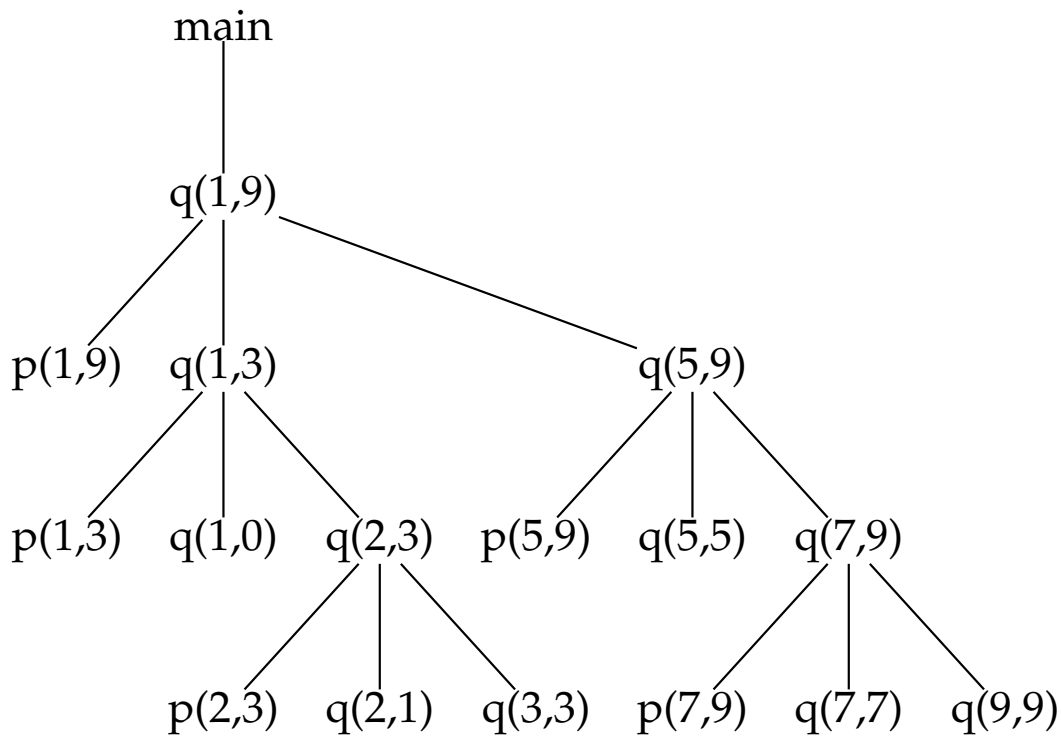
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)
q(1,0)



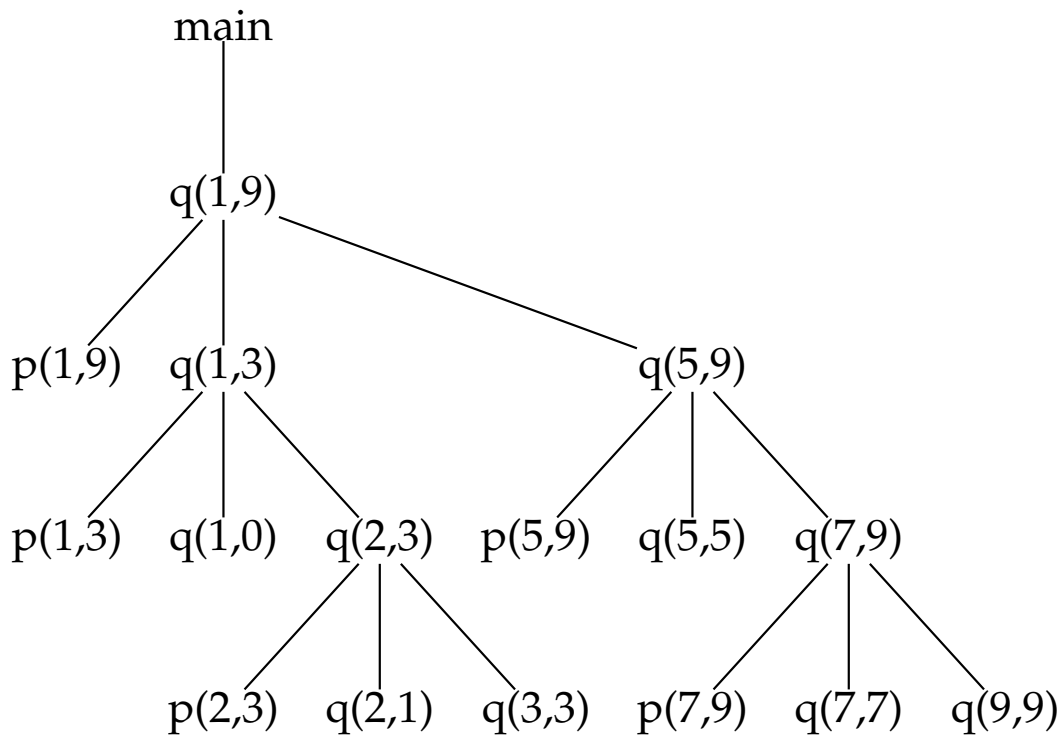
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)



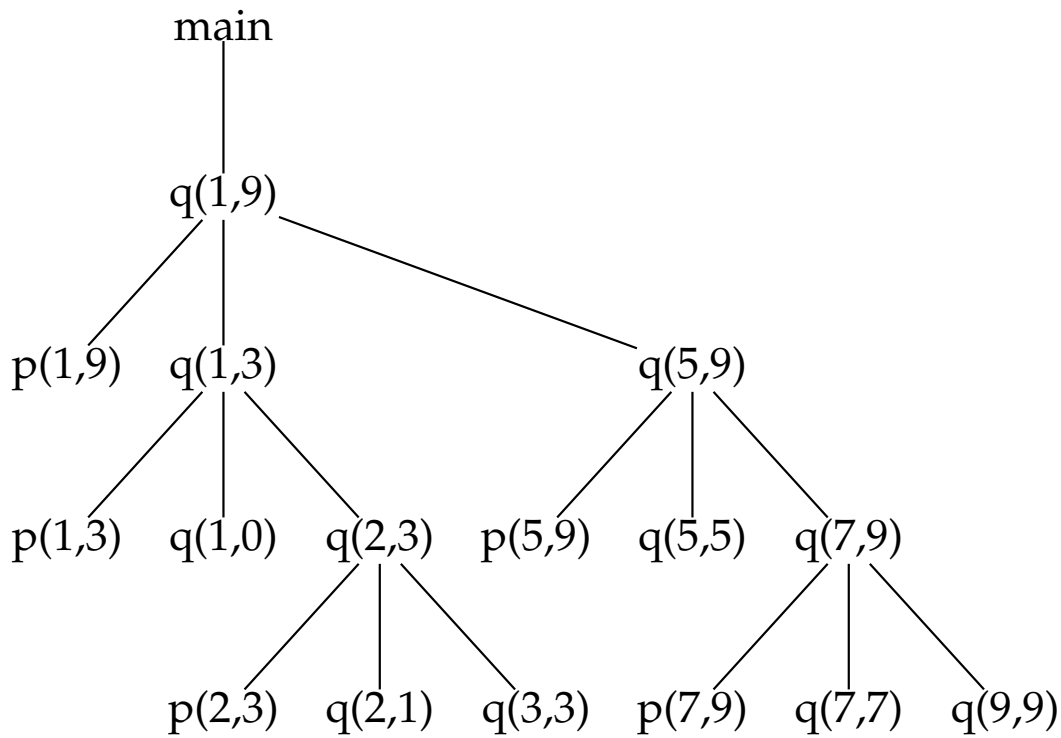
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)
q(2,3)



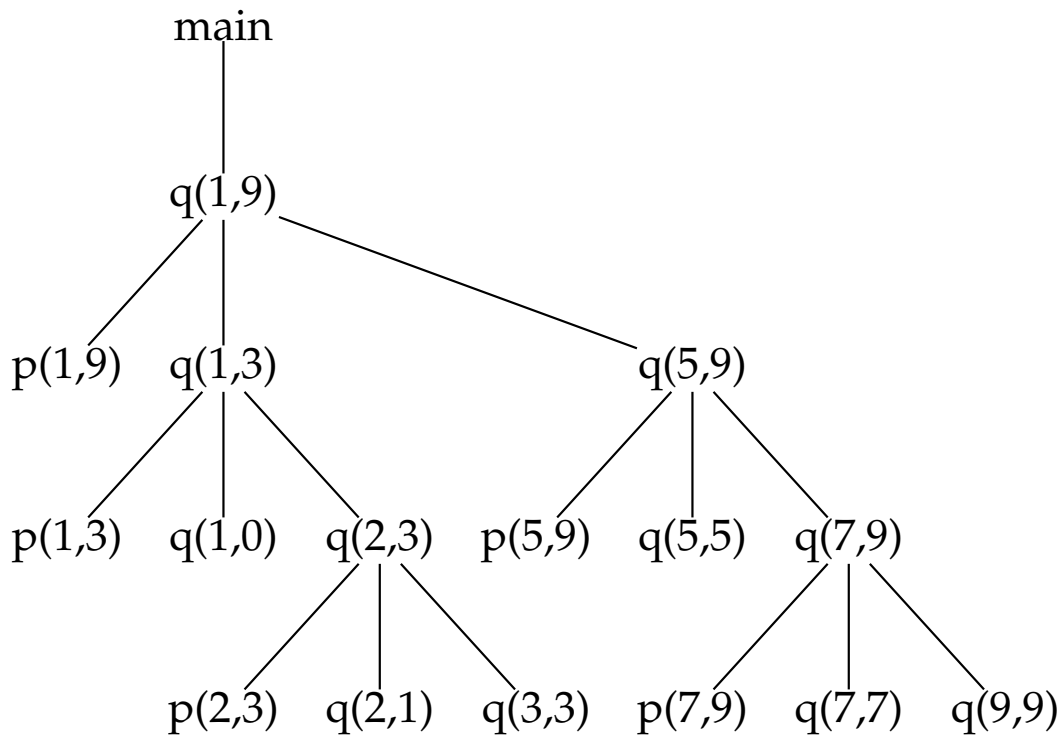
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)
q(2,3)
p(2,3)



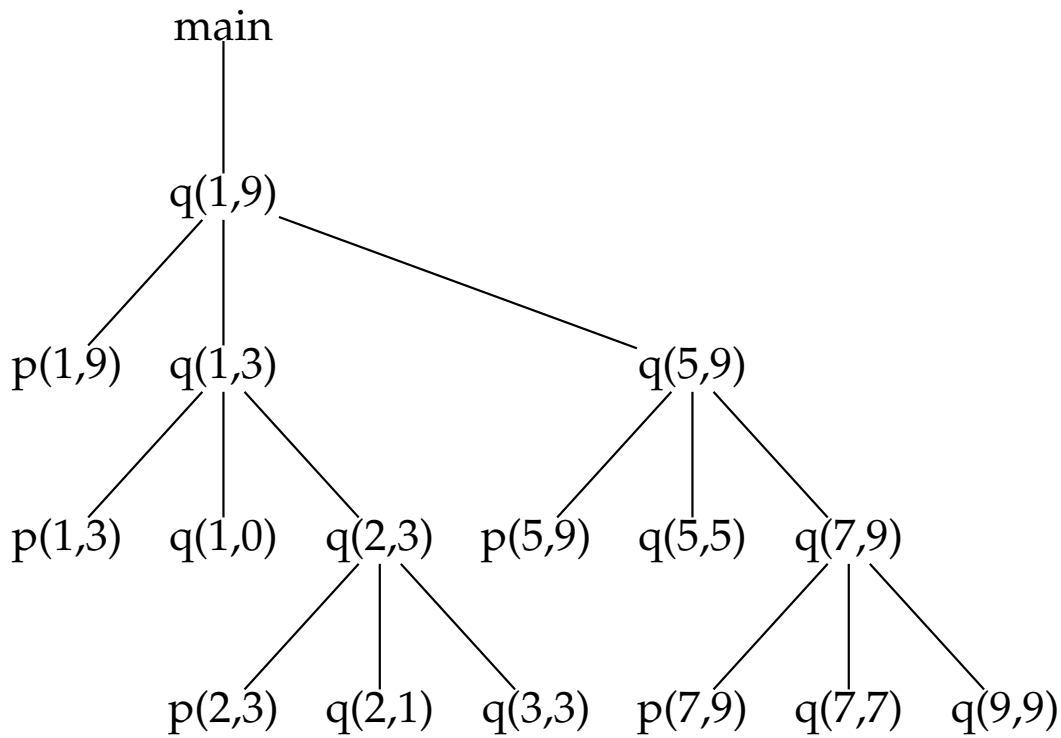
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)
q(2,3)



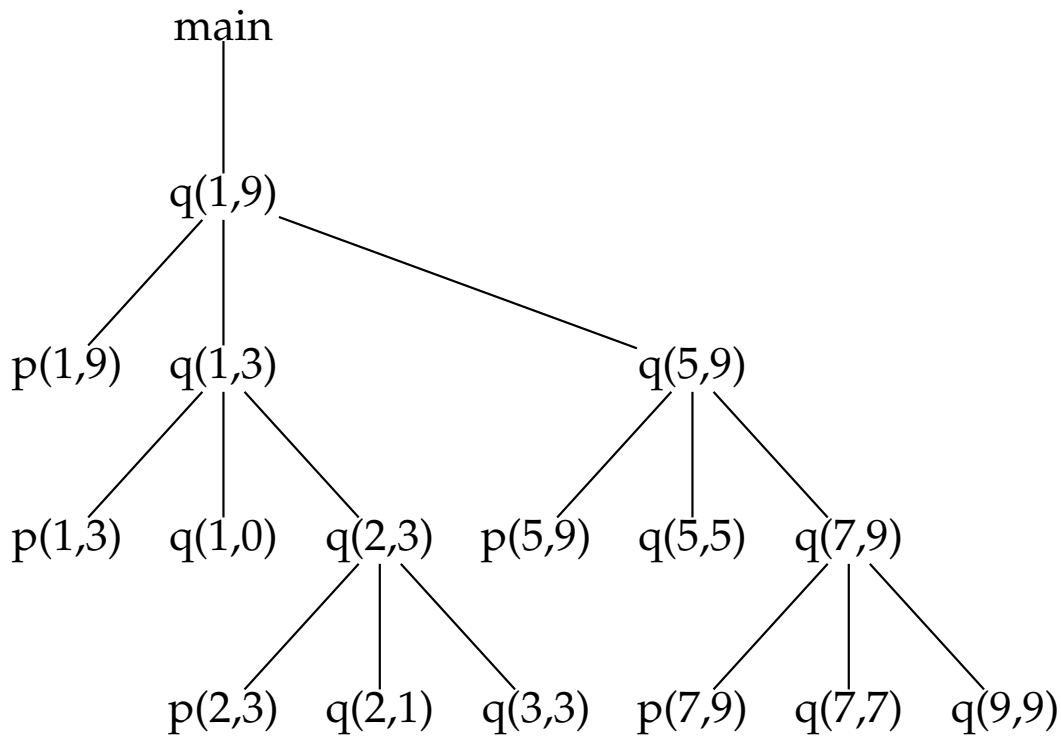
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
`q(1,9)`
`q(1,3)`
`q(2,3)`
`q(2,1)`



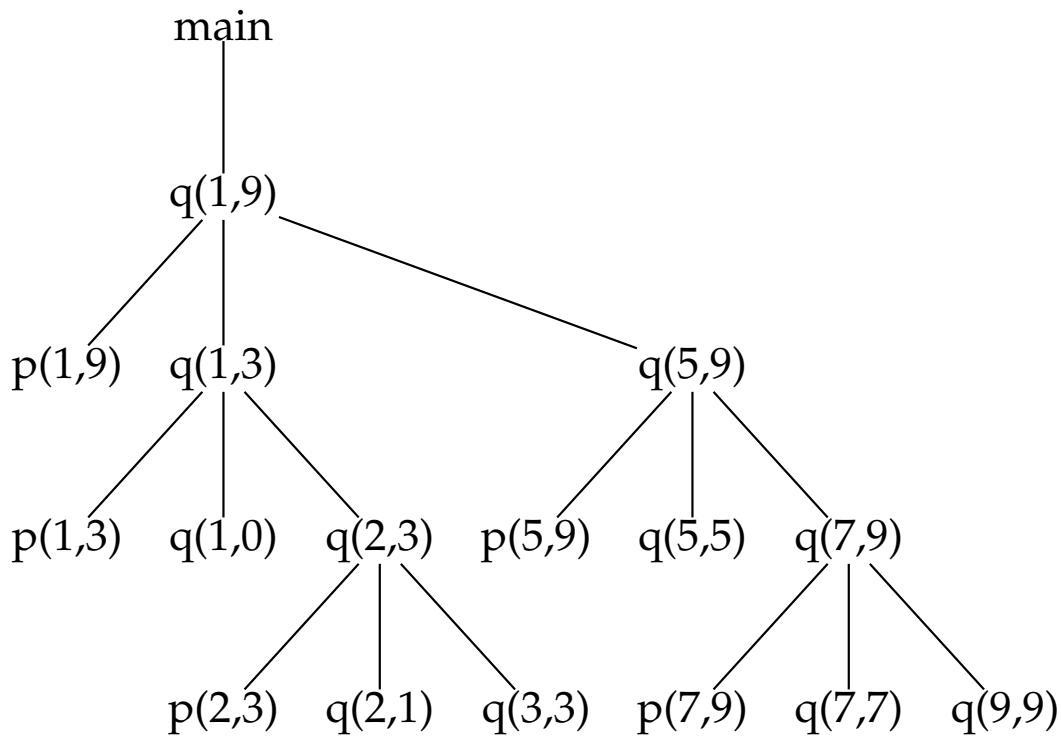
Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

main
q(1,9)
q(1,3)
q(2,3)



Exemple : trames de piles lors de l'execution de quicksort

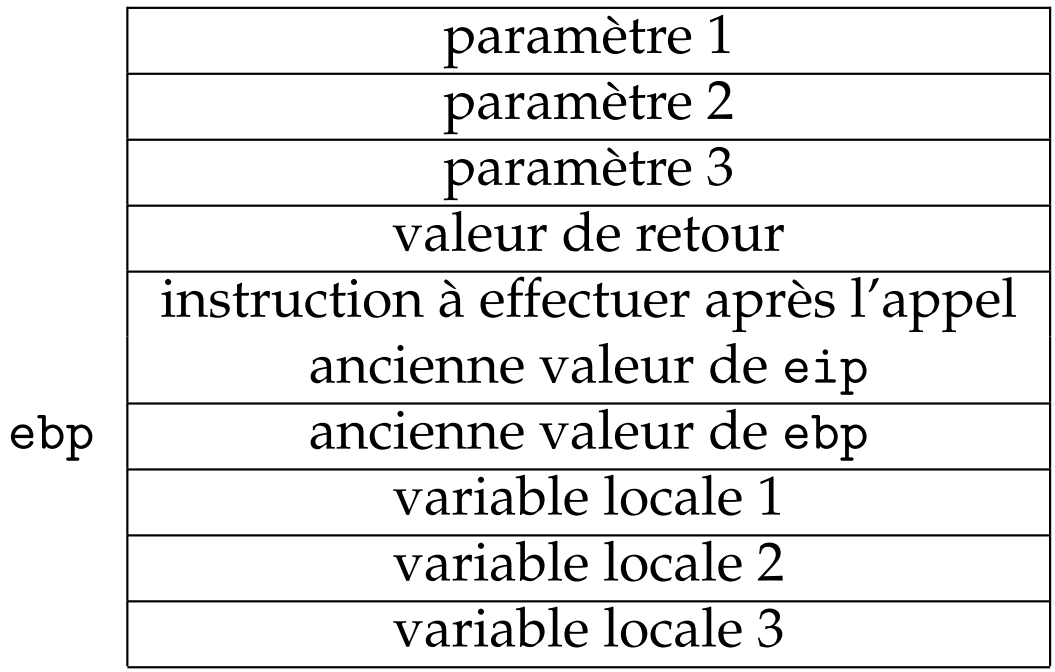
main
`q(1,9)`
`q(1,3)`
`q(2,3)`
`q(3,3)`



Organisation de la trame de pile

- Les éléments stockés dans la trame de pile doivent être rangés dans un ordre déterminé afin de pouvoir y accéder par un calcul.
- Un registre (`ebp` en X86) pointe sur un élément de la trame de pile active.
- L'accès aux éléments se fait par un calcul à partir de `ebp`.
- L'ordre dans lequel ils sont rangés est conventionnel, il est en général défini par le constructeur du processeur.

Exemple d'organisation d'une trame de pile



Calcul d'adresses

`ebp + 20`	paramètre 1
`ebp + 16`	paramètre 2
`ebp + 12`	paramètre 3
`ebp + 8`	valeur de retour
`ebp + 4`	instruction à effectuer après l'appel ancienne valeur de `eip`
`ebp`	ancienne valeur de `ebp`
`ebp - 4`	variable locale 1
`ebp - 8`	variable locale 2
`ebp - 12`	variable locale 3

Calcul d'adresses

`ebp + 8 + 4 * 3 - 0`	`ebp + 20`	paramètre 1
`ebp + 8 + 4 * 3 - 4`	`ebp + 16`	paramètre 2
`ebp + 8 + 4 * 3 - 8`	`ebp + 12`	paramètre 3
`ebp + 8`	`ebp + 8`	valeur de retour
`ebp + 4`	`ebp + 4`	instruction à effectuer après l'appel ancienne valeur de `eip`
	`ebp`	ancienne valeur de `ebp`
`ebp - 4 - 0`	`ebp - 4`	variable locale 1
`ebp - 4 - 4`	`ebp - 8`	variable locale 2
`ebp - 4 - 8`	`ebp - 12`	variable locale 3

Calcul d'adresses

- Une variable locale `a` : `ebp - 4 - a.adresse`
- Un argument `a` : `ebp + 8 + 4 * nb_args - a.adresse`
- La valeur de retour : `ebp + 8`

Conventions d'appel (*calling sequences*)

- Séquence d'opérations effectuées pour allouer et désallouer les trames de pile
- Certaines sont effectuées par la fonction *appelante (caller)* et d'autres par la fonction *appelée (callee)*
- Ordre des opérations au retour inversé : chacun désalloue ce qu'il a alloué.

Appels — côté appelant

Lors d'un appel de fonction, il faut :

1. empiler les arguments (`param`),
2. réserver de la place pour le résultat,
3. empiler le pointeur de programme `eip` (fait automatiquement par `call`),
4. aller à l'adresse de la fonction (fait automatiquement par `call`),

A l'issue de l'appel (après le `call`), il faut :

1. dépiler le résultat,
2. désallouer la mémoire des arguments

Appels — côté appelé

Quand on entre dans une fonction (`fbegin`), il faut :

1. empiler le frame pointer `ebp`,
2. initialiser la nouvelle valeur de `ebp`,
3. réserver de la place dans la pile pour les variables locales.

Quand on en sort (`fend`), il faut :

1. stocker le résultat,
2. désallouer la mémoire des variables locales,
3. dépiler le frame pointer `ebp`,
4. dépiler le pointeur de programme `eip`
   (fait automatiquement par `ret`),
5. sauter vers l'adresse de retour (fait automatiquement par `ret`).

Exemple : fonction simple

Code-source *L* :

```
entier a;
double( entier n ) {  retour n + n; }
main() {  a = double( 3 ); }
```

Code trois adresses :

```
1           alloc 1 va    ; alloue varaiable globale
2   fdouble: fbegin
3           t0 = vn + vn  ; somme des arguments
4           ret t0        ; sauvegarder la valeur de retour
5           fend          ; terminer la fonction (instr. retour)
6           fend          ; terminer la fonction (fin fonction)
7    fmain : fbegin
8           alloc 1       ; allouer place pour la valeur de retour
9           param 3       ; premier paramètre
10          t1 = call fdouble
11          va = t1
12          fend
```

Exemple : fonction simple en x86

Code-source L :

```
entier a;
double( entier n ) {  retour n + n; }
main() {  a = double( 3 ); }
```

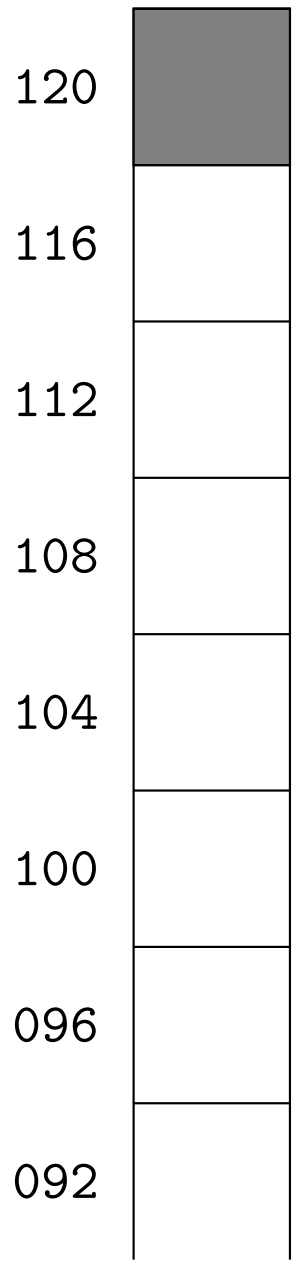
Code machine x86 :

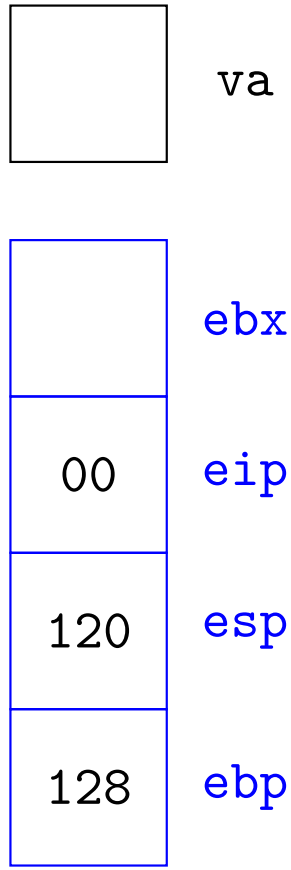
```
fmain:
  push ebp
  mov  ebp, esp
  push 3
  sub  esp, 4
  call fdouble
  add  esp, 4
  pop  ebx
  mov  dword[va], ebx
  pop  ebp
  ret
```

```
fdouble:
  push ebp
  mov  ebp, esp
  mov  ebx, dword[ebp + 12]
  add  ebx, dword[ebp + 12]
  mov  [ebp + 8], ebx
  pop  ebp
  ret
  pop  ebp
  ret
```

Exemple d'appel de fonction

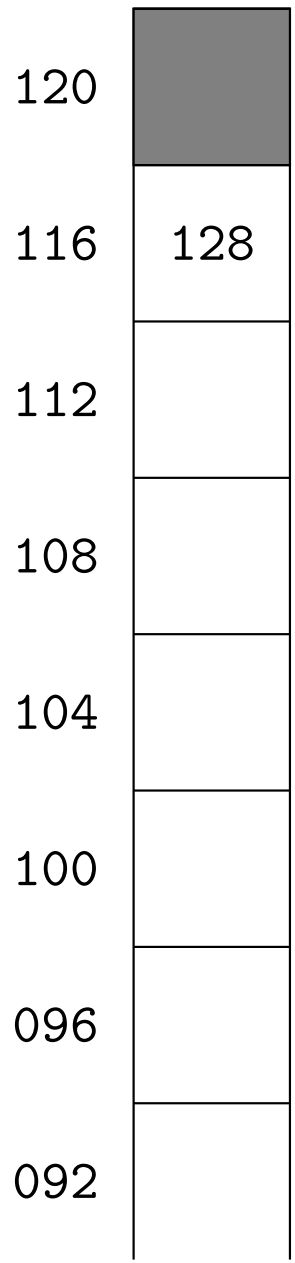
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

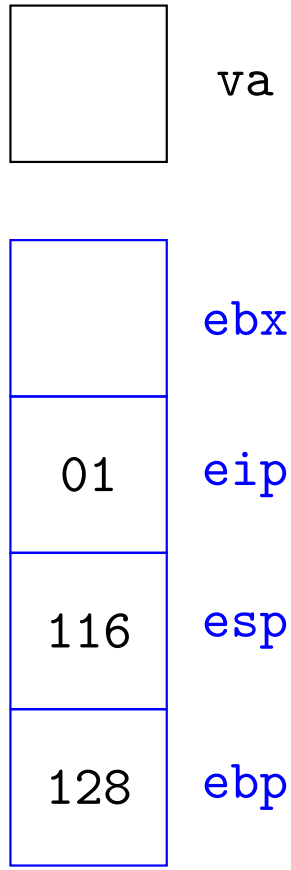




Exemple d'appel de fonction

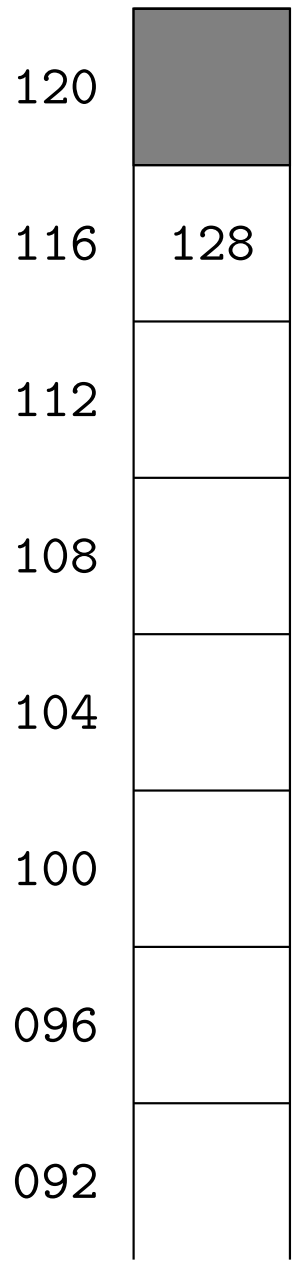
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

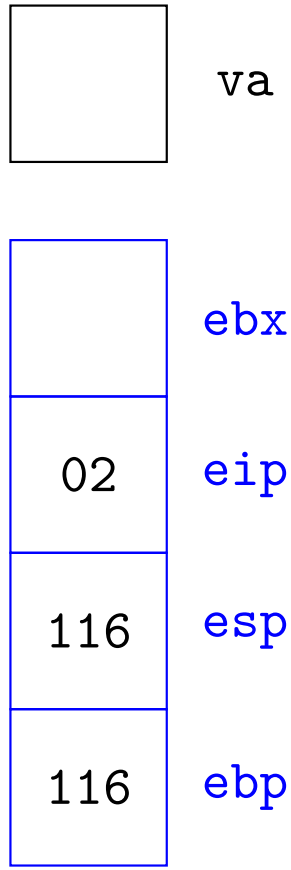




Exemple d'appel de fonction

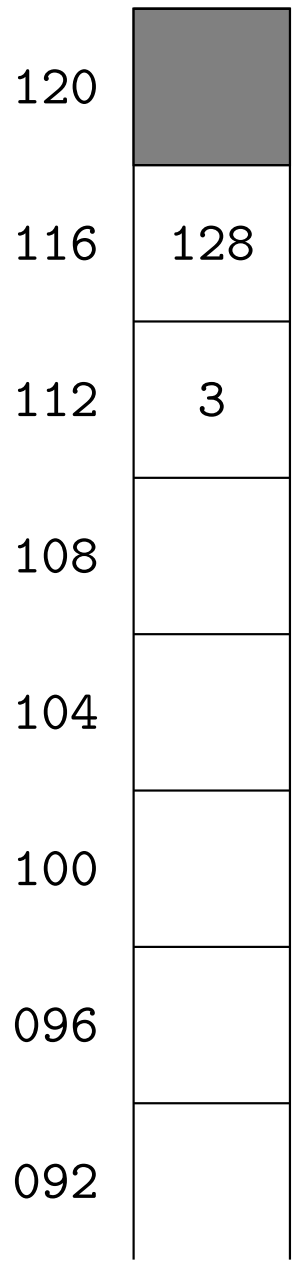
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

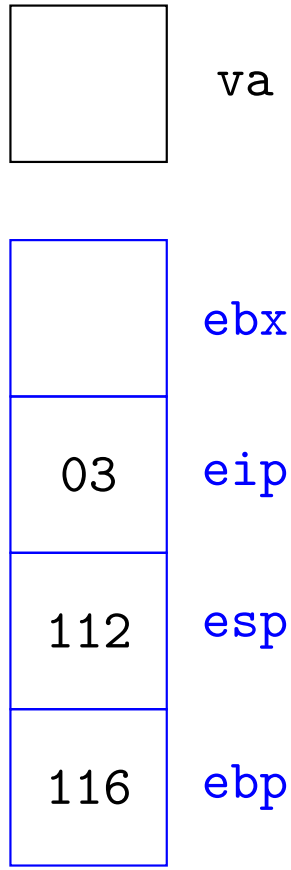




Exemple d'appel de fonction

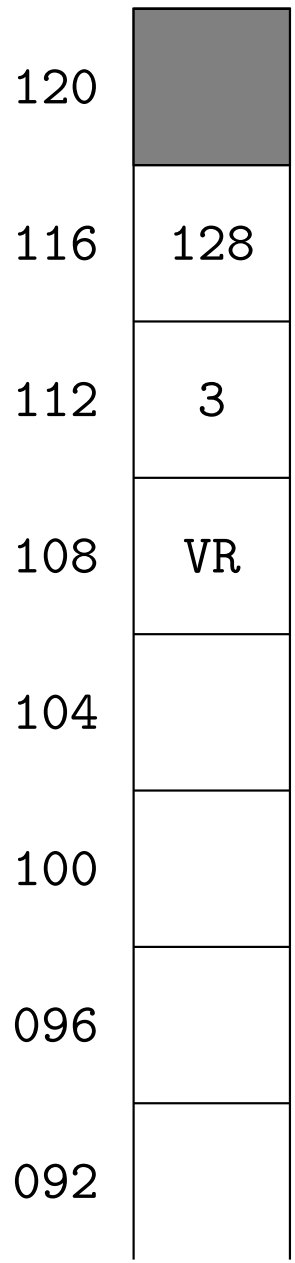
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

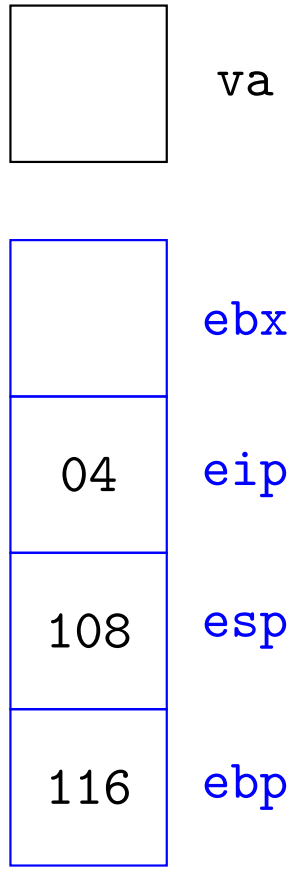




Exemple d'appel de fonction

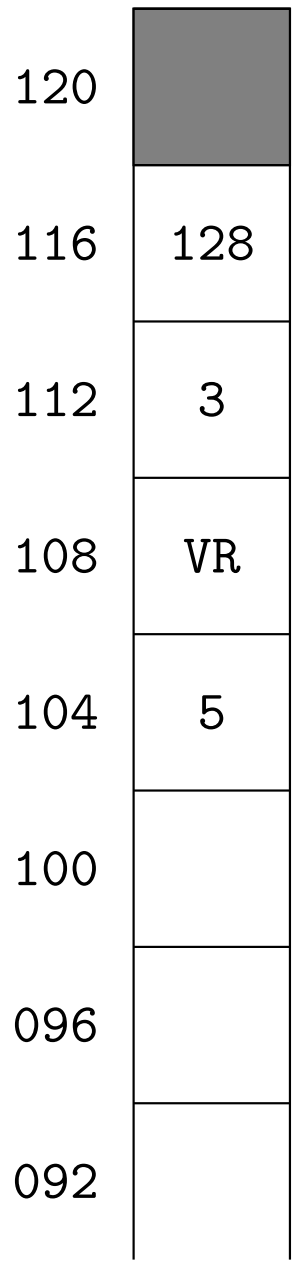
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

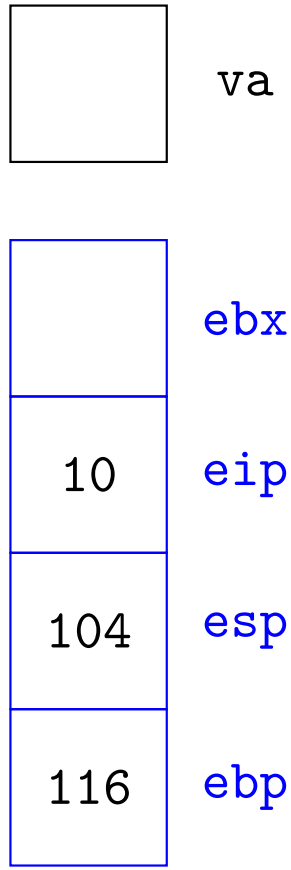




Exemple d'appel de fonction

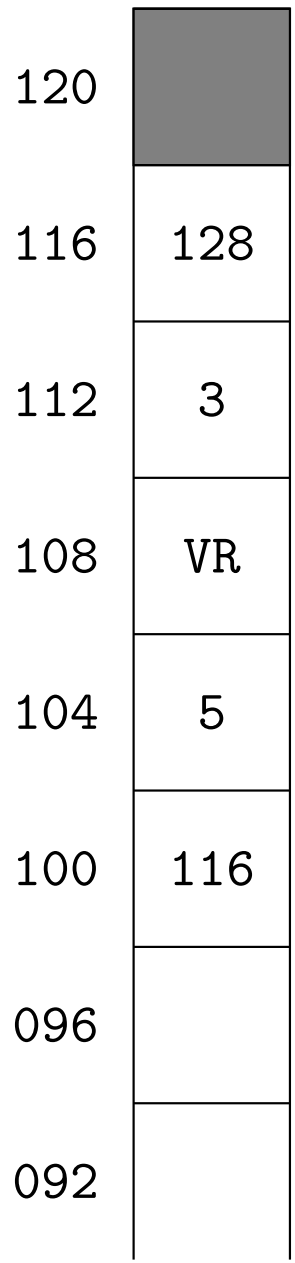
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

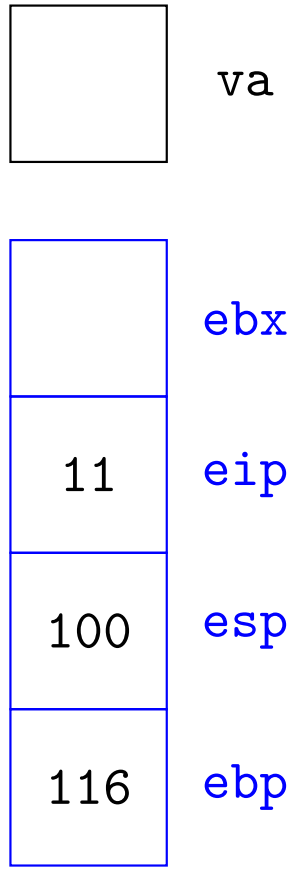




Exemple d'appel de fonction

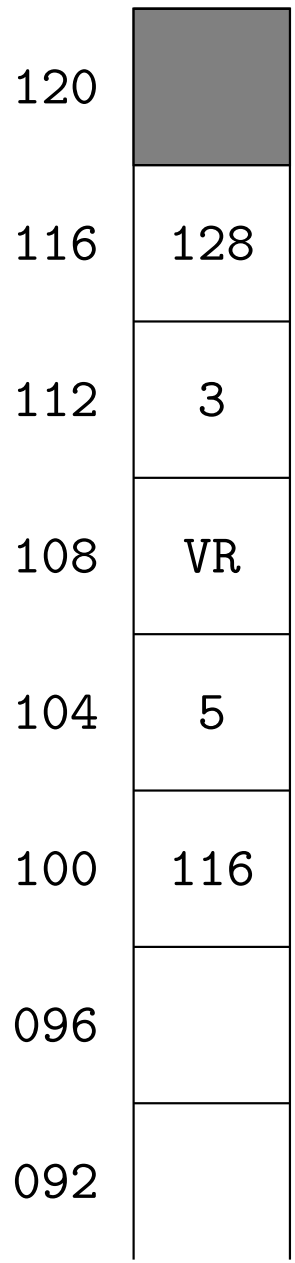
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

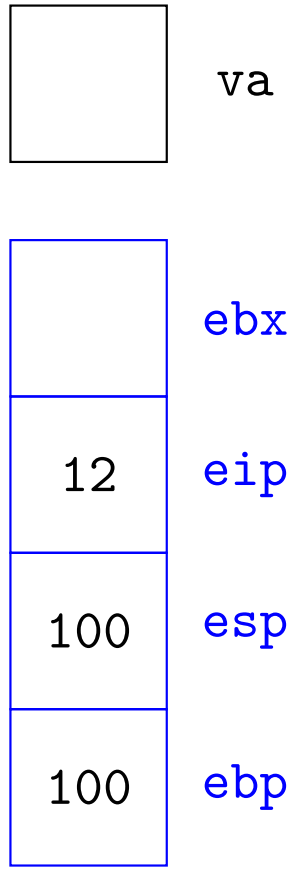




Exemple d'appel de fonction

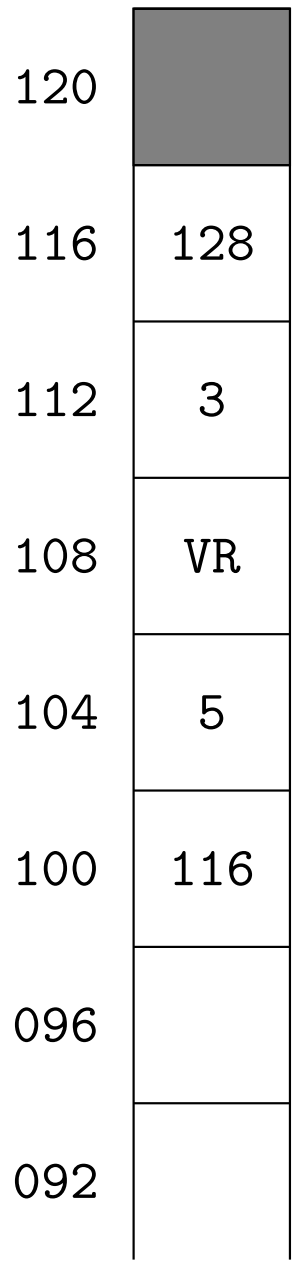
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

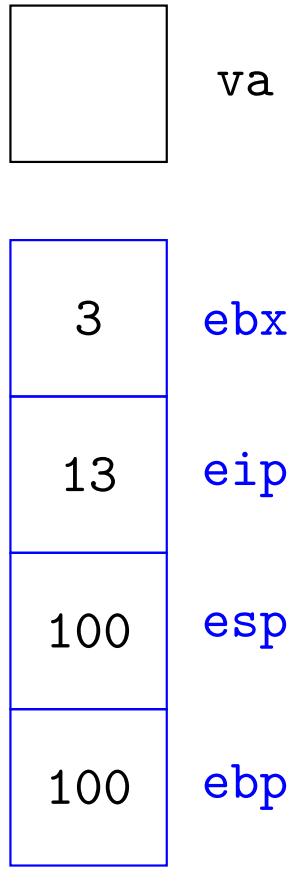




Exemple d'appel de fonction

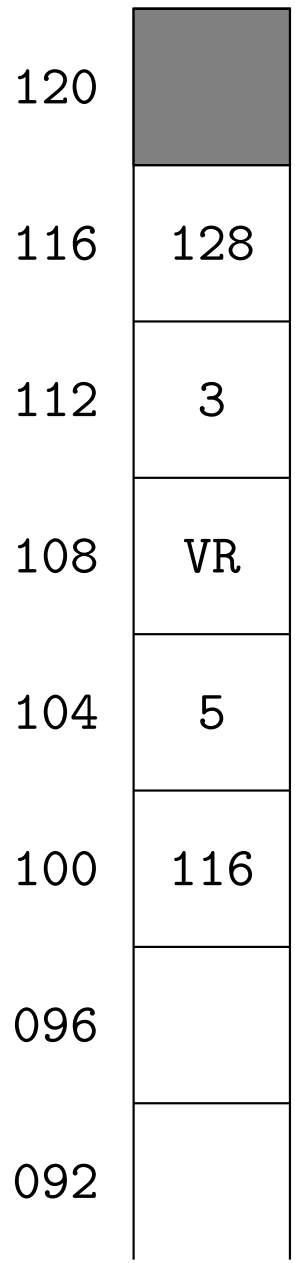
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

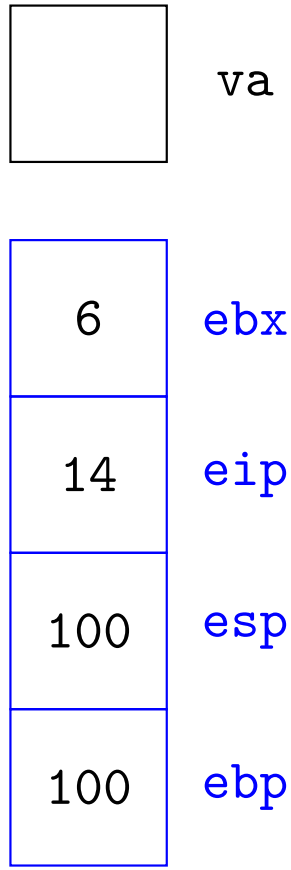




Exemple d'appel de fonction

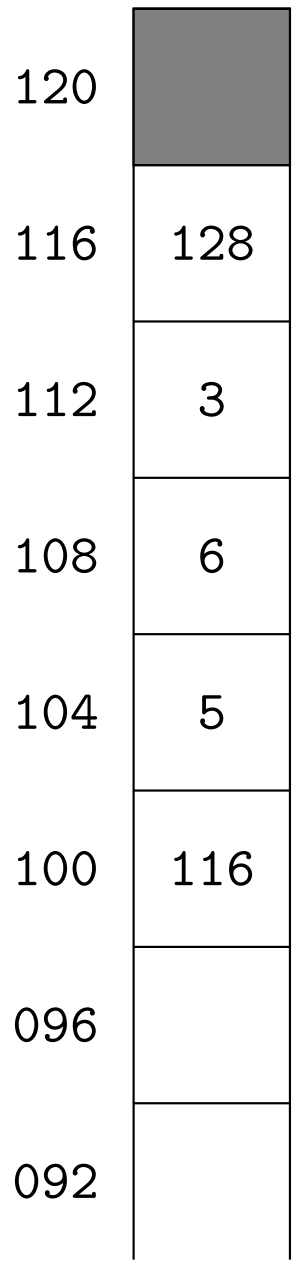
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

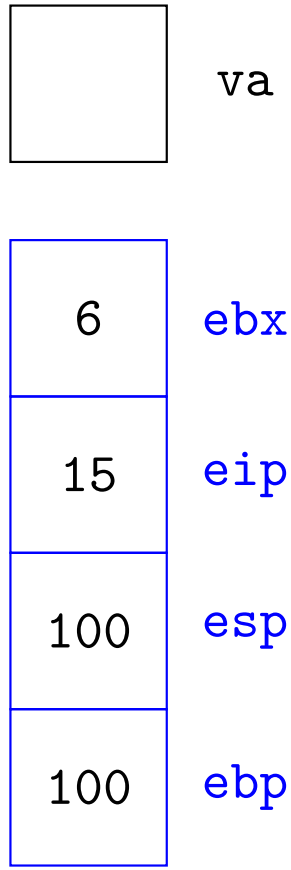




Exemple d'appel de fonction

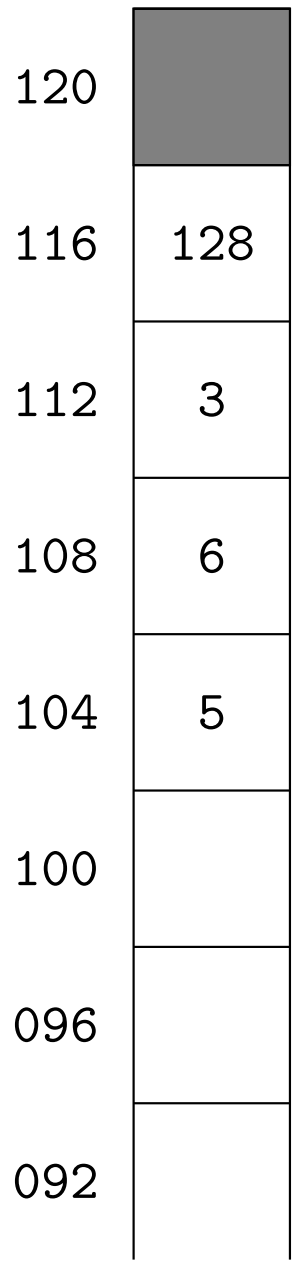
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

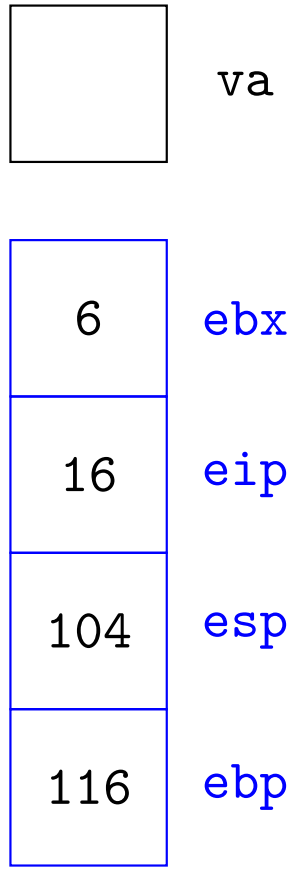




Exemple d'appel de fonction

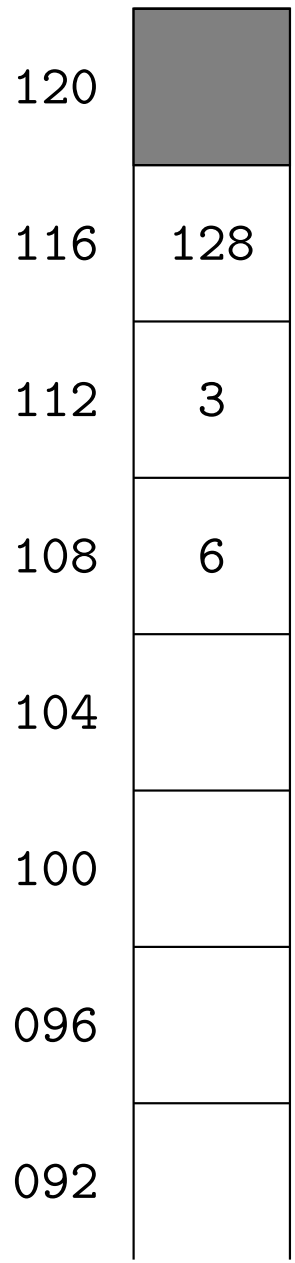
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

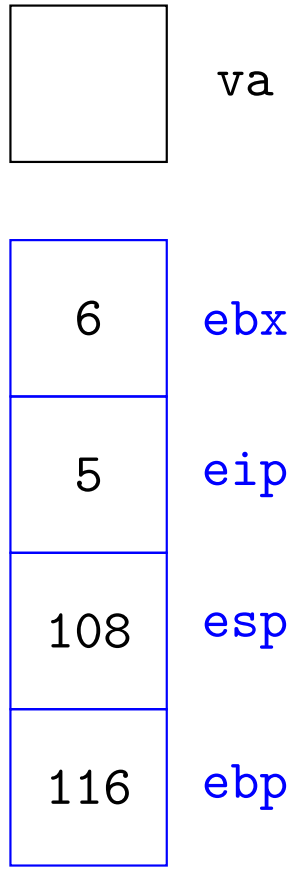




Exemple d'appel de fonction

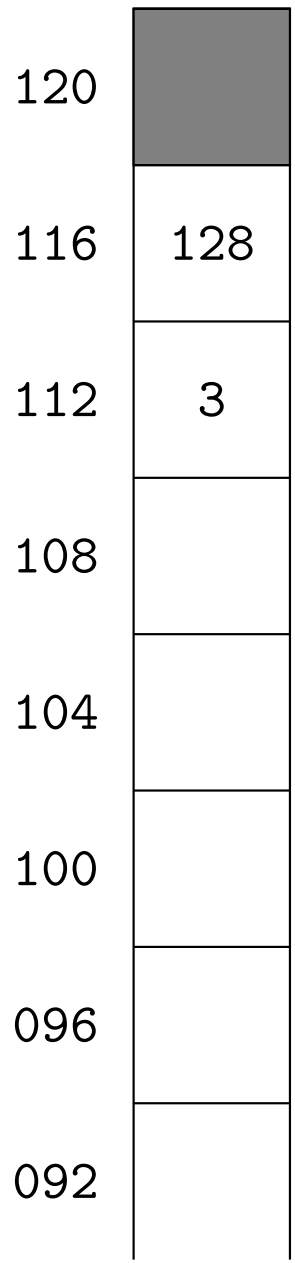
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

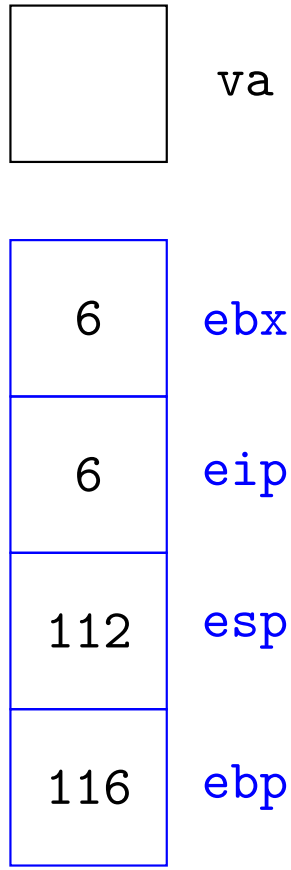




Exemple d'appel de fonction

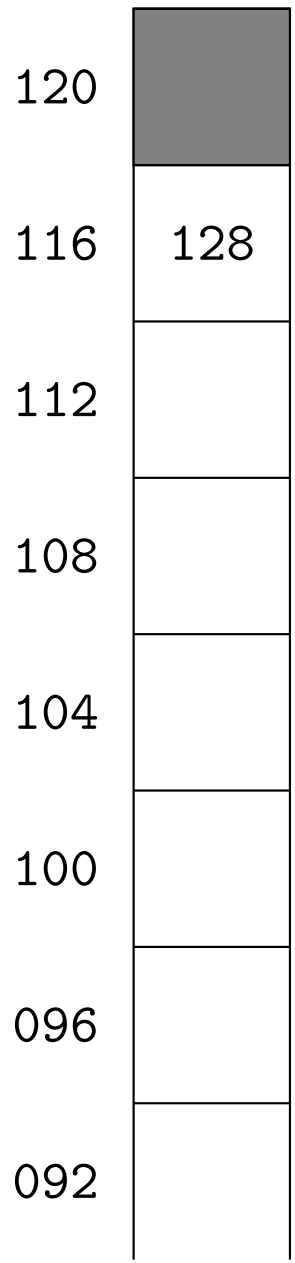
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

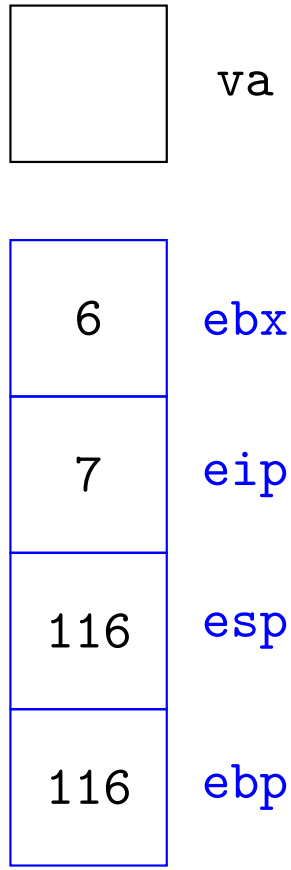




Exemple d'appel de fonction

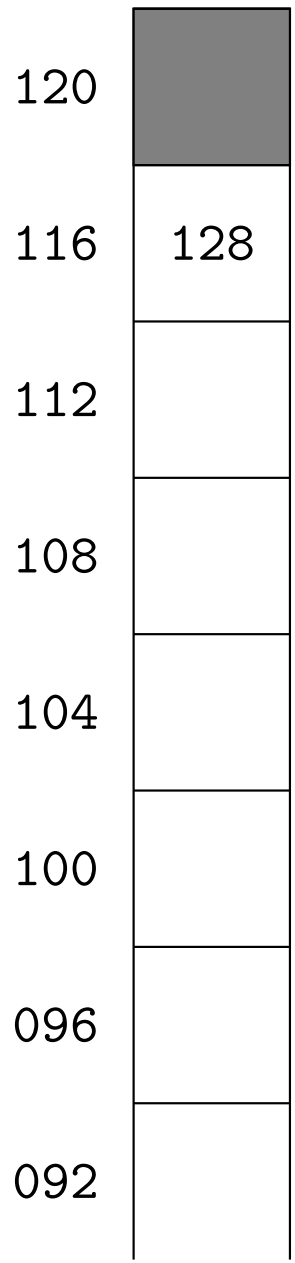
```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```

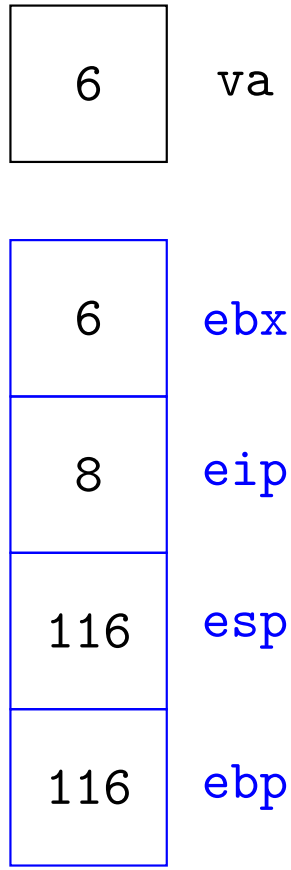




Exemple d'appel de fonction

```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```





Exemple d'appel de fonction

```
00 fmain: push ebp
01        mov  ebp, esp
02        push 3
03        sub  esp, 4
04        call fdouble
05        add  esp, 4
06        pop  ebx
07        mov  dword[va], ebx
08        pop  ebp
09        ret
10 fdouble: push ebp
11        mov  ebp, esp
12        mov  ebx, dword[ebp + 12]
13        add  ebx, dword[ebp + 12]
14        mov  [ebp + 8], ebx
15        pop  ebp
16        ret
17        pop  ebp
18        ret
```