

Système La mémoire

Gilles Roussel
Gilles.Roussel@univ-mlv.fr
<http://igm.univ-mlv.fr/ens/Licence/L2/2012-2013/System/>

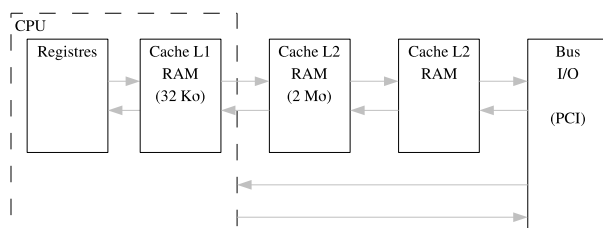
Licence 2

2 avril 2015

Qu'est-ce que l'on appelle la mémoire (vive) ?

- *Random Access Memory* (RAM)
- Ensemble de transistors utilisés comme des condensateurs : capacité résiduelle utilisée pour stocker l'information
- Besoin de rafraîchir la mémoire régulièrement (latence)
- Débit moyen (en 2008) 1000 Mo/s contre :
 - 200 Mo/s pour une interface de disque dur (sans compter la latence)
 - 5000 Mo/s pour le cache de niveau 2
 - 10000 Mo/s pour le cache de niveau 1 et les registres

La hiérarchie mémoire



La hiérarchie mémoire

matrix.c et matrix2.c

```
/* matrix.c */
#include <stdlib.h>
#define SIZE 1024
int main(int argc, char * argv[]) {
    int i,j, matrix[SIZE][SIZE];
    for (i=0;i<SIZE;i++) {
        for (j=0;j<SIZE;j++) {
            matrix[i][j] = i*j;
        }
    }
    exit(EXIT_SUCCESS);
}

/* matrix2.c */
#include <stdlib.h>
#define SIZE 1024
int main(int argc, char * argv[]) {
    int i,j, matrix[SIZE][SIZE];
    for (i=0;i<SIZE;i++) {
        for (j=0;j<SIZE;j++) {
            matrix[j][i] = i*j;
        }
    }
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

La hiérarchie mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

```
# time ./matrix
real    0m0.062s
user    0m0.022s
sys      0m0.009s
# time ./matrix2
real    0m0.181s
user    0m0.134s
sys      0m0.010s

# valgrind --tool=cachegrind ./matrix
==9841== Cachegrind, an I1/D1/L2 cache profiler for x86-linux.
...
==9841== D   refs:      7,397,217 (6,332,576 rd + 1,064,641 wr)
==9841== D1  misses:    66,650 (   884 rd + 65,766 wr)
==9841== L2d misses:   65,781 (   150 rd + 65,631 wr)
==9841== D1  miss rate:  0.9% (   0.0% + 6.1% )
==9841== L2d miss rate: 0.8% (   0.0% + 6.1% )
...

# valgrind --tool=cachegrind ./matrix2
==9841== Cachegrind, an I1/D1/L2 cache profiler for x86-linux.
...
==9870== D   refs:      7,397,215 (6,332,574 rd + 1,064,641 wr)
==9870== D1  misses:   1,049,690 (   884 rd + 1,048,806 wr)
==9870== L2d misses:    65,781 (   150 rd + 65,631 wr)
==9870== D1  miss rate: 14.1% (   0.0% + 98.5% )
==9870== L2d miss rate:  0.8% (   0.0% + 6.1% )
...
```

Gilles Roussel

Système

Accès à la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Processus n'accède pas directement à la mémoire physique
- Notion de mémoire logique (virtuelle) : tout se passe comme si le processus avait « toute » la mémoire pour lui tout seul
- Taille de la mémoire virtuelle ne dépend pas de la taille de la mémoire physique, mais de la taille des pointeurs (32bits=4Go)
- Association entre adresse mémoire logique et adresse mémoire « physique » réalisée par matériel *Memory Management Unit* (MMU) configuré par le système
- Association par page (4k sur les PC `getpagesize()`)
- Permet au système de modifier le contenu de la mémoire physique de façon transparente pour les processus

Gilles Roussel

Système

Organisation de la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

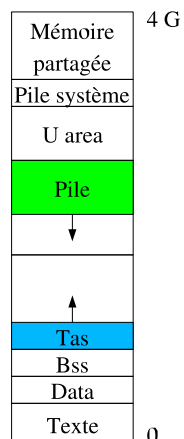
Organisation

Texte

Pile

Tas

- Espace adressable 4G pour processeur 32bits
- Texte : code du programme
- Data : variables globales initialisées
- Bss : variables globales non initialisées
- Tas : réservation mémoire avec malloc
- Pile : variables locales (automatique)
- U-area : informations processus (fichiers ouverts, répertoire de travail, etc.)
- Pile système : utilisée par appels systèmes
- Mémoire partagée



Gilles Roussel

Système

Organisation de la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

memory.c

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
char data = 'c';
char *bss;
int main(int argc, char * argv[]) {
    int pile;
    bss = (char*) malloc(sizeof(char));
    printf("texte\t%p\n",main);
    printf("data\t%p\n",&data);
    printf("bss\t%p\n",&bss);
    printf("tas\t%p\n",&bss);
    printf("pile\t%p\n",&pile);
    for(;;);
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

Gilles Roussel

Système

Organisation de la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

```
# memory
texte 0x80481e8
data 0x80a506c
bss 0x80a6e08
tas 0x849a2e8
pile 0xbffa4f94
# ps -C memory
PID TTY          TIME CMD
20756 pts/1      00:00:10 memory
# cat /proc/20756/maps
08048000-080a5000 r-xp 00000000 03:09 34206 memory texte
080a5000-080a6000 rw-p 0005d000 03:09 34206 memory data
080a6000-080a7000 rw-p 080a6000 00:00 0 bss
0849a000-084bb000 rw-p 0849a000 00:00 0 tas
b7f0d000-b7f0e000 rw-p b7f0d000 00:00 0 ??
bffa4000-c0000000 rw-p bffa4000 00:00 0 pile
ffffe000-ffffff00 ---p 00000000 00:00 0 ??
```

Gilles Roussel

Système

Organisation de la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

Mécanisme de mémoire virtuelle permet que :

- certaines pages de la mémoire soient en lecture seule, exécution, etc. : mécanisme au niveau matériel
 - violation récupérée par le système et signalée au programme : erreur de segmentation (SIGSEGV)
- certaines pages soient inexistantes
- le texte soit partagé entre plusieurs processus
- certaines pages de la mémoire soient placées temporairement sur le disque : partition d'échange (*swap*) ou code

Gilles Roussel

Système

Utilisation de la mémoire

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- **top** donne une idée de l'utilisation de la mémoire

```
top - 21:17:22 up 27 min, 2 users, load average: 0.00, 0.04, 0.12
Tasks: 98 total, 1 running, 97 sleeping, 0 stopped, 0 zombie
Cpu(s): 7.0% us, 1.7% sy, 0.0% ni, 91.1% id, 0.0% wa, 0.3% hi, 0.0% si
Mem: 636116k total, 535476k used, 100640k free, 23288k buffers
Swap: 1028120k total, 0k used, 1028120k free, 310828k cached

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR S %CPU %MEM    TIME+  COMMAND
 6549 roussel  15   0 117m  56m  33m S  0.7  9.1   0:13.29 acroread
 5753 root      15   0 178m  30m  7376 S  2.7  4.9   0:27.28 X
 6533 roussel  16   0 103m  28m  16m S  0.0  4.5   0:06.20 firefox-bin
...
```

Gilles Roussel

Système

Alignement et promotion entière

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Les entiers du C sont codés sur un mot machine
- Le processeur manipule uniquement des mots
- Certains processeurs peuvent accéder uniquement à un mot en mémoire s'il est aligné, c'est-à-dire si son adresse est égale à un multiple de la taille d'un mot (Bus error)
- Les char et les short sont « promus » en entiers avant d'être manipulés par le processeur, leur adresse en mémoire n'est pas importante
- Les structures alignent par défaut les entiers (sans option **-fpack-struct** de gcc)

Gilles Roussel

Système

Alignement et promotion entière

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

alignment.c

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <sys/times.h>
#define PAGE_SIZE 1024

typedef struct {
    char a;
    char c;
    int b;
} aligned;

typedef struct {
    char a;
    char c;
    int b;
} __attribute__((packed)) packed;

int main(int argc, char * argv[]) {
    printf("aligned %ld\n", sizeof(aligned));
    printf("packed %ld\n", sizeof(packed));
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

```
# ./alignment
aligned 8
```

Gilles Roussel

Système

Texte, data, bss

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Texte : fichier directement accessible en mémoire ; chargé à la demande
- Zones mémoires déterminées au moment la compilation

```
# readelf -e memory
```

En-têtes de section:

[Nr]	Nom	Type	Adr	Décala.	Taille	ES	Fan	LN	Inf	Al
[2]	.text	PROGBITS	08048100	000100	0476e0	00	AX	0	0	32
...										
[15]	.data	PROGBITS	080a5060	05d060	000cd4	00	WA	0	0	32
[16]	.bss	NOBITS	080a5d40	05dd34	001284	00	WA	0	0	32
...										

Gilles Roussel

Système

Pile

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Allouée au cours de l'exécution du programme à chaque appel de fonction
- Désallouée lors du retour de la fonction

pile.c

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
void f(int i) {
    printf("%p ", &i);
    if (i<3) { f(i+1); }
}
int main(int argc, char * argv[]) {
    f(0);
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

```
# pile
```

```
0xbfe0e904 0xbfe0e8e4 0xbfe0e8c4 0xbfe0e8a4
```

Gilles Roussel

Système

Tas

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Géré par l'utilisateur
- Deux interfaces :
 - bas niveau appel système et libc : `brk()` et `sbrk()`
 - haut niveau définie dans la libc : `malloc()`, `calloc()`, `realloc()` et `free()`

Gilles Roussel

Système

Interface de bas niveau

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- **brk()** prend en argument l'adresse du haut du tas et retourne 0 ou -1 en cas d'erreur (pas utilisable sans connaissance supplémentaire)
- **sbrk()** prend en argument un nombre d'octets à ajouter au tas. Elle retourne l'adresse de début de nouvelle zone réservée ou (void*)-1 en cas d'erreur
- **sbrk(0)** retourne l'adresse du haut du tas courant

Gilles Roussel

Système

Un malloc() simpliste

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

allocateur.c

```
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>

void *malloc(size_t size) {
    // Pour l'alignement
    int alloc_size = ((size-1)/sizeof(int)+1)*sizeof(int);
    int *ptr = sbrk(alloc_size);
    printf("malloc\n");
    if ((int*)-1 == ptr) {
        return NULL;
    }
    // Pour se souvenir de la taille allouée
    *ptr=alloc_size;
    return ptr+1;
}
```

Gilles Roussel

Système

Parenthèse : < memset(), memcpy() et memmove() >

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Déclarées dans **string.h**
- **void *memset(void *s, int c, size_t n)**
copie la valeur de l'octet de poids faible de **c** dans les **n** premiers octets du tableau d'octets pointé par **s** et retourne **s**
- **void *memcpy(void *dest, const void *src, size_t n)**
copie les **n** premiers octets de **src** dans **dest** et retourne **dest**. Ne marche pas si **src** et **dest** se recouvrent
- **void *memmove(void *dest, const void *src, size_t n)**
même sémantique que **memcpy()**, moins efficace mais marche si **src** et **dest** se recouvrent

Gilles Roussel

Système

Interface haut niveau

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- **void *malloc(size_t size)** retourne pointeur sur multiple de 8 (libc) ou NULL en cas d'erreur
- **void *calloc(size_t nmemb, size_t size)** même chose que **malloc()** sauf que le contenu est mis à 0 ; équivalent(?) à **malloc()** suivi de **memset()**
- **void free(void *ptr)** libère mémoire allouée avec **malloc()**, **calloc()** ou **realloc()**
- **void *realloc(void *ptr, size_t size)**
 - si ancien pointeur NULL même chose que **malloc()**
 - si nouvelle taille est 0 même chose que **free()**
 - si nouvelle taille inférieure à l'ancienne : libération mémoire ($\neq$ **free()**)
 - si erreur ptr encore valide
 - sinon alloue **size** octets, copie le contenu de **ptr** ($<$ **size**) et désalloue **ptr** (**free()**)

Gilles Roussel

Système

Exemple d'allocation

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

```
p1 = malloc(5*sizeof(int))
```



```
p2 = malloc(4*sizeof(int))
```



```
p3 = malloc(6*sizeof(int))
```



```
free(p2)
```



```
p4 = malloc(sizeof(int))
```



```
free(p1)
```



Gilles Roussel

Système

Comment connaître la taille des allocations ?

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

```
p1 = malloc(5*sizeof(int))
```



```
p2 = malloc(4*sizeof(int))
```



```
p3 = malloc(6*sizeof(int))
```



```
free(p2)
```



```
p4 = malloc(sizeof(int))
```



```
free(p1)
```



Gilles Roussel

Système

Comment trouver un bloc libre ?

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

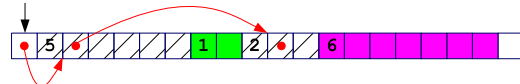
Tas

- Liste implicite : utiliser le bit de poids fort de la taille du bloc pour marquer les blocs libres et parcourir tous les blocs pour trouver un bloc libre de la bonne taille, recherche en temps linéaire ($O(N)$) en la *taille du tas*



- Liste explicite : utiliser les blocs libres pour construire une liste des blocs libres, recherche en temps linéaire ($O(n)$) en la *taille de la liste des blocs libres*

Liste des blocs libres



Gilles Roussel

Système

Comment gérer la liste des blocs libres ?

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Texte

Pile

Tas

- Insertion des blocs libérés en tête (LIFO):
 - insertion en temps constant $O(1)$
 - recherche d'un bloc libre d'une certaine taille en temps linéaire $O(n)$ en la taille de la liste
 - augmente la fragmentation
- Insertion des blocs libérés dans l'ordre des adresses :
 - insertion et recherche en temps linéaire $O(n)$ en la taille de la liste
 - facilite la défragmentation
- Une listes de blocs libres par taille :
 - mêmes complexités dans le pire des cas que LIFO
 - meilleur en moyenne
- De nombreuses autres stratégies existent

Gilles Roussel

Système

Chercher les 5 erreurs

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Tests

File

Tas

```
erreurs.c
1 #include <stdlib.h>
2 #include <stdio.h>
3 #include <string.h>
4 #define TEST_STR "test"
5 int main(){
6     char *ptr1, *ptr2;
7     ptr1 = malloc(strlen(TEST_STR));
8     ptr2 = malloc(strlen(TEST_STR));
9     if (NULL == ptr1 || NULL == ptr2){
10         perror("malloc");
11         exit(EXIT_FAILURE);
12     }
13     strcpy(ptr1,TEST_STR);
14     printf("%s\n",ptr2);
15     strcpy(ptr2,ptr1);
16     printf("%s\n",ptr2);
17     free(ptr2);
18     exit(EXIT_SUCCESS);
19 }
```

Gilles Roussel

Système

Trouver les 5 erreurs

Système

Gilles Roussel

Mémoire

Organisation

Tests

File

Tas

```
# valgrind --tool=memcheck ./erreurs
==11490== Memcheck, a memory error detector for x86-linux.
...
==11490== Invalid write of size 1
==11490== at 0x1B905440: strcpy (mac_replace_strmem.c:199)
==11490== by 0x80484E1: main (erreurs.c:15)
...
==11490== Conditional jump or move depends on uninitialised value(s)
==11490== at 0xC35D09: strlen (in /lib/tls/libc-2.3.5.so)
==11490== by 0x80484F4: main (erreurs.c:16)
...
==11490== Invalid read of size 1
==11490== at 0x1B905438: strcpy (mac_replace_strmem.c:198)
==11490== by 0x8048505: main (erreurs.c:17)
...
==11490== Invalid write of size 1
==11490== at 0x1B905440: strcpy (mac_replace_strmem.c:199)
==11490== by 0x8048505: main (erreurs.c:17)
...
==11490== Invalid read of size 4
==11490== at 0xC35CB9: strlen (in /lib/tls/libc-2.3.5.so)
==11490== by 0x8048518: main (erreurs.c:18)
...
==11490== ERROR SUMMARY: 5 errors from 5 contexts (suppressed: 12 from 1)
==11490== malloc/free: in use at exit: 4 bytes in 1 blocks.
==11490== malloc/free: 2 allocs, 1 frees, 8 bytes allocated.
...
```

Gilles Roussel

Système