Exécution d'une application simple

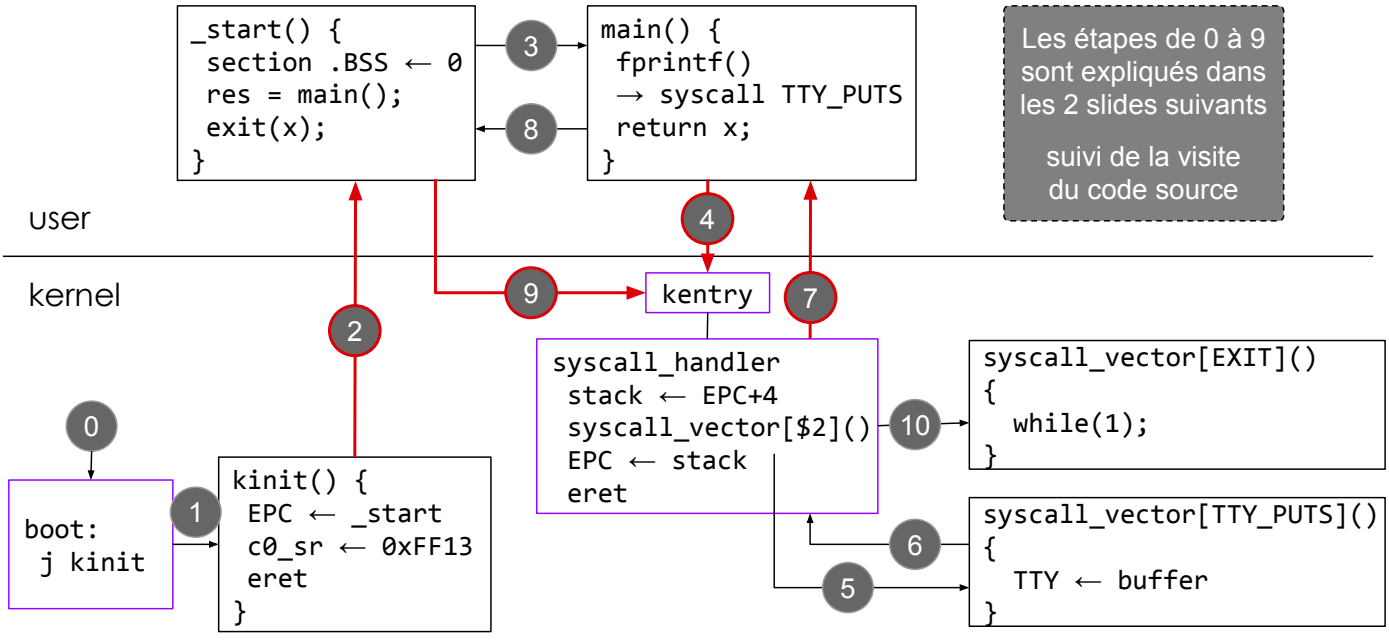
Visite guidée commentée

```c
#include <libc.h>
int main (void) {
    fprintf (0, "[%d] app is alive\n", clock());
    return 0;
}
```

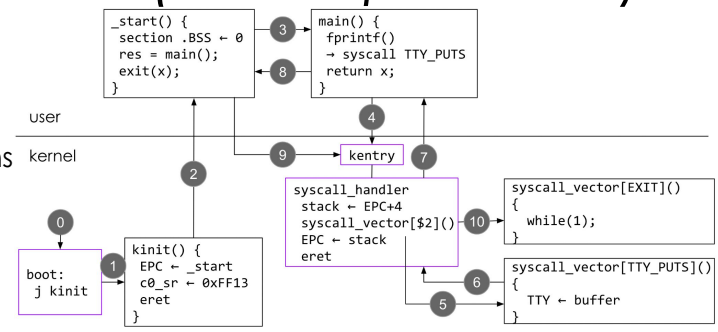
franck.wajsburt@lip6.fr

27 nov 2023

Un parcours de boot à exit *(en 10 étapes)*

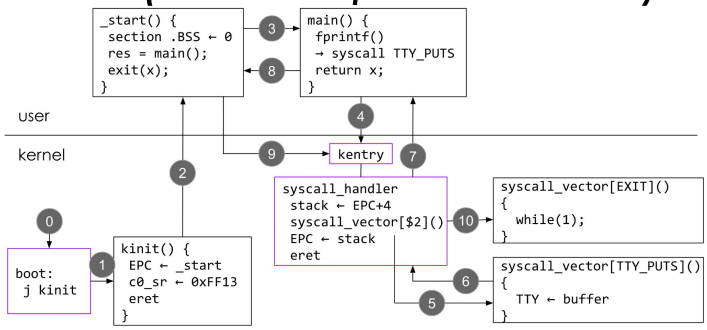


Un parcours de boot à exit *(les étapes 0 à 4)*



0. Après l'activation du signal reset, le MIPS saute à l'adresse de boot **`0xBFC00000`**, le MIPS est en mode kernel, les interruptions sont masquées (le bit **`c0_sr.ERL`** est à 1).
1. Le code de boot se contente d'initialiser le pointeur de pile en haut de la section **`.kdata`** puis il appelle la fonction **`kinit()`**
2. Démarrage de l'application avec la fonction **`_start()`**, cette fonction prépare la mémoire utilisateur en initialisant les variables globales non initialisées par le programme lui-même (elles sont dans la section **`.BSS`**).
3. Appel de la fonction **`main()`**, c'est la fonction principale de l'application (elle devrait recevoir des arguments de la ligne de commande, ici il n'y en a pas). La fonction **`main()`** peut demander l'arrêt de l'application par l'appel à la fonction **`exit()`** ou juste sortir par **`return x`**, et laisser **`_start()`** faire l'appel à **`exit()`**
4. L'exécution de **`fprintf()`** définie dans la libc provoque l'exécution d'une instruction **`syscall`** qui déroute l'exécution de l'application vers l'adresse **`kentry`**, le point d'entrée unique du noyau (hormis **`kinit()`**).

Un parcours de boot à exit *(les étapes 5 à 10)*



5. **`kentry`** a décodé le registre de cause et fait appel au gestionnaire de **`syscall`** (**`syscall_handler`**) qui sauvegarde dans la pile les valeurs de registres lui permettant de revenir de l'appel système (dont **`EPC+4`**) et elle appelle la fonction présente dans la table **`syscall_vector[]`** à la case du n° de service
6. La fonction **`syscall_vector[SYSCALL_TTY_PUTS]()`** envoie les octets du buffer dans le registre **`WRITE`** du TTY
7. Au retour de la fonction précédente, on revient dans le gestionnaire de **`syscall`** qui rétablit la valeur des registres sauvegardés dans la pile et qui prépare le registre EPC pour l'exécution de l'instruction **`eret`** qui revient dans la fonction **`main()`**
8. L'exécution de return permet de sortir de la fonction **`main()`** pour revenir dans la fonction **`_start()`**. L'application est terminée, il faut appeler **`exit()`**
9. La fonction **`exit()`** exécute l'instruction **`syscall`** qui saute dans **`kentry`** comme à l'étape 4.
10. Comme à l'étape 6, le gestionnaire de **`syscall`** appelle cette fois la fonction **`syscall_vector[SYSCALL_EXIT]()`** qui, ici, se contente d'arrêter l'exécution.

Ensemble des fichiers de cette étape

```
4_libc/
├── Makefile          produit tout par appel récursif
├── kernel
│   ├── harch.h       API de l'archi du SoC donc les drivers
│   ├── harch.c       code des drivers (seulement TTY)
│   ├── hcpu.h        API propre au cpu
│   ├── hcpua.S       boot + kentry + gestionnaires + fct
│   ├── hcpuc.c       fonction en c du CPU comme kdump()
│   ├── kernel.ld           ldscript du kernel
│   ├── kinit.c       fonction d'initialisation du kernel
│   ├── klibc.h       API de le klibc
│   ├── klibc.c       implémentation de klibc
│   ├── ksyscalls.c   syscall_vector[] + qqs syscall
│   └── Makefile      produit le binaire kernel.x
├── common
│   └── syscalls.h    n°services communs K et U
├── ulib
│   ├── crt0.c        fct _start() et syscall
│   ├── libc.h        API de la libc user
│   ├── libc.c        fonctions de la libc user
│   ├── user.ld       ldscript de l'application user
│   └── Makefile      produit les fichiers libc.o, crt0.o
└── uapp
    ├── main.c        code de l'application
    └── Makefile      produit le binaire user.x
```

kernel.x

user.x

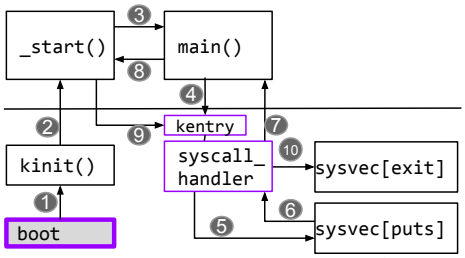
Un but :

réduire le nombre de fichiers en mettant toutes les fonctions d'un même module dans un même fichier

main.c

```c
#include <libc.h>

int main (void)
{
    fprintf (0, "[%d] app is alive\n",
             clock());
    return 0;
}
```

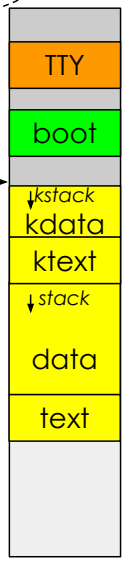

kernel/hcpua.S/boot



La section .boot sera placé par l'éditeur de lien dans le segment d'adresse boot **0xBFC00000**

Il faudrait écrire :
`syscall_vector[SYSCALL_TTY_PUTS]()`

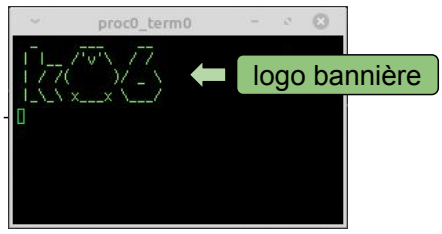
```
.section .boot,"ax"

// def. of a new section: .boot (see https://bit.ly/3gzKWob)
// flags "ax":     a -> allocated means section put in memory
//                 x -> section contains instructions

boot:                                                          $29

    la      $29,    __kdata_end   // define stack pointer (first address after kdata region)
    la      $26,    kinit         // get address of kinit() function
    jr      $26                   // goto kinit()
```

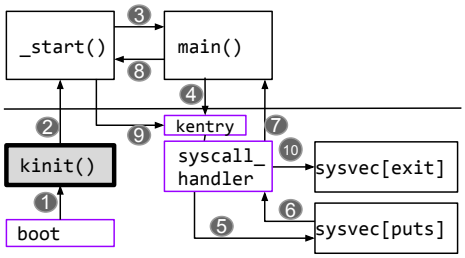


Au boot, ici, on se contente d'initialiser le pointeur de pile dans .kdata, puis d'entrer dans le noyau parce qu'il est déjà dans la mémoire (quelque part dans le segment d'adresse `.ktext`).

Dans un vrai système, le boot doit aller chercher le chargeur de système d'exploitation.
Ce chargeur se trouve souvent au tout début du disque dur, puis ce chargeur de système d'exploitation doit aller chercher le système d'exploitation sur le disque, puis doit l'écrire dans la mémoire et y entrer.

kernel/kinit.c/kinit()





mise à 0 des variables globales du **kernel**

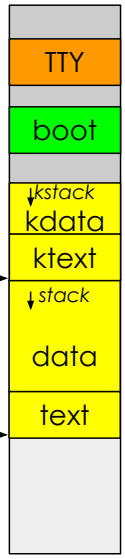
```
#include <klibc.h>

static char banner[] =  // banner's text defined on several lines
"  _       ___      __ \n"
"  | |__ /'v'\  / / \n"
"  | / /(     )/ _ \\n"
"  |_\_\ x___x \___/\n\n";

void kinit (void)
{
    kprintf (0, banner);
```

Démarre l'application qui, ici, est déjà en mémoire ! *En vrai, il faudrait la lire sur le disque*

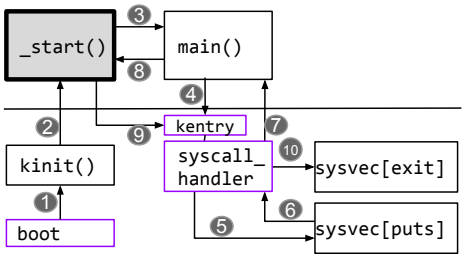
```
.globl app_load
app_load:
    mtc0    $4,     $14     // void app_load (void * fun)
    li      $26,    0x12    // go to user code
    mtc0    $26,    $12     // put _start address in c0_EPC
    la      $29,    __data_end // define next status reg. value
    eret                    // UM <- 1, IE <- 0, EXL <- 1
                            // define new user stack pointer
```

change le pointeur de pile en haut de `.data`

```
    // put bss sections to zero. bss contains uninitialised global variables
    extern int __bss_origin;    // first int of bss section (defined in ldscript kernel.ld)
    extern int __bss_end;       // first int of above bss section (defined in ldscript kernel.ld)
    for (int *a = &__bss_origin; a != &__bss_end; *a++ = 0);

    extern int _start;          // _start is the entry point of the app (defined in kernel.ld)
    app_load (&_start);         // function to start the user app (defined in hcpua.S)
}
```



ulib/crt0.c/_start()




```
#include <libc.h>

extern int main (void);         // tell the compiler that main() exists

//int syscall_fct (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
__asm__ (".globl syscall_fct \n"    // it is an external function, it must be declared globl
         "syscall_fct:       \n"    // syscall_fct function label
         "   lw  $2,16($29)  \n"    // since syscall_fct has 5 parameters, the fifth is in the stack
         "   syscall         \n"    // EPC <- address of syscall, j 0x80000180, c0_sr.EXL <- 1, c0_cause.X
         "   jr  $31         \n");  // $31 must not have changed
```

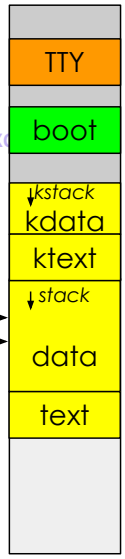
`_start()` est la fonction de démarrage de l'application, cette fonction n'est pas écrite par le programmeur et le noyau doit connaître son adresse pour y sauter !

```
__attribute__ ((section (".start")))
void _start (void)
{
    int res;
```

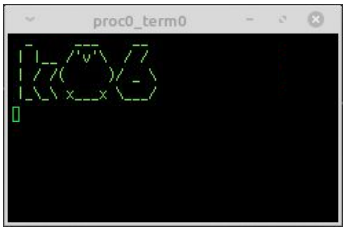
mise à 0 des variables globales non initialisées de **l'application**

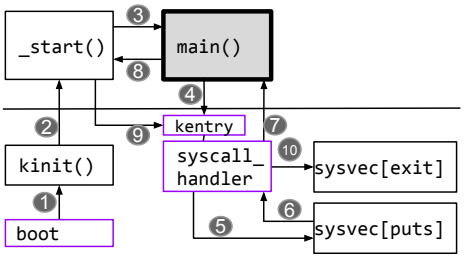
```
    extern int __bss_origin;        // first int of uninitialized global data
    extern int __bss_end;           // first int of above the uninitialized global data
    for (int *a = &__bss_origin; a != &__bss_end; *a++ = 0);

    res = main ();
    exit (res);
}
```

fonction principale de l'application écrite par le programmeur.
Ici, elle n'a aucun argument, en vrai elle aurait les arguments du shell



uapp/main.c/main()

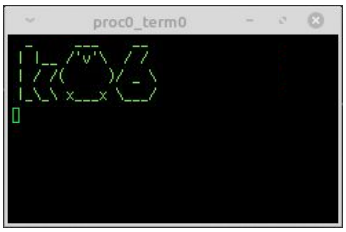


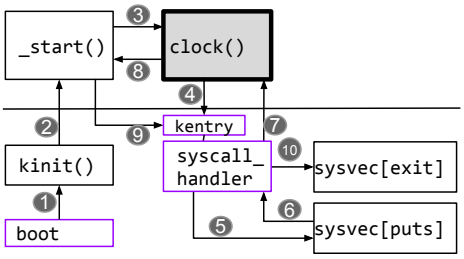



```c
#include <libc.h>

int main (void)
{
    fprintf (0, "[%d] app is alive\n", clock());
    return 0;
}
```

Ici, on veut juste afficher un message avec la date (en cycles).
Ce sera quand même 2 appels système : `clock()` et `fprintf()`
Le code de ces fonctions est dans la libc, d'où l'include au début

ulib/libc.c/clock()






```c
#include <syscalls.h>   // kernel services

unsigned clock (void)
{
    return syscall_fct (0, 0, 0, 0, SYSCALL_CLOCK);
}
```

Le but de la fonction `clock()` est de préparer les arguments et d'appeler la fonction `syscall_fct()` qui entre dans le noyau.

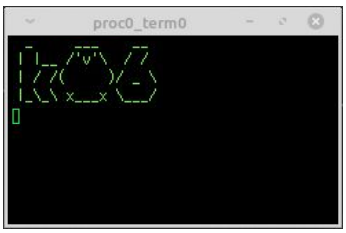
```
<clock>:
   27bdffe0    addiu   sp,sp,-32          # nr=1 nv=0 na=5 mais 32?
   afbf001c    sw      ra,28(sp)          # sauve ra = $31
   24020005    li      v0,5               # v0 = $2
   afa20010    sw      v0,16(sp)          # 5e arg dans la pile
   00003825    move    a3,zero            # a3 = $7
   00003025    move    a2,zero            # a2 = $6
   00002825    move    a1,zero            # a1 = $5
   00002025    move    a0,zero            # a0 = $4
   0fd00277    jal     7f4009dc <syscall_fct> # appel de la fct syscall
   8fbf001c    lw      ra,28(sp)          # restore $31
   27bd0020    addiu   sp,sp,32           # restore le pt de pile
   03e00008    jr      ra                 # sort
```

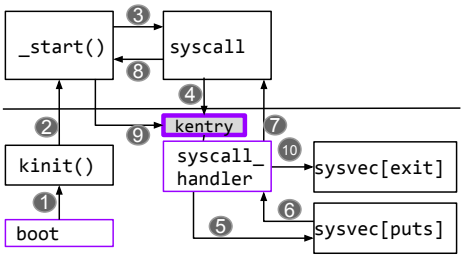
ici le code produit par gcc (un peu ré-ordonné pour la lisibilité et avec des commentaires)
la fonction `syscall_fct()` est forcément écrite en assembleur mais elle ne fait pas grand-chose

```
<syscall_fct>:
    8fa20010    lw  v0,16(sp)    # récupère $2 depuis la pile
    0000000c    syscall          # $4 à $7 inchangé -> syscall
    03e00008    jr  ra           # sort avec val de retour $2
```

kernel/hcpua.S/kentry

Entrée dans le noyau





Notez que le noyau peut utiliser les registres $26 et $27 sans les sauver avant car ces registres lui sont réservés. Ce sont des registres temporaires pour le noyau, gcc ne les utilise jamais, il ne contiennent rien pour l'application

```
kentry:                                 // kernel entry
    mfc0    $26,    $13                 // read CR (Cause Register)
    andi    $26,    $26,    0x3C        // apply cause mask (keep bits 2 to 5)
    li      $27,    0x20                // 0x20 is the syscall code
    bne     $26,    $27,    kpanic      // if not then that is not a syscall

syscall_handler:
    [...]
```

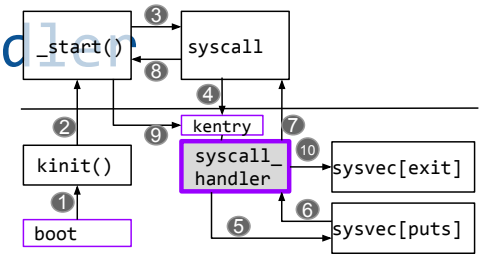
L'entrée dans le noyau, il faut analyser le champ XCODE du registre de cause `c0_cause` ($13 du coprocesseur 0) et, ici, si ce n'est pas le code de syscall, c'est la panique !

Le code du gestionnaire de syscall est juste après ...

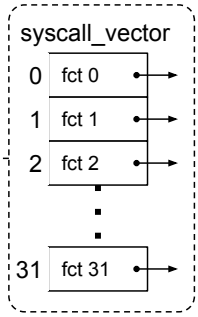
kernel/hcpua.S/syscall_handler

Gestionnaire de syscalls → début

- alloue de la place dans la pile pour $31, EPC, SR et les 5 arguments des services : $4 à $7 + $2 (n° du service)
- trouve l'adresse du service dans `syscall_vector[$2]`
- change le mode d'exécution du MIPS → `UM=0 IE=0`
- appelle le service avec un `jal syscall_vector[$2]`




```
syscall_handler:
    addiu   $29,    $29,    -8*4        // context for $31 + EPC + SR + syscall_code + 4 args
    mfc0    $27,    $14                 // $27 <- EPC (addr of syscall instruction)
    mfc0    $26,    $12                 // $26 <- SR (status register)
    addiu   $27,    $27,    4           // $27 <- EPC+4 (return address)
    sw      $31,    7*4($29)            // save $31 because it will be erased
    sw      $27,    6*4($29)            // save EPC+4 (return address of syscall)
    sw      $26,    5*4($29)            // save SR (status register)
    sw      $2,     4*4($29)            // save syscall code (useful for debug message)
    mtc0    $0,     $12                 // SR <- kernel-mode w/o INT (UM=0 ERL=0 EXL=0 IE=0)

    la      $26,    syscall_vector      // $26 <- table of syscall functions
    andi    $2,     $2,     SYSCALL_NR-1 // apply syscall mask
    sll     $2,     $2,     2           // compute syscall index (multiply by 4)
    addu    $2,     $26,    $2          // $2 <- & syscall_vector[$2]
    lw      $2,     ($2)                // $2 <- syscall_vector[$2]
    jalr    $2                          // call syscall function
```

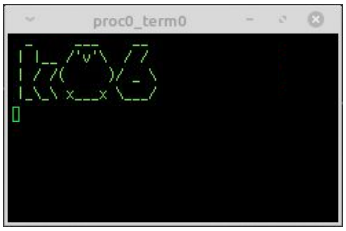


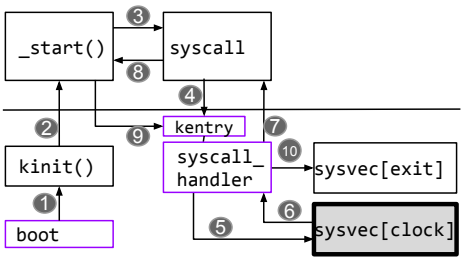

```
void *syscall_vector[] = {
    [0 ... SYSCALL_NR - 1] = syscall_unknown,
    [SYSCALL_EXIT]      = exit,
    [SYSCALL_TTY_GETS]  = tty_gets,
    [SYSCALL_TTY_PUTS]  = tty_puts,
    [SYSCALL_CLOCK]     = clock,
};
```

initialisation du vecteur de syscalls = tableau de pointeur de fonctions ayant au plus 5 arguments : $4 à $7 et le 5e dans la pile (n°service)

kernel/hcpua.S/clock()

Gestionnaire de syscalls → service





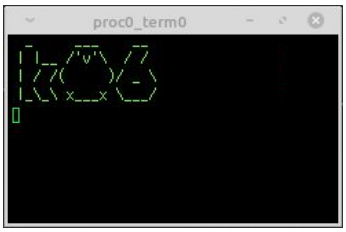

```
.globl clock
clock:
    mfc0    $2, $9
    jr      $31
```

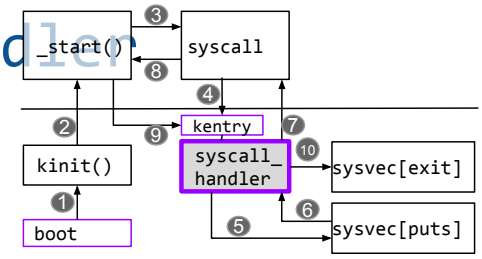
Le service `clock()` se contente de récupérer dans $2 la valeur du compteur de cycles présents par défaut dans le registre $9 du coprocesseur 0 du MIPS et sort !

`clock()` est nécessairement écrite en assembleur. `.globl` permet de la rendre visible hors de `hcpua.o`

kernel/hcpua.S/syscall_handler

Gestionnaire de syscalls → fin

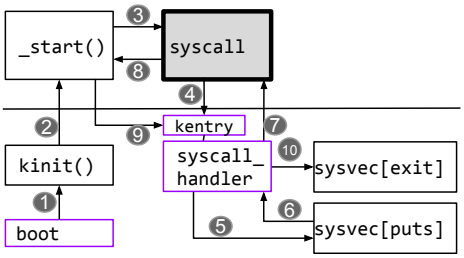





```
jalr    $2                      // call service function

lw      $26,    5*4($29)        // get old SR
lw      $27,    6*4($29)        // get return address of syscall
lw      $31,    7*4($29)        // restore $31 (return address of user syscall function)
mtc0    $26,    $12             // restore SR
mtc0    $27,    $14             // restore EPC
addiu   $29,    $29,    8*4     // restore stack pointer
eret                            // return : jr EPC with c0_sr.EXL <- 0
```

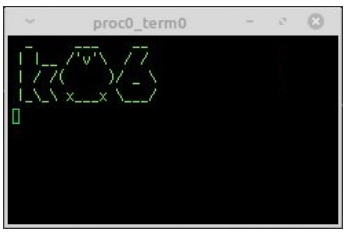
- La valeur de retour du service est dans $2
- on restore $31, EPC, SR
- on restore le pointeur de pile
- On sort avec `eret` ≈ `jr EPC` et effacer le bit `c0_sr.EXL`

ulib/crt0.c/syscall_fct



À la sortie du noyau, on revient dans la fonction `syscall_fct()` vue slide 40

$2 contient la valeur de retour, il suffit de sortir pour revenir dans la fonction appelante ici on retourne dans `clock()`



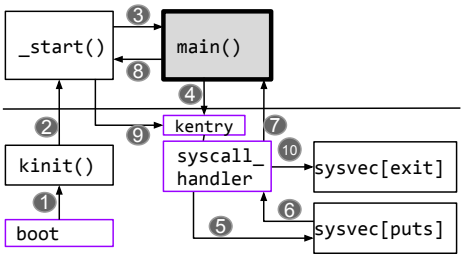

```
#include <libc.h>
```

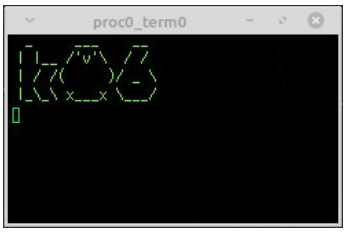
`syscall_fct()` est forcément écrite en assembleur. Notez qu'on peut inclure du code assembleur directement dans un code C. Cette fonction est ici la seule fonction écrite en assembleur que nous aurons, c'est pourquoi, nous avons choisi de ne pas créer un fichier .S spécifique pour **`syscall_fct()`** et la mettre dans le fichier `crt0.c` qui contient aussi la fonction **`_start()`**. Le fichier **`crt0.c`** contient en fait la **fonction d'entrée dans l'application `_start()`** et la **fonction de sortie `syscall_fct()`**

Syntaxe : `__asm__("une string avec des \n entre instructions, ici, décomposée comme pour banner")`

```
//int syscall_fct (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
__asm__ (".globl syscall_fct \n"      // it is an external function, it must be declared globl
         "syscall_fct:       \n"      // syscall_fct function label
         "   lw  $2,16($29)  \n"      // since syscall_fct has 5 parameters, the fifth is in the stack
         "   syscall         \n"      // EPC <- address of syscall, j 0x80000180, c0_sr.EXL <- 1 c0_cause.XCODE <- 8
         "   jr  $31         \n");    // $31 must not have changed
```


uapp/main.c/main()

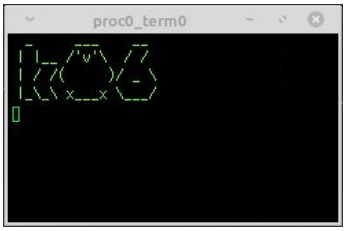


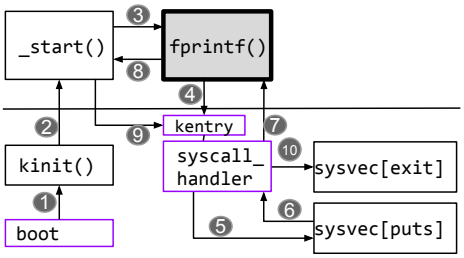



```
#include <libc.h>

int main (void)
{
    fprintf (0, "[%d] app is alive\n", clock());
    return 0;
}
```

- Au retour de `clock()` qui ne contenait que l'appel à la fonction `syscall_fct()`.
- On revient dans `main()` et on va entrer dans `fprintf()` définie dans `libc.c`

ulib/libc.c/fprintf()






```
int fprintf(int tty, char *fmt, ...)
{
    int res;
    char buffer[PRINTF_MAX];
    va_list ap;
    va_start (ap, fmt);
    res = vsnprintf(buffer, sizeof(buffer), fmt, ap);
    va_end(ap);

    res = syscall( tty, (int)buffer, res, 0, SYSCALL_TTY_PUTS);
    return res;
}
```

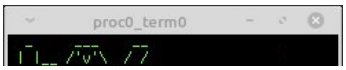
fprintf() est une fonction variadique * (avec un nombre variable d'arguments)

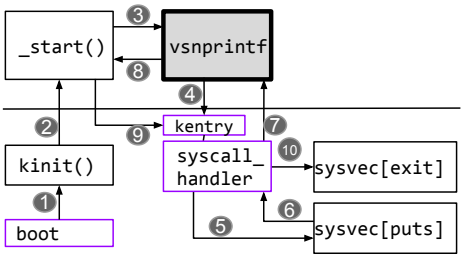
- Dans la déclaration, on met **...** à la fin
- On déclare une variable **ap** de type **va_list** (type **builtin** défini par gcc)
- **va_start()** est permet de dire à gcc quel est le dernier argument explicite et donc où commence la liste des arguments variables **ap**
- On pourrait directement utiliser **ap,** mais ici, on choisit de le passer en paramètre de la fonction **vsnprintf()** dont le dernier argument est de type **va_list**
- à la fin il faut fermer la liste ap avec **va_end()**

L'accès aux arguments de la liste **ap** est réalisé avec **va_arg()**, ici, dans **vsnprintf()**

* https://www.wikiwand.com/fr/Fonction_variadique

ulib/libc.c/vsnprintf()





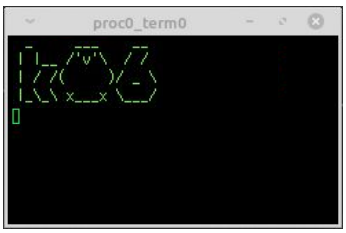

```
static int vsnprintf (char * buffer, unsigned size, char *fmt, va_list ap)
{
    char arg[16];       // buffer used to build the argument
    char *tmp;          // temporary pointer used to build arguments
    [...]

   while (*fmt) {                       // for all char in fmt
       [...]
       switch (*fmt) {                  // study the different cases
         [...]
         case 's':                      // case %s (string)
           tmp = va_arg (ap, char *);   // tmp points to this string argument
           tmp = (tmp) ? tmp : "(null)";// replace "" by "(null)"
           goto copy_tmp;               // go to copy tmp in buffer
         [...]
   }
  abort:
    *buf = '\0';                                // put the ending char 0
    res = (int)((unsigned)buf-(unsigned)buffer);// compute the nb of char to write
    return res;
}
```

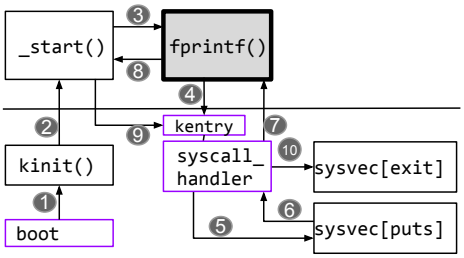
Dans ce slide, il n'y a pas le code de **vsnprintf()**, mais vous pouvez lire le code de la libc si cela vous intéresse :-)

Le principe consiste à parcourir la chaîne fmt et à chaque **%** on regarde le caractère suivant pour connaître le type de l'argument de la liste **ap** dont il faut prendre la valeur : **s:char*, d:int, x:int,** etc.

va_arg(ap,type) permet de prendre la variable suivante dans la liste **ap** et type informe gcc du type de cet argument.

ulib/libc.c/fprintf()






```
int fprintf(int tty, char *fmt, ...)
{
    int res;
    char buffer[PRINTF_MAX];
    va_list ap;
    va_start (ap, fmt);
    res = vsnprintf(buffer, sizeof(buffer), fmt, ap);
    va_end(ap);

    res = syscall_fct( tty, (int)buffer, res, 0, SYSCALL_WRITE);
    return res;
}
```

à la fin il faut fermer la liste ap avec **va_end()**

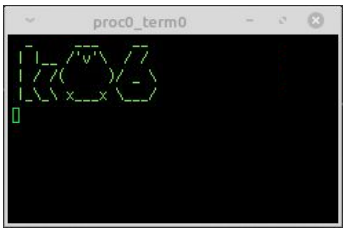
Au retour de **vsnprintf()**, le tableau **buffer[]** contient les caractères à envoyer au terminal n°**tty**, **res** contient le nombre de caractères dans la **buffer[]**

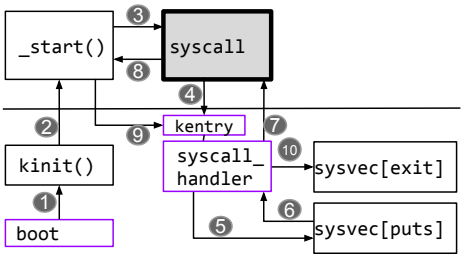
Pour écrire ces caractères, il faut demander au noyau par un appel système WRITE :
- **$4** : n°**tty**
- **$5** : adresse du **buffer[]**
- **$6** : nombre de caractères à afficher

En résumé :

Variadique : *type* `va_list ap` ; *ouverture* `va_start(ap,arg)` *puis N lectures* `va_arg(ap,type)` *et fermeture* `va_end(ap)`

ulib/crt0.c/syscall_fct()

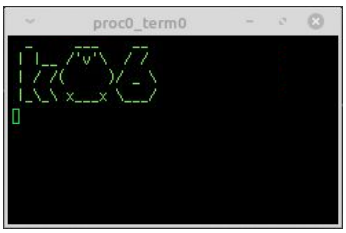


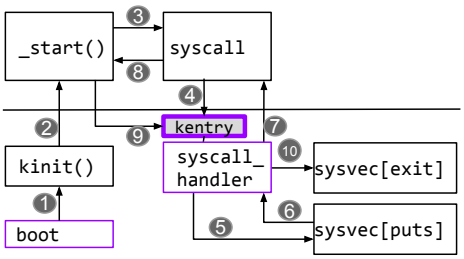


Nouvel appel de **syscall_fct()**

```
#include <libc.h>

extern int __bss_origin;        // first int of uninitialized global data
extern int __bss_end;           // first int of above the uninitialized global data
extern int main (void);         // tell the compiler that main() exists

//int syscall_fct (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
__asm__ (".globl syscall_fct \n"    // it is an external function, it must be declared globl
         "syscall_fct:       \n"    // syscall_fct function label
         "   lw  $2,16($29)  \n"    // since syscall has 5 parameters, the fifth is in the stack
         "   syscall         \n"    // EPC <- address of syscall, j 0x80000180, c0_s.EXL <- 1, c0_cause.XCODE <- 8
         "   jr  $31         \n");  // $31 must not have changed
```

kernel/hcpua.S/kentry





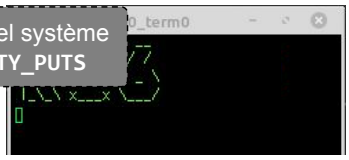
Nouvelle entrée dans **kentry**

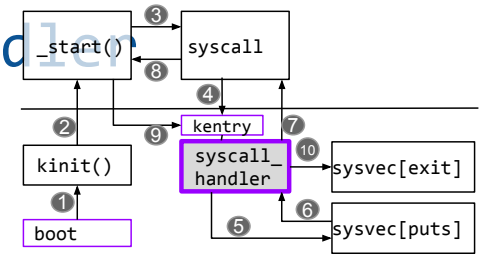
```
kentry:                                 // kernel entry

    mfc0    $26,    $13                 // read CR (Cause Register)
    andi    $26,    $26,    0x3C        // apply cause mask (keep bits 2 to 5)
    li      $27,    0x20                // 0x20 is the syscall code
    bne     $26,    $27,    kpanic      // if not then that is not a syscall
```


kernel/hcpua.S/syscall_handler

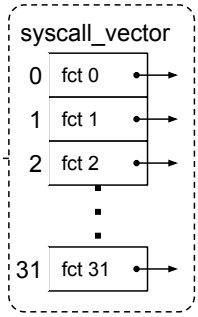
Gestionnaire de syscalls → début

Cette fois l'appel système est **SYSCALL_TTY_PUTS**





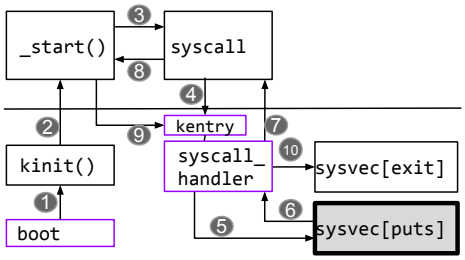

```
syscall_handler:
    addiu   $29,    $29,    -8*4        // context for $31 + EPC + SR + syscall_code + 4 args
    mfc0    $27,    $14                 // $27 <- EPC (addr of syscall instruction)
    mfc0    $26,    $12                 // $26 <- SR (status register)
    addiu   $27,    $27,    4           // $27 <- EPC+4 (return address)
    sw      $31,    7*4($29)            // save $31 because it will be erased
    sw      $27,    6*4($29)            // save EPC+4 (return address of syscall)
    sw      $26,    5*4($29)            // save SR (status register)
    sw      $2,     4*4($29)            // save syscall code (useful for debug message)
    mtc0    $0,     $12                 // SR <- kernel-mode w/o INT (UM=0 ERL=0 EXL=0 IE=0)

    la      $26,    syscall_vector      // $26 <- table of syscall functions
    andi    $2,     $2,     SYSCALL_NR-1 // apply syscall mask
    sll     $2,     $2,     2           // compute syscall index (multiply by 4)
    addu    $2,     $26,    $2          // $2 <- & syscall_vector[$2]
    lw      $2,     ($2)                // $2 <- syscall_vector[$2]
    jalr    $2                          // call service function
```



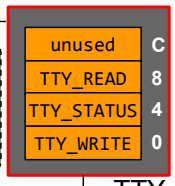

```
void *syscall_vector[] = {
    [0 ... SYSCALL_NR - 1] = syscall,
    [SYSCALL_EXIT]   = exit,
    [SYSCALL_READ]   = tty_read,
    [SYSCALL_WRITE]  = tty_write,
    [SYSCALL_CLOCK]  = clock,
};
```

et donc : **jal syscall_vector[SYSCALL_TTY_PUTS] = tty_puts()**

kernel/harch.c/tty_write()



Description de la composition des registres du TTY par une struct C




```c
struct tty_s {
    int write;      // tty's output address
    int status;     // tty's status address something to read if not null)
    int read;       // tty's input address
    int unused;     // unused address
};

extern volatile struct tty_s __tty_regs_map[NTTYS]; // NTTYS is a #define
int tty_write (int tty, char *buf, int count)
{
    int res = count;
    tty = tty % NTTYS;  // to be sure that tty is an existing tty
    while ((count != 0) && (*buf != 0)) {
        __tty_regs_map[ tty ].write = *buf;
        count--;
        buf++;
    }
    return res - count;
}
```

L'accès à un registre du TTY est simplifié par cette déclaration de structure C

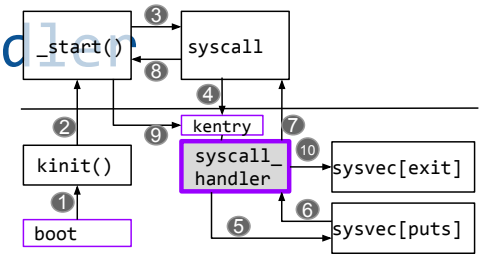
`_tty_regs_map` est un label défini dans le fichier ldscript `kernel.ld`, ce label est égal à l'adresse du premier registre du TTY dans l'espace d'adressage du MIPS (pour ce SoC).

Cette déclaration permet de dire au compilateur que cette adresse est de type `struct tty_s` et qu'elle est allouée ailleurs (`extern`)

Il y a autant de jeu de registres qu'il y a de TTY, d'où le tableau de struct

kernel/hcpua.S/syscall_handler

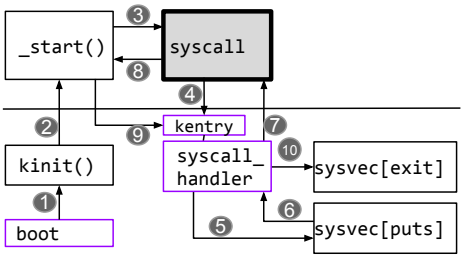
Gestionnaire de syscalls → fin




```
jalr    $2                      // call service function

lw      $26,    5*4($29)        // get old SR
lw      $27,    6*4($29)        // get return address of syscall
lw      $31,    7*4($29)        // restore $31 (return address of syscall function)
mtc0    $26,    $12             // restore SR
mtc0    $27,    $14             // restore EPC
addiu   $29,    $29,    8*4     // restore stack pointer
eret                            // return : jr EPC with c0_sr.EXL <- 0
```

ulib/crt0.c/syscall_fct()

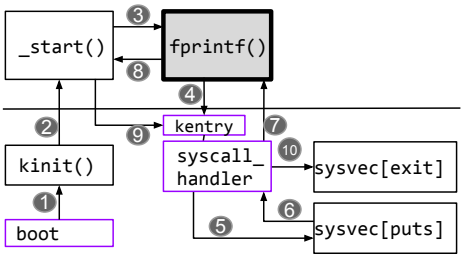
sortie de la fonction **syscall_fct()**




```
#include <libc.h>

extern int __bss_origin;        // first int of uninitialized global data
extern int __bss_end;           // first int of above the uninitialized global data
extern int main (void);         // tell the compiler that main() exists

//int syscall_fct (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
__asm__ (".globl syscall_fct \n"     // it is an external function, it must be declared globl
         "syscall_fct:       \n"     // syscall_fct function label
         "   lw  $2,16($29)  \n"     // since syscall has 5 parameters, the fifth is in the stack
         "   syscall         \n"     // EPC <- address of syscall, j 0x80000180, c0_sr.EXL <- 1, c0_cause.XCODE <- 8
         "   jr  $31         \n");   // $31 must not have changed
```


ulib/libc.c/fprintf()

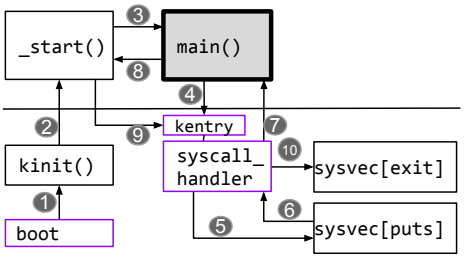
sortie de la fonction **fprintf()**




```
int fprintf(int tty, char *fmt, ...)
{
    int res;
    char buffer[PRINTF_MAX];
    va_list ap;
    va_start (ap, fmt);
    res = vsnprintf(buffer, sizeof(buffer), fmt, ap);
    va_end(ap);
    res = syscall_fct( tty, (int)buffer, res, 0, SYSCALL_WRITE);
    return res;
}
```

uapp/main.c/main()

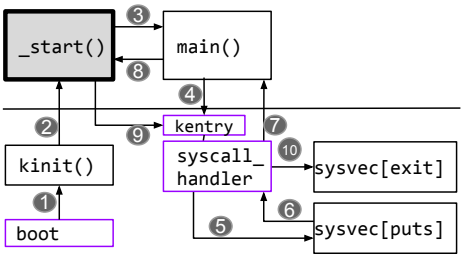
sortie de la fonction **main()**




```c
#include <libc.h>

int main (void)
{
    fprintf (0, "[%d] app is alive\n", clock());
    return 0;
}
```


ulib/crt0.c/_start()

retour dans la fonction **_start()**

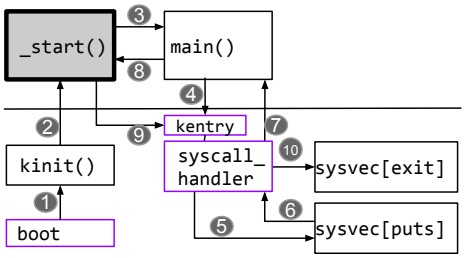



```c
#include <libc.h>

extern int __bss_origin;        // first int of uninitialized global data
extern int __bss_end;           // first int of above the uninitialized global data
extern int main (void);         // tell the compiler that main() exists

//int syscall_fct (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
__asm__ (".globl syscall_fct \n"     // it is an external function, it must be declared globl
         "syscall_fct:       \n"     // syscall_fct function label
         "   lw  $2,16($29)  \n"     // since syscall has 5 parameters, the fifth is in the stack
         "   syscall         \n"     // EPC <- address of syscall, j 0x80000180, SR.EXL <- 1, c0_cause.XCODE <- 8
         "   jr  $31         \n");   // $31 must not have changed

__attribute__ ((section (".start")))
void _start (void)
{
    int res;

    for (int *a = &__bss_origin; a != &__bss_end; *a++ = 0);
    res = main ();
    exit (res);
}
```

Puisque la fonction **main()** n'a pas fait appel à **exit()** et que **exit()** est la seule manière de sortir d'un programme utilisateur, alors c'est la fonction **start()** qui doit le faire avec la valeur rendue par **main()**.
On ne revient jamais de **exit()** !

ulib/libc.c/exit()

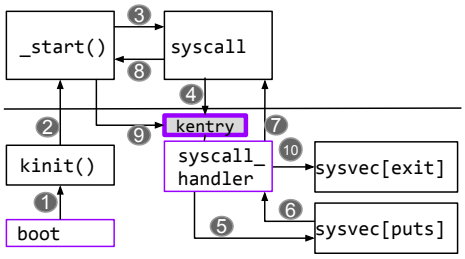
dernier appel système avec la valeur de retour de l'application




```
void exit (int status)
{
    syscall_fct( status, 0, 0, 0, SYSCALL_EXIT);        // never returns
}
```


kernel/hcpu.S/kentry

Dernière entrée dans **kentry**

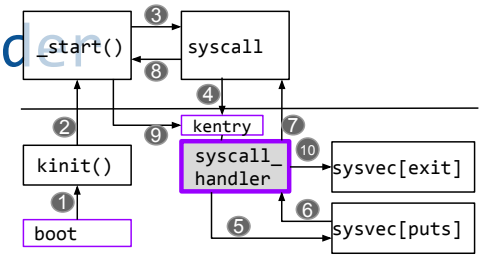



```
kentry:                                 // kernel entry

    mfc0    $26,    $13                 // read CR (Cause Register)
    andi    $26,    $26,    0x3C        // apply cause mask (keep bits 2 to 5)
    li      $27,    0x20                // 0x20 is the syscall code
    bne     $26,    $27,    kpanic      // if not then that is not a syscall
```

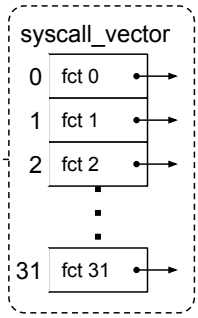
kernel/hcpua.S/syscall_handler

Gestionnaire de syscalls → début

Cette fois l'appel système est **SYSCALL_EXIT**




```
syscall_handler:
    addiu   $29,    $29,    -8*4            // context for $31 + EPC + SR + syscall_code + 4 args
    mfc0    $27,    $14                     // $27 <- EPC (addr of syscall instruction)
    mfc0    $26,    $12                     // $26 <- SR (status register)
    addiu   $27,    $27,    4               // $27 <- EPC+4 (return address)
    sw      $31,    7*4($29)                // save $31 because it will be erased
    sw      $27,    6*4($29)                // save EPC+4 (return address of syscall)
    sw      $26,    5*4($29)                // save SR (status register)
    sw      $2,     4*4($29)                // save syscall code (useful for debug message)
    mtc0    $0,     $12                     // SR <- kernel-mode w/o INT (UM=0 ERL=0 EXL=0 IE=0)

    la      $26,    syscall_vector          // $26 <- table of syscall functions
    andi    $2,     $2,     SYSCALL_NR-1    // apply syscall mask
    sll     $2,     $2,     2               // compute syscall index (multiply by 4)
    addu    $2,     $26,    $2              // $2 <- & syscall_vector[$2]
    lw      $2,     ($2)                    // $2 <- syscall_vector[$2]
    jalr    $2                              // call syscall function
```

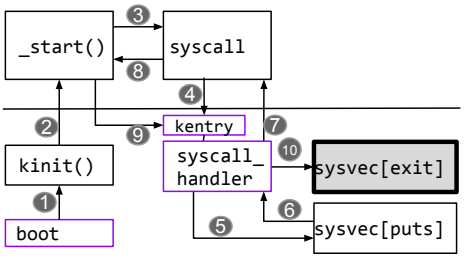



```
void *syscall_vector[] = {
    [0 ... SYSCALL_NR - 1] = unknown_syscall,
    [SYSCALL_EXIT]    = exit,
    [SYSCALL_READ]    = tty_read,
    [SYSCALL_WRTIE]   = tty_write,
    [SYSCALL_CLOCK]   = clock,
};
```

et donc : **jal syscall_vector[SYSCALL_EXIT] = exit()**

kernel/klibc.c/exit()

On affiche un message, on est dans le noyau : **kprintf()** et **clock()** sont appelées directement sans syscall




```
void exit (int status)
{
    kprintf (0, "\n\n[%d] EXIT status = %d\n", clock(), status);
    while (1);  // infinite loop
}
```

Là c'est la fin ! on fige le simulateur !!!

Le simulateur propose un mode debug pour de suivre la trace d'exécution détaillée des instructions **trace0.s** et la séquence d'appel des fonctions **label0.s**
le 0 c'est le n° du processeur, si on en a plusieurs, il y a **trace1.s**, **label1.s**, etc.

```
> make debug
> less label0.s
```

label0.s

```
K  12:    <boot> ---------------- ./kernel/hcpua.S
K  37:    <kinit> --------------- ./kernel/kinit.c
K  61:    <kprintf> ------------- ./kernel/klibc.c
K  118:   <vsnprintf> ----------- ./kernel/klibc.c
K  1359:  <tty_write> ----------- ./kernel/harch.c
K  2071:  <app_load> ------------ ./kernel/hcpua.S
U  2095:  <_start> -------------- ./ulib/crt0.c
U  2131:  <main> ---------------- ./uapp/main.c
U  2154:  <clock> --------------- ./ulib/libc.c
U  2193:  <syscall> ------------- ./ulib/crt0.c
K  2213:  <kentry> -------------- ./kernel/hcpua.S
K  2227:  <syscall_handler> ------ ./kernel/hcpua.S
K  2288:  <clock> ---------------- ./kernel/hcpua.S
U  2353:  <fprintf> ------------- ./ulib/libc.c
U  2407:  <vsnprintf> ----------- ./ulib/libc.c
U  3146:  <syscall> ------------- ./ulib/crt0.c
K  3157:  <kentry> -------------- ./kernel/hcpua.S
K  3162:  <syscall_handler> ------ ./kernel/hcpua.S
K  3206:  <tty_write> ----------- ./kernel/harch.c
U  3424:  <exit> ---------------- ./ulib/libc.c
U  3440:  <syscall> ------------- ./ulib/crt0.c
K  3442:  <kentry> -------------- ./kernel/hcpua.S
K  3447:  <syscall_handler> ------ ./kernel/hcpua.S
K  3477:  <exit> ---------------- ./kernel/klibc.c
K  3504:  <clock> ---------------- ./kernel/hcpua.S
K  3538:  <kprintf> ------------- ./kernel/klibc.c
K  3565:  <vsnprintf> ----------- ./kernel/klibc.c
K  4224:  <tty_write> ----------- ./kernel/harch.c
```

mode | date | label | file