Ecole Nationale
Supérieure
de l'Electronique
ENSEA et de ses Applications

Linux Embarqué

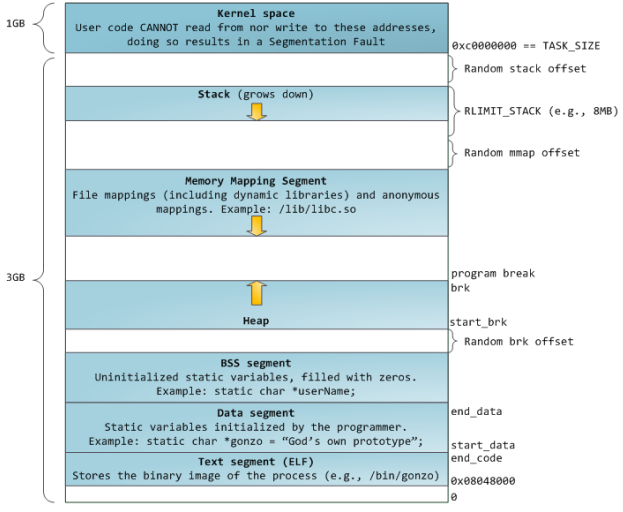
Séance 3 : Mémoire et modules

Laurent Fiack
Bureau D212 – laurent.fiack@ensea.fr

Menu du jour

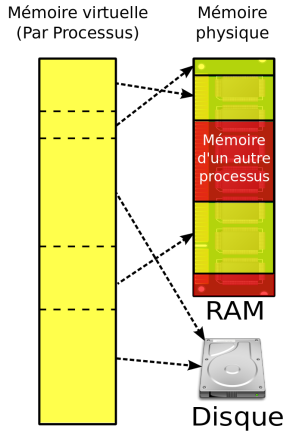
Mémoire virtuelle

Espace d'adressage d'un processus

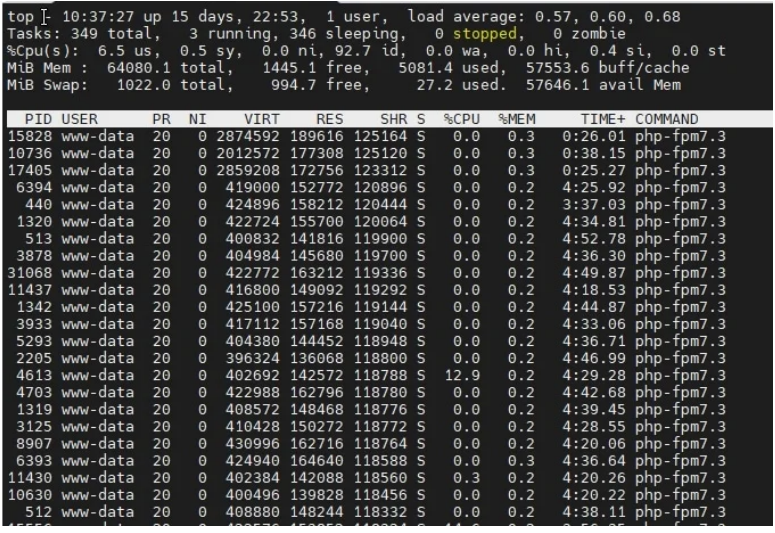


Mémoire virtuelle : Le pourquoi du comment ?

- Traduction à la volée d'adresses virtuelles (logicielles) en adresses physiques (matérielles = RAM)
- La mémoire virtuelle permet :
  - D'utiliser de la mémoire de masse comme extension de la mémoire vive ;
  - Limiter la fragmentation ;
  - De mettre en place des mécanismes de protection de la mémoire ;
  - De partager la mémoire entre processus.



Commande top



Commandes utiles

- pmap <pid>
- free
- cat /proc/meminfo
- cat /proc/<pid>/status

Mémoire virtuelle

Mémoire virtuelle paginée

Pagination

- Diviser la **mémoire physique** en morceaux de taille fixe : les *frames*
- Diviser la **mémoire virtuelle** en des morceaux de taille fixe : les *pages*
  - Les *frames* et les *pages* ont la même taille
  - Il y a plus de *pages* que de *frame*
- Maintenir des *page tables* pour faire l'association entre une *page* virtuelle et une *frame* physique
- Maintenir une *carte de mémoire* avec des informations sur chaque page physique
- Utiliser des composants matériels pour accélérer la conversion **virtuel** → **physique**

Principe de fonctionnement (1/3)

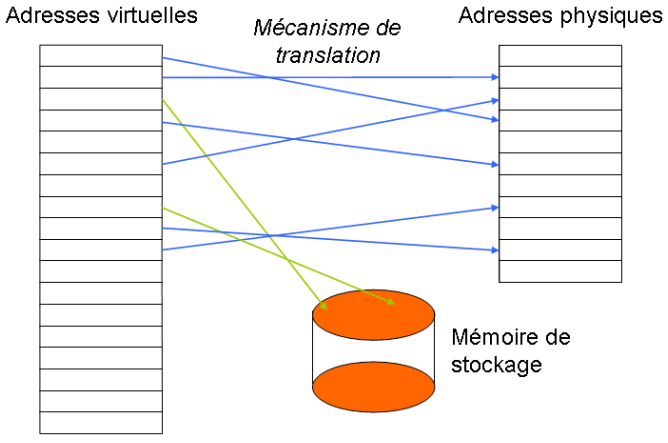
- Adresses manipulées par les programmes sont virtuelles, indiquent la position d'un mot dans la mémoire virtuelle.
- Mémoire virtuelle est formée de zones de même taille, appelées pages.
  - Adresse virtuelle = couple (numéro de page, déplacement dans la page).
  - Taille des pages = puissance de deux → déterminer sans calcul le déplacement
  - eg. 10 bits de poids faible de l'adresse virtuelle pour des pages de 1 024 mots, 22 bits pour le numéro de page.
- Mémoire physique également composée de zones de même taille, appelées cadres (*frames*),
  - un cadre contient une page : taille d'un cadre = taille d'une page.
  - Taille de l'ensemble des cadres dans la RAM utilisés par un processus est appelé *Resident set size*.

Principe de fonctionnement (2/3)

- Mécanisme de traduction (*translation*, ou génération d'adresse) convertit les adresses virtuelles en adresses physiques,
  - Consulte une table des pages (*page table*) pour connaître le numéro du cadre qui contient la page recherchée.
  - L'adresse physique obtenue est le couple (numéro de cadre, déplacement).
- Il peut y avoir plus de pages que de cadres :
  - les pages qui ne sont pas en mémoire sont stockées sur un autre support (disque), elles seront ramenées dans un cadre quand on en aura besoin.

Principe de fonctionnement (3/3)

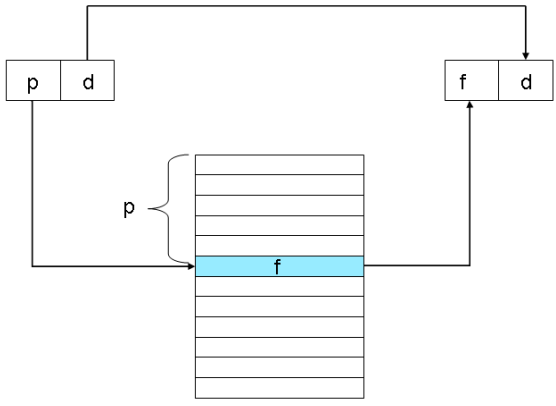
- On traduit des adresses virtuelles en adresses physiques, et certaines informations peuvent être temporairement placées sur un support de stockage.



Traduction (1/2)

- Table des pages indexée par le numéro de page.
- Chaque ligne est appelée **entrée dans la table des pages** (PTE pour *pages table entry*)
  - Contient le numéro de cadre.
- Table des pages peut être située n'importe où en mémoire,
  - Un registre spécial (PTBR pour Page Table Base Register) conserve son adresse.
- En pratique, le mécanisme de traduction est géré par la MMU (*memory management unit*)
  - Contient une partie de la table des pages, stockée dans un cache
  - Évite d'avoir à consulter la table des pages (en RAM) pour chaque accès mémoire.

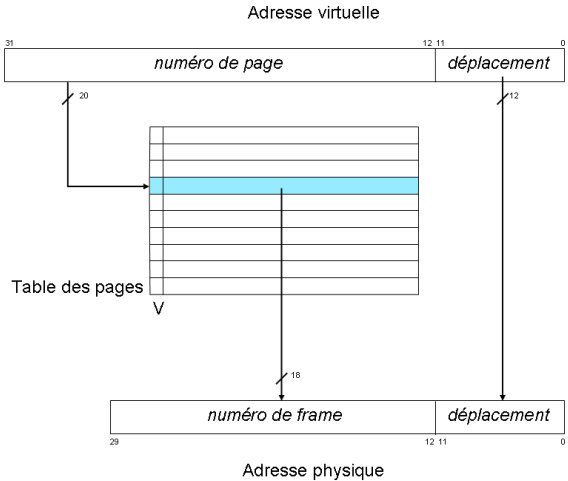
Traduction (2/2)



- Traduction de l'adresse virtuelle (page, déplacement) en adresse physique (frame, déplacement)

Exemple

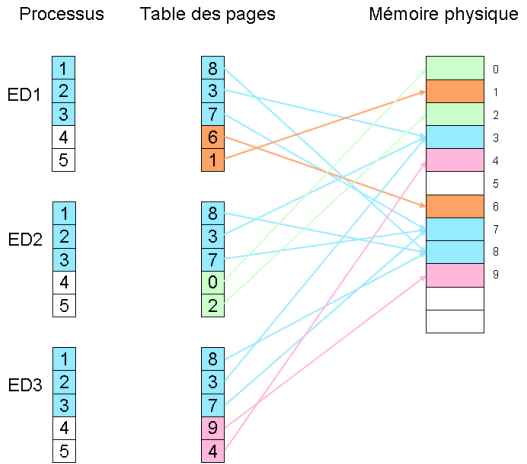
- Processeur génère des adresses virtuelles sur 32 bits
  - Accès à 4 Gio de mémoire.
- La taille de la page est de 4 Kio.
- Déplacement occupe les 12 bits de poids faible,
- Le champ numéro de page occupe les 20 bits de poids fort.



Exemple

- Champ spécial appartenant à chaque PTE.
- Pour simplifier, sur un bit : le bit de validité.
- Si 0 $\rightarrow$ numéro de cadre est invalide.
- Il faut donc se doter d'une technique permettant de mettre à jour cette PTE pour la rendre valide.
- Trois cas peuvent se produire :
  - L'entrée est valide : elle se substitue au numéro de page pour former l'adresse physique.
  - L'entrée dans la table des pages est invalide.
    - Il faut trouver un cadre libre en mémoire vive
    - Et mettre son numéro dans cette entrée de la table des pages.
  - L'entrée dans la table des pages est valide mais correspond à une adresse sur la mémoire de masse où se trouve le contenu du cadre.
    - Un mécanisme devra ramener ces données pour les placer en mémoire vive.

Partage de mémoire



- Trois processus en cours d'exécution
- Trois instances sont situées aux mêmes adresses virtuelles (1, 2, 3, 4, 5).
- Deux zones mémoire distinctes : code et données.
- Il suffit de garder les mêmes entrées dans la table des pages pour que les trois instances se partagent la zone de code.
- Les entrées correspondantes aux pages de données sont, elles, distinctes.

Mémoire virtuelle

Accès à la mémoire

Allocation mémoire

- Le noyau s'occupe de gérer la mémoire
  - Lorsqu'un processus a besoin de plus de mémoire, il fait une demande au noyau
  - La demande s'effectue via un appel de la libc :
    - `malloc(size)` allouer size
    - `calloc(n,size)` n éléments de taille size initialisés à 0
    - `realloc(ptr, size)` modifier la taille d'une zone allouée avec malloc ou calloc
    - `free(ptr)` libérer une zone
    - `brk(addr)` faire croître le tas jusqu'à addr
    - `sbrk(incr)` augmenter le tas de incr

Écrire dans une adresse physique

- Accès à un périphérique mappé en mémoire
- Appel à la primitive `mmap()`

```
void *mmap(void *addr, size_t length, int prot, int flags,
                                int fd, off_t offset);
```

- Exemple

```
uint32_t * p;
int fd = open("/dev/mem", O_RDWR);
p = (uint32_t*)mmap(NULL, 4, PROT_WRITE|PROT_READ, MAP_SHARED,
                                fd, 0xFF203000);
*p = (1<<8);
```

Les modules

Introduction

- Le noyau Linux n'est plus un bloc de code monolithique
- Il est possible d'ajouter ou d'enlever du code dynamiquement
  - Évite d'avoir un noyau énorme
  - Pas nécessaire de recompiler le noyau à chaque fois que l'on désire ajouter une fonctionnalité
  - Pas nécessaire de relancer la machine a chaque modification
- Les modules servent à implémenter des **pilotes** (drivers)
- Ils servent aussi à implémenter des services dont le code doit être exécuté avec des **droits privilégiés**

Sources du noyau

- Pour compiler un module, il faut les sources (généralement dans `/usr/src/linux-<version>`)

Version du noyau :

```
uname -r
```

Installer les sources :

```
sudo apt update
sudo apt install linux-headers-$(uname -r)
sudo apt install build-essential checkinstall
```

Sources du noyau

- Pour compiler un module, il faut les sources (généralement dans `/usr/src/linux-<version>`)

```
.
|- 3rdparty        |- ipc
|- Documentation   |- kernel
|- arch            |- lib
|- block           |- mm
|- crypto          |- net
|- drivers         |- scripts
|- fs              |- security
|- include         |- sound
|- init            |- usr
```

Compilation

- Utilisation d'un Makefile

```
obj-m:=le_module.o
KERNEL_SOURCE=/lib/modules/$(shell uname -r)/build

all:
    make -C $(KERNEL_SOURCE) M=$(PWD) modules
clean:
    make -C $(KERNEL_SOURCE) M=$(PWD) clean
install:
    make -C $(KERNEL_SOURCE) M=$(PWD) install
```

Exemple de module

```c
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h>
#include <linux/init.h>

MODULE_AUTHOR("Quelqu'un");
MODULE_DESCRIPTION("Exemple de module");
MODULE_SUPPORTED_DEVICE("Tous");
MODULE_LICENSE("GPL");

static int __init le_module_init(void) {
    printk(KERN_INFO "Hello world!\n");
    return 0;
}

static void __exit le_module_exit(void) {
    printk(KERN_ALERT "Bye bye...\n");
}

module_init(le_module_init);
module_exit(le_module_exit);
```

Gestion des modules

- Commandes en espace utilisateur :
  - insmod : insérer le module sans vérification des dépendances
  - modprobe : charger le module avec vérification des dépendances
  - rmmod : décharger le module
  - lsmod : lister les modules chargés
  - modinfo : afficher des infos sur le module
  - dmesg : afficher les messages émis par les modules

Paramètres d'un module

- Différentes macros pour déclarer les arguments à passer au module :

```
module_param(var, type, droits)
module_param_array(var, type, addr, droits)
module_param_string(nom_dans_modinfo, var, taille, droits)
```

- Utilisation dans le code du module :

```
int param = 3;
module_param(param, int, 0);
```

- Chargement :

```
insmod le_module param=2
```

Exemple de paramètre

```c
#include <linux/module.h>
#include <linux/kernel.h>
#include <linux/init.h>

MODULE_AUTHOR("Quelqu'un d'autre");
MODULE_DESCRIPTION("Exemple de module");
MODULE_SUPPORTED_DEVICE("Presque tous");
MODULE_LICENSE("GPL");

static int param;

module_param(param, int, 0);
MODULE_PARM_DESC(param, "Un paramètre de ce module");

static int __init le_module_init(void) {
    printk(KERN_INFO "Hello world!\n");
    printk(KERN_DEBUG "le paramètre est=%d\n", param);
    return 0;
}

static void __exit le_module_exit(void) {
    printk(KERN_ALERT "Bye bye...\n");
}

module_init(le_module_init);
module_exit(le_module_exit);
```

Character device driver

Character device driver

- Permet l'accès à un périphérique depuis le mode user.
- S'oppose au block ou network driver. Différence interface noyau.
- Device driver identifié dans le noyau par un numéro appelé "majeur"
- Enregistrement du driver au moment de l'initialisation du module
- Ne pas oublier de décharger le module

Character device driver

```
#include <linux/fs.h>
int register_chrdev(unsigned char major, const char *name, struct file_operations *fops);
int unregister_chrdev(unsigned int major, const char *name);
```

Renvoient 0 ou >0 si tout se passe bien.

`register_chrdev`

- **major :** numéro majeur du driver, 0 indique que l'on souhaite une affectation dynamique.
- **name :** nom du périphérique qui apparaîtra dans `/proc/devices`.
- **fops :** pointeur vers une structure qui contient des pointeurs de fonction. Ils définissent les fonctions appelées lors des appels système (`open`, `read`...) du côté utilisateur.

`unregister_chrdev`

- **major** : numéro majeur du driver, le même qu'utilisé dans `register_chrdev`.
- **name** : nom du périphérique utilisé dans `register_chrdev`.

Opérations sur le fichier

- Il n'est pas obligatoire de définir toutes les opérations
  - `open()` : pour initialiser les ressources liées au périphériques.
  - `release()` : pour libérer ces mêmes ressources.
  - `read()`/`write()` : permet d'échanger des données avec le périphérique.

```
struct file_operations fops = {
    .owner = THIS_MODULE,
    .read = my_read_function,
    .write = my_write_function,
    .open = my_open_function,
    .release = my_release_function  /* correspond a close */
};
```

- Certaines méthodes non implémentées sont remplacées par des méthodes par défaut.
- Les autres méthodes non implémentées retournent -EINVAL.

Implémentation des appels systèmes

```
static ssize_t my_read_function(struct file *file, char *buf, size_t count, loff_t *ppos) {
    printk(KERN_DEBUG "read()\n");
    return 0;        // (mais c'est une connerie)
}
static ssize_t my_write_function(struct file *file, const char *buf, size_t count,
                loff_t *ppos) {
    printk(KERN_DEBUG "write()\n");
    return 0;        // (c'est stupide ici aussi)
}
static int my_open_function(struct inode *inode, struct file *file) {
    printk(KERN_DEBUG "open()\n");
    return 0;
}
static int my_release_function(struct inode *inode, struct file *file) {
    printk(KERN_DEBUG "close()\n");
    return 0;
}
```

Entrée périphérique

- Entrée périphérique : fichier pour interagir avec un module
- Création :
  `mknod /dev/nom_du_peripherique c majeure mineure`
- Périphérique de type char (c) ou block (b)
- majeure : numéro définissant une classe de périphériques
  - disques durs, usb, pci...
- mineure : instance particulière pour ce type de composant
  - les constructeurs peuvent être différents
  - le pilote est le même

Utilisation du driver

- Créer son fichier spécial : `mknod /dev/le_driver c 254 0`
- Compiler et charger le module
- Depuis le terminal : `echo "bonjour" > /dev/_le_driver`
- Test avec dmesg
- Depuis un programme

Depuis un programme

```c
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <errno.h>

int main(void) {
    int file = open("/dev/le_driver", O_RDWR);

    if(file < 0) {
        perror("open");
        exit(errno);
    }

    write(file, "hello", 6);
    close(file);

    return 0;
}
```

Exemple de fonction read()

```
#define BUF_LEN 64
static char *buffer;

static ssize_t my_read_function(struct file *file, char *buf, size_t count, loff_t *ppos) {
    int lus = 0;

    printk(KERN_DEBUG "read: demande lecture de %d octets\n", count);
    /* Check for overflow */
    if (count <= BUF_LEN - (int)*ppos)
        lus = count;
    else  lus = BUF_LEN - (int)*ppos;
    if(lus)
        copy_to_user(buf, (int *)buffer + (int)*ppos, lus);
    *ppos += lus;
    printk(KERN_DEBUG "read: %d octets reellement lus\n", lus);
    printk(KERN_DEBUG "read: position=%d\n", (size_t)*ppos);
    return lus;
}
```

Exemple de write()

```
static ssize_t my_write_function(struct file *file, char *buf, size_t count, loff_t *ppos) {
    int ecrits = 0, i = 0;

    printk(KERN_DEBUG "write: demande ecriture de %d octets\n", count);
    if (count <= BUF_LEN - (int)*ppos) /* Check for overflow */
        ecrits = count;
    else  ecrits = BUF_LEN - (int)*ppos;

    if(ecrits)
        copy_from_user((int *)buffer + (int)*ppos, buf, ecrits);
    *ppos += ecrits;
    printk(KERN_DEBUG "write: %d octets reellement ecrits\n", ecrits);
    printk(KERN_DEBUG "write: position=%d\n", (int)*ppos);
    printk(KERN_DEBUG "write: contenu du buffer\n");
    for(i=0;i<BUF_LEN;i++)
        printk(KERN_DEBUG " %d", buffer[i]);
    printk(KERN_DEBUG "\n");
    return ecrits;
}
```

ioctl

- `ioctl` utilisé pour configurer le périphérique
- Commandes codées sur un entier
- Peuvent avoir un argument
- Entier ou pointeur
- Côté module :

```
#include <linux/fs.h>.
long ioctl(struct file *file, unsigned int cmd,
                  unsigned long arg);
```

- Côté utilisateur :

```
int ioctl(int fd, int cmd, char *argp);
```

Exemple

```
long my_ioctl(struct file *f, unsigned int cmd, unsigned long arg) {
    int retval = 0;

    switch(cmd) {
        case ... : ... break;
        case ... : ... break;
        default : retval = -EINVAL; break;
    }
    return retval;
}
```

- Ne pas oublier de le rajouter au `file_operations`

```
struct file_operations fops = {
    ...
    .unlocked_ioctl = my_ioctl_function;
};
```

Allocation mémoire

- Similaire au mode utilisateur
- `kmalloc()` et `kfree()`
- Un argument supplémentaire pour `kmalloc()`
  - GFP_KERNEL : allocation normale de la mémoire du noyau ;
  - GFP_USER : allocation mémoire pour le compte utilisateur (faible priorité) ;
  - GFP_ATOMIC : alloue la mémoire à partir du gestionnaire d'interruptions.

```
#include <linux/slab.h>

buffer = kmalloc(BUF_LEN, GFP_KERNEL);
if(buffer == NULL) {
    printk(KERN_WARNING "kmalloc error\n");
    return -ENONEM;
}
kfree(buffer);
buffer = NULL;
```

Espaces mémoire

- Allocation mémoire du buffer au chargement du module.

  `buffer = kmalloc(BUF_LEN, GFP_KERNEL);`
- `copy_from_user` et `copy_to_user` pour transférer un buffer depuis/vers l'espace utilisateur.

```
copy_from_user(unsigned long dest, unsigned long src, unsigned long len);
copy_to_user(unsigned long dest, unsigned long src, unsigned long len);
```

procfs

procfs

- procfs (process file system) est un pseudo-système de fichiers monté sur /proc utilisé pour accéder aux informations du noyau en cours d'exécution
- Ne correspond à aucun fichier sur block devices
- Fichiers accessibles en lecture (information, debugging), et en écriture (modification des paramètres du noyau)
- Infos sur les processus (/proc/[0-9]+/)
  - cmdline : arguments passés au programme
  - cwd : repertoire de travail du process
  - environ : variables d'environnement
  - fd/ : répertoire contenant les fichiers ouverts
  - exe : lien symbolique vers l'exécutable
  - maps : memory map du process
  - mem : mémoire virtuelle du process

Sans oublier

- Composants matériels, réseau...etc
  - /proc/cpuinfo : informations sur le CPU
  - /proc/meminfo : information sur la mémoire physique
  - /proc/vmstats : information sur la mémoire virtuelle
  - /proc/mounts : information sur les mounts
  - /proc/filesystems : information sur les systèmes de fichiers actifs
  - /proc/uptime : uptime du système
  - /proc/cmdline : command line du noyau
- Debugging

Création d'un fichier

```
static inline struct proc_dir_entry *proc_create(
        const char *name, umode_t mode,
        struct proc_dir_entry *parent,
        const struct file_operations *proc_fops);
```

- name : nom du fichier à créer
- mode : droit d'accès
- parent : entrée parente dans le procfs (NULL si à la racine)
- file_operations : une structure contenant les pointeurs des fonctions utilisables

Création d'une arborescence

Support des chemins complexes (`/proc/un/chemin/complexe`)

```
struct proc_dir_entry *proc_mkdir(const char *name,
        struct proc_dir_entry *parent);
```

- name : nom du répertoire
- parent : entrée parente dans l'arborescence

Suppression

```
void remove_proc_entry(const char* name,
        struct proc_dir_entry* parent);
```

- name : nom du fichier
- parent : entrée parente dans l'arborescence

Accès aux fichiers

```
struct file_operations proc_fops;
proc_fops->read = votre_fonction_read;
proc_fops->write = votre_fonction_write;
```

- Prototype de la fonction `read()`

```
ssize_t (*read) (struct file *, char __user *, size_t, loff_t *);
```

- Prototype de la fonction `write()`

```
ssize_t (*write) (struct file *, const char __user *,
                  size_t, loff_t *);
```

Exemple de fonction read()

```
ssize_t fops_read(struct file *file, char __user * buffer,
        size_t count, loff_t * ppos) {
    int errno=0;
    int copy;

    if (count > TAILLE) count=TAILLE;
    if ((copy=copy_to_user(buffer, message, strlen(message)+1)))
        errno = -EFAULT;
    printk(KERN_INFO "message read, %d, %p\n", copy, buffer);
    return count-copy;
}
```

Fonction write()

```
int write_func(struct file* file, const char __user * buffer,
        size_t count, loff_t *offset);
```

- file : décrit le fichier à écrire
- buffer : zone mémoire où écrire les données
- count : max octets à écrire dans buffer
- offset : position dans le fichier

Exemple de fonction write()

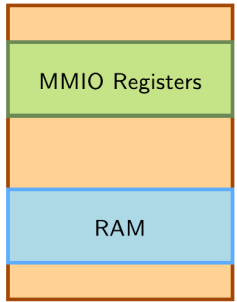
```
ssize_t fops_write(struct file * file, const char __user * buffer,
        size_t count, loff_t * ppos) {
    int len = count;

    if (len > TAILLE) len = TAILLE;

    printk(KERN_INFO "Recieving new messag\n");
    if (copy_from_user(message, buffer, count)) {
        return -EFAULT;
    }
    message[count] = '\0';
    size_of_message = strlen(message);
    printk(KERN_INFO "New message : %s\n", message);
    return count;
}
```

Les entrées/sorties

Memory-mapped I/O vs Port I/O



Physical Memory address space, accessed with normal load/store instructions

Separate I/O address space, accessed with specific instructions

Port I/O

- Chaque périphérique est connecté à un bus d'I/O et dispose de ces propres adresses
- On appelle ces adresses les "ports d'E/S" (I/O ports)
- Le noyau permet de lire et écrire sur le bus d'I/O avec des routines spécifiques
- On peut réserver des ports afin qu'un module ait l'exclusivité de leur utilisation

Utilisation des Port I/O

- Récupérer un octet depuis le port définit par l'adresse `read_addr`
  `int inb(int read_addr)`
- Envoie l'octet `value` sur le port défini par l'adresse `write_addr`
  `int inb(int write_addr, char value)`
- Une routine par type (b pour byte, w pour mot de 16 bits, l pour mot de 32 bits)

Exemple

```
/* default is the first printer port on PC's */
static unsigned long base = 0x378;
/* Version-specific methods for the fops structure. */
ssize_t short_write(struct file *filp, const char __user *buf, size_t count, loff_t *f_pos) {
    int retval = count;
    unsigned char *kbuf = kmalloc(count, GFP_KERNEL), *ptr;

    if (!kbuf) return -ENOMEM;
    if (copy_from_user(kbuf, buf, count)) return -EFAULT;
    ptr = kbuf;
    while (count--) {
        outb(*(ptr++), base);
        wmb();          // write memory barrier
    }

    return retval;
}

struct file_operations short_fops = {
    .owner = THIS_MODULE,
    .write = short_write
};
```

Memory-Mapped I/O

- Les périphériques modernes contiennent un petit espace de mémoire adressable.
  - Des registres de contrôle (similaires aux ports d'E/S)
  - Du stockage de données (textures video, paquets réseau, ...)
  - etc...
- Le noyau permet de mapper cet espace dans l'espace mémoire
- On appelle ce mapping la mémoire d'E/S (I/O memory)

Utilisation de la MMIO

- Mapping :

```
struct resource *request_mem_region(unsigned long start,
        unsigned long len, char *name);
```

- Démapping :

```
void release_mem_region(unsigned long start, unsigned long len);
```

- Test de disponibilité :

```
int check_mem_region(unsigned long start, unsigned long len);
```

- Remapping :

```
void *ioremap(unsigned long phys_addr, unsigned long size);
```

  - Le pointeur obtenu pointe vers la mémoire du périphérique
  - On ne doit pas utiliser ce pointeur comme n'importe quel pointeur, à cause de problèmes d'optimisation matériel (reordering des instructions)

Communication avec la mémoire d'I/O

- Lire :

```
unsigned int ioread8(void *addr);
unsigned int ioread16(void *addr);
unsigned int ioread32(void *addr);
```

- Écrire :

```
void iowrite8(u8 value, void *addr);
void iowrite16(u16 value, void *addr);
void iowrite32(u32 value, void *addr);
```

- En boucle :

```
void ioread8_rep(void *addr, void *buf, unsigned long count);
...
```

Les Interruptions

Interruptions

- Permet d'associer un numéro d'interruption (`irq`) à une fonction `handler` qui traite cette interruption pour le compte du driver du périphérique `devname` repéré par son identifiant `dev_id`
- La fonction de gestion de l'interruption retourne :
  - `IRQ_HANDLED` si l'interruption a été traitée correctement
  - `IRQ_NONE`

```
#include <linux/sched.h>

int request_irq(unsigned int irq,
        void (*handler) (int, void , struct pt_regs *),
        unsigned long flags /* SA_INTERRUPT ou SA_SHIRQ */,
        const char *device, void *dev_id);

void free_irq(unsigned int irq, void *dev_id);
```

Les timers

- Création d'un timer logiciel programmé

```
void timer_setup(struct timer_list *timer,
        void (*callback)(struct timer_list *), unsigned int flags)
```

- Active le timer et donne le moment en nombre de ticks depuis le démarrage du système où doit être déclenché le timer

```
int mod_timer(struct timer_list * timer, unsigned long expires)
```

  - Si l'on veut déclencher le timer dans 100 ticks, `expires` vaut `jiffies+100`
  - Il faut réarmer le timer dans la fonction de gestion si l'on veut un timer périodique
  - On peut convertir les jiffies en millisecondes avec `msecs_to_jiffies()`

Exemple

```
#include <linux/timer.h>
#define INTERVALLE 100

static struct timer_list timer;

static void montimer(struct timer_list *t) {
    ...
    /* Il faut réarmer le timer si l'on veut un appel périodique */
    mod_timer(&timer,jiffies + INTERVALLE);
    ...
}

static int __init module_init(void) {
    ...
                timer_setup(&timer, montimer, 0);
    mod_timer(&timer, jiffies + INTERVALLE);
}
```

Gestion des interruptions longues

- Parfois le traitement à effectuer lors d'une interruption peut être très long
- Le noyau doit rester le moins longtemps possible dans une routine d'interruption (blocage du système)
- Traitement en deux temps :
  - Partie top-half : acquittement rapide de l'interruption et ajout du traitement à effectuer dans une liste de tasklet (faible latence) ou une file de traitements (worqueue)
  - Partie bottom-half : gestion différée (asynchrone) du traitement de l'interruption par la tasklet ou la workqueue

Tasklets

- Les tasklets sont des appels effectués uniquement dans un contexte d'interruption
- Créer une tasklet revient à faire une demande au noyau pour exécuter une tâche atomique de manière différée
  - En fonction de sa disponibilité
  - Jamais au delà d'un tick

Tasklets

- Déclarer la *tasklet name*, de l'associer à la fonction `func` en lui passant les données `data`
  `DECLARE_TASKLET(name, func, data)`
- Demande l'exécution de la tasklet
  `tasklet_schedule(&name)`
- Demande d'exécution haute priorité à n'utiliser que dans le cadre de pilote faible latence tels que les buffer audio.
  `tasklet_hi_schedule(&name)`
- Inhiber une tasklet
  `DECLARE_TASKLET_DISABLED(), tasklet_disable(), tasklet_disable_nosync()`
- Permet de la réactiver
  `tasklet_enable()`
- Permet de la supprimer
  `tasklet_kill()`

Exemple

```c
#include <linux/interrupt.h>

void tasklet_function(unsigned long);

char tasklet_data[64];

DECLARE_TASKLET(test_tasklet, tasklet_function, (unsigned long) &tasklet_data);

void tasklet_function(unsigned long data) {
    struct timeval now;
    do_gettimeofday(&now);
    printk("%s at %ld,%ld\n", (char *) data, now.tv_sec, now.tv_usec);
}

int init_module(void) {
    sprintf(tasklet_data,"%s\n", "Linux tasklet called in init_module");
    tasklet_schedule(&test_tasklet);
}
```

Les workqueues

- Fonctionnent dans le contexte d'un processus noyau
  - Plus de souplesse quant à la possibilité d'être interrompues/reprises
- Peuvent s'exécuter de manière différée
- Création :
  `create_workqueue(name)`
  - Créé la file et renvoit un pointeur sur une structure `struct workqueue_struct`
- Destruction :
  `void destroy_workqueue(struct workqueue_struct *queue)`
  - Permet de détruire une file

Utilisation des workqueues

- Déclare la workqueue en associant une fonction à exécuter à un nom de workqueue
  `DECLARE_WORK(nom,fonction,donnees)`
- Met la tâche dans la file pour une exécution immédiate
  ```
  int queue_work(struct workqueue_struct *wq, struct work_struct *work)
  ```
- Met la tâche dans la file pour une exécution différée
  ```
  int queue_delayed_work(struct workqueue_struct *wq,
          struct work_struct *work, unsigned long delay)
  ```
- Supprimer une tâche
  ```
  int cancel_delayed_work(struct work_struct *work)
  ```
- Vider une file de travail
  ```
  void flush_workqueue(struct workqueue_struct *queue)
  ```