# Systèmes d'exploitation

Introduction: shell, noyau, syscalls

Guillaume Salagnac

Insa de Lyon – Informatique

## IF-3-SYS : Systèmes d'Exploitation

### Équipe pédagogique

<prenom.nom@insa-lyon.fr>

- Cours : Guillaume Salagnac
- TD/TP : GS + B. Barbe + P. Engélibert + L. Ledoux + L. Morel

**Objectifs du semestre**

- Comprendre les «concepts clés» des systèmes d'exploitation
  - quel est le problème ? pourquoi se pose-t-il ? même en 2026 ?
  - quelle sont la/les solutions ? pourquoi ça marche ?
  - ▶ prenez des notes en cours !
- Pratiquer leur usage
  - 4×2h TP de programmation C sous Linux
  - 4×2h TD sur papier
  - ▶ prenez des notes en TD/TP aussi !

### Ressources

- `http://moodle.insa-lyon.fr` > Informatique > IF-3
  - ▶ vidéos et diapos de CM ; sujets de TD/TP ; annales d'examen
- Permanence en salle 208 le jeudi de 13h à 14h



## Plan du semestre

- Chap 1 Noyau, processus, appels système
  - TP manipulation de processus : `fork()`, `exec()`, `waitpid()`

Vacances d'hiver 16/02/2026 .. 22/02/2026

- Chap 2 Multitâche, temps partagé, ordonnancement
  - TD ordonnancement de processus
- Chap 3 Mémoire virtuelle, isolation, pagination à la demande
  - TP allocation et entrées-sorties fichier avec `mmap()`
- Chap 4 Allocation dynamique
  - TP implémentation de `malloc()` et `free()`

Vacances de printemps 06/04/26 .. 19/04/26

- Chap 5 Concurrence et synchronisation
  - TD algorithmes concurrents avec mutex et moniteurs
  - TP programmation avec `pthreads`
- Chap 6 Stockage et systèmes de fichiers
  - TD chemins relatifs vs absolus, FAT, inodes
- TD révisions, questions/réponses, examen blanc

Examen final (1h30, coeff 2) 09/06/2026



## Évaluation

### Contrôle «continu»

- sous forme de QCM Moodle hors séances
- questions de compréhension et petits exercices
  - dont des questions sur les TD/TP
- sans documents sauf une feuille A4 recto-verso manuscrite
- plusieurs contrôles au fil de l'eau pendant le semestre
- anciens sujets sur Moodle

### Examen final

- épreuve écrite de 1h30 le 09/06
- sans documents sauf une feuille A4 recto-verso manuscrite
- anciens sujets sur Moodle

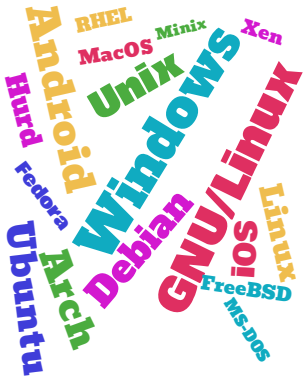


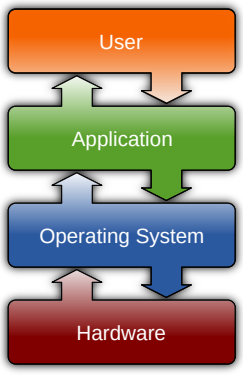
## Plan





## Vous avez dit «Système d'exploitation» ?



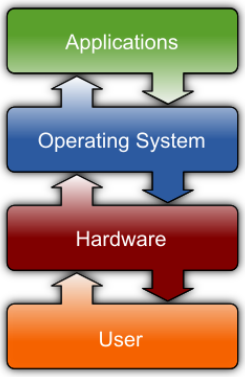
## Quelques définitions

Utilisateur = l'humain devant la machine
- suivant le contexte : utilisateur final, ou développeur
- interagit directement... avec le matériel !

Applications = les logiciels avec lesquels veut interagir l'utilisateur final
- messagerie, traitement de texte, lecteur de musique, etc

Matériel = la machine physique

Et donc : Operating System = tout le reste
- logiciel d'infrastructure : «noyau», «pilotes», «services», etc
- «entre le matériel et les applications»






## Rôle de l'OS : les deux fonctions essentielles

et largement interdépendantes !

**Machine virtuelle**
- cacher la complexité sous une interface «plus jolie»
- fournir certains services de base aux applications
  - IHM, stockage persistant, accès internet, gestion du temps
- permettre la portabilité des programmes
  - pouvoir lancer un même exécutable sur différents matériels

**Gestionnaire de ressources**
- partager chaque ressource entre les applications
- exploiter «au mieux» les ressources disponibles
- assurer la protection des applications (et du système)



## Plan



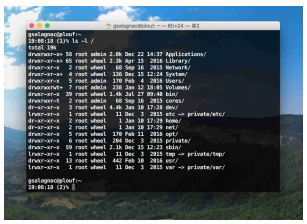


## Interface entre OS et utilisateur : le shell

Les services offerts par un shell :
- exécution de programmes
  - charger un programme en mémoire, le lancer, l'arrêter
  - choisir quel programme est au premier-plan
- exploration et administration des espaces de stockage
  - naviguer dans les fichiers, copier, supprimer
- confort et ergonomie
  - presse-papiers, drag-and-drop, corbeille
- ...



## Différents types de shell : l'interpréteur de commandes



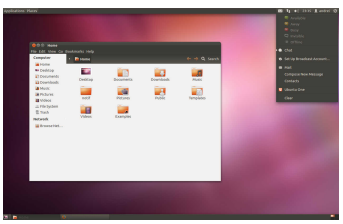
Attention : terminal (ou émulateur de terminal) ≠ shell !

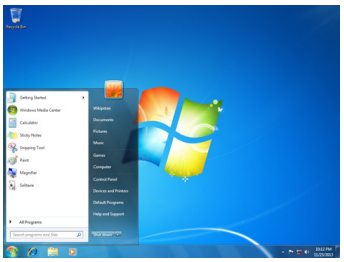
Interface textuelle = Command-Line Interface = CLI

exemples : Bourne shell (1977), bash, zsh...



## Différents types de shell : le bureau graphique

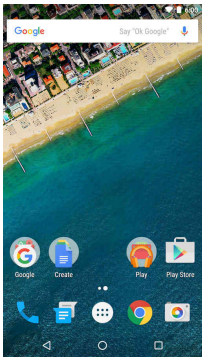


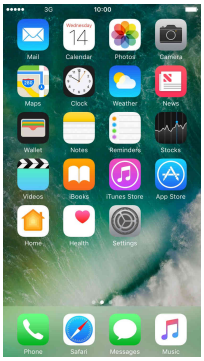


Interface graphique = Graphical User Interface = GUI

exemples : Gnome, bureau de Windows, Aqua (Mac OSX)...

## et encore : l'écran d'accueil du smartphone





exemples : Android Launcher, Nova Launcher, Square Home...



## Conclusion : le shell

différents types de shell : CLI vs GUI à souris vs GUI tactile
- ▶ fonctionnalités similaires
- ▶ pour l'OS : une «application» comme les autres !

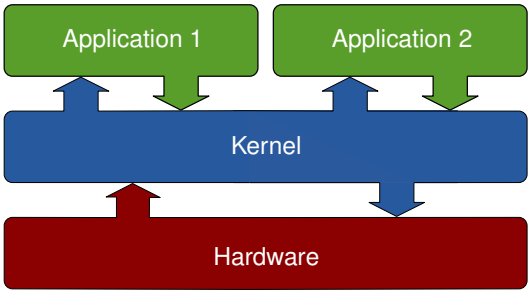
votre OS contient volontiers des applications pré-installées...
- shell, navigateur web, explorateur de fichiers, messagerie, lecteur multimedia, app store, etc

... et aussi plein de «programmes système» :
- développement : compilateur, assembleur, linker, etc
- sécurité : antivirus, pare-feu, sauvegarde
- maintenance : mise à jour, panneau de configuration
- services réseau : web, base de données, accès distant

Remarque :
dorénavant je vais appeler tous ces programmes des applications



## Positionnement de l'OS




**Définition : Noyau**, ou en VO kernel
Le noyau c'est la partie de l'OS qui n'est pas une application



## Plan





## Vous avez dit «une interface plus jolie» ?

et c'est vraiment cette formule qui est donnée dans les livres :

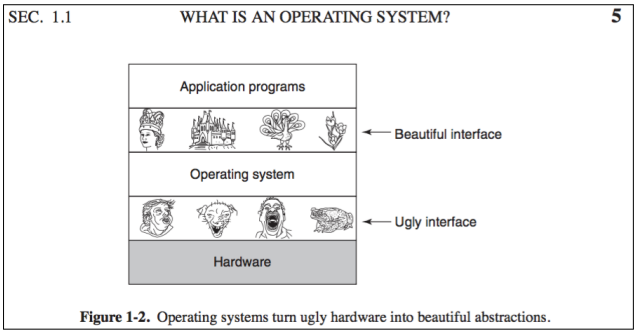



**Figure 1-2.** Operating systems turn ugly hardware into beautiful abstractions.

source : Tanenbaum. *Modern Operating Systems (4th ed, 2014)*. page 5



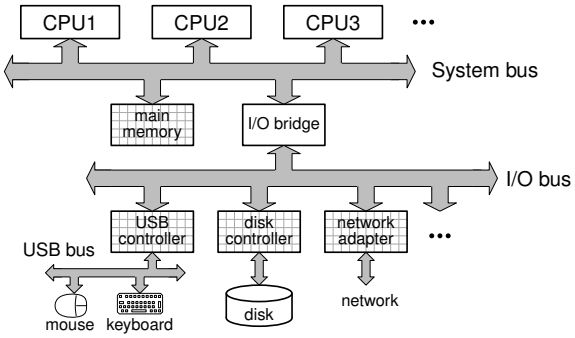
## Un exemple de programme : la commande `cat`

```
int main() {
    char buffer[100];
    int n;

    int fd=open("filename.txt", O_RDONLY);
    if(fd == -1)
        exit(1);

    n=read(fd, buffer, 100);
    while( n > 0) {
        write(STDOUT, buffer, n);
        n=read(fd, buffer, 100);
    }
    exit(0);
}
```

## Architecture d'une machine typique



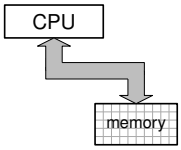



## Langage de programmation vs langage machine

```
00401be5 <main>:
  401be5:       55                      push   %rbp
  401be6:       48 89 e5                mov    %rsp,%rbp
  401be9:       48 83 ec 70             sub    $0x70,%rsp
  401bed:       be 00 00 00 00          mov    $0x0,%esi
  401bf2:       bf 10 20 48 00          mov    $0x482010,%edi
  401bf7:       b8 00 00 00 00          mov    $0x0,%eax
  401bfc:       e8 7f c5 03 00          callq  43e180 <__libc_open>
  401c01:       89 45 f8                mov    %eax,-0x8(%rbp)
  401c04:       83 7d f8 ff             cmpl   $0xffffffff,-0x8(%rbp)
  401c08:       75 0a                   jne    401c14 <main+0x2f>
  401c0a:       bf 01 00 00 00          mov    $0x1,%edi
  401c0f:       e8 7c 6a 00 00          callq  408690 <exit>
  401c14:       48 8d 4d 90             lea    -0x70(%rbp),%rcx
  401c18:       8b 45 f8                mov    -0x8(%rbp),%eax
  401c1b:       ba 64 00 00 00          mov    $0x64,%edx
  401c20:       48 89 ce                mov    %rcx,%rsi
  401c23:       89 c7                   mov    %eax,%edi
  401c25:       e8 86 c6 03 00          callq  43e2b0 <__libc_read>
  401c2a:       89 45 fc                mov    %eax,-0x4(%rbp)
  401c2d:       eb 30                   jmp    401c5f <main+0x7a>
  401c2f:       8b 45 fc                mov    -0x4(%rbp),%eax
```



## Applications = CPU en «mode restreint»




**Rappel : le cycle de Von Neumann**

while True do :
- charger une instruction depuis la «mémoire»
- décoder ses bits : quelle opération, quelles opérandes, etc
- exécuter l'opération et enregistrer le résultat

repeat

**Définition : restricted mode = slave mode = ring 3 = user mode**

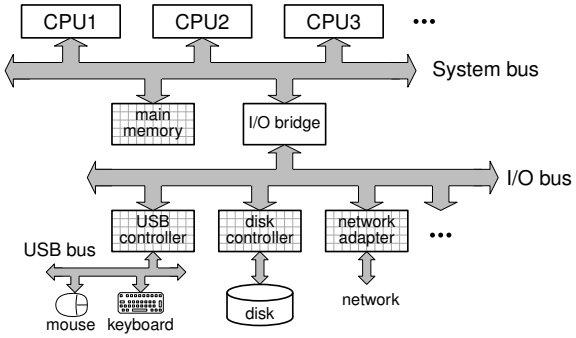
- vue partielle de la machine : 1 CPU + 1 mémoire
- certaines instructions interdites, certaines adresses interdites
- utile pour exécuter sereinement du code applicatif

- instructions disponibles : opérations ALU, accès mémoire, sauts

`ADD R1 <- R3, R4` `WRITE [R8] <- R5` `CALL 123456`



## Noyau = CPU en «mode superviseur»



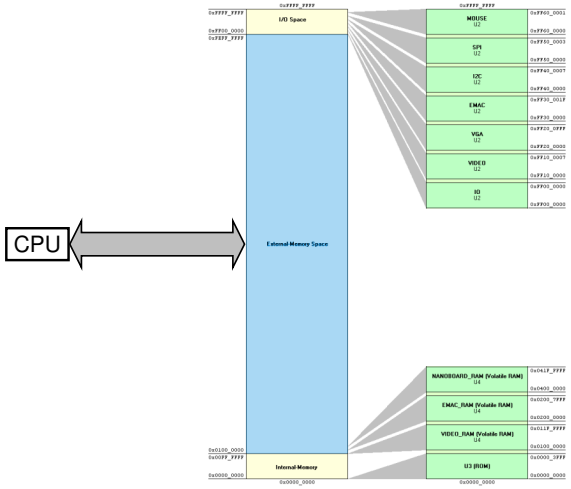

**Définition : supervisor mode = ring 0 = kernel mode = privileged mode**

- accès direct au matériel : nécessaire pour le noyau et les drivers
- SW↦HW = Memory-mapped I/O  HW↦SW = Interruptions

- mode par défaut au démarrage de la machine (boot)

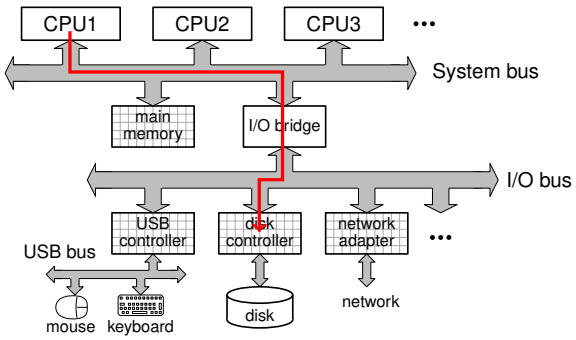


## Accès au matériel = Memory-mapped Input/Output



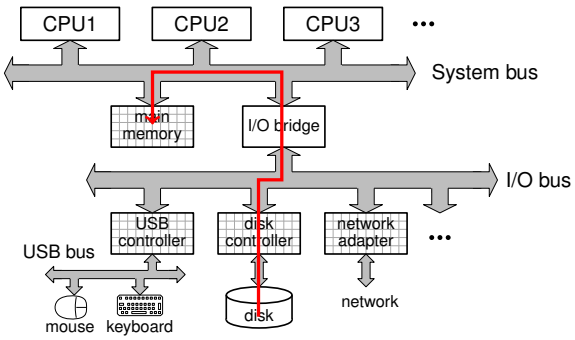



## Exemple : lecture sur le disque 1/3 MMIO




Pour initier l'opération, le CPU écrit une requête à l'addresse mémoire du contrôleur de disque.
requête = commande + nº de bloc + addr. mem destination

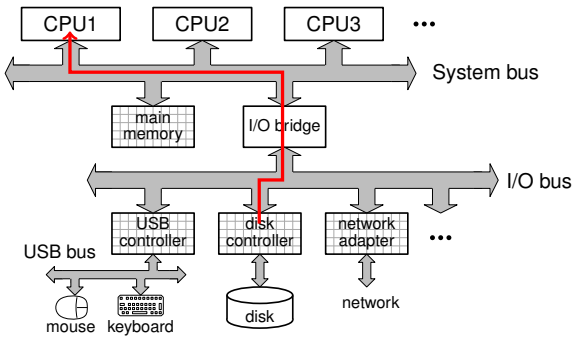
## Exemple : lecture sur le disque 2/3 DMA




Le contrôleur de disque lit le secteur demandé et transfère les données directement en mémoire vive à l'adresse voulue : c'est un transfert DMA (Direct Memory Access)



## Exemple : lecture sur le disque 3/3 IRQ




À la fin du transfert DMA, le contrôleur du périphérique notifie le CPU en lui envoyant une Requête d'Interruption (IRQ)



## Un processeur avec support des interruptions

**Le cycle de Von Neumann avec interruptions**

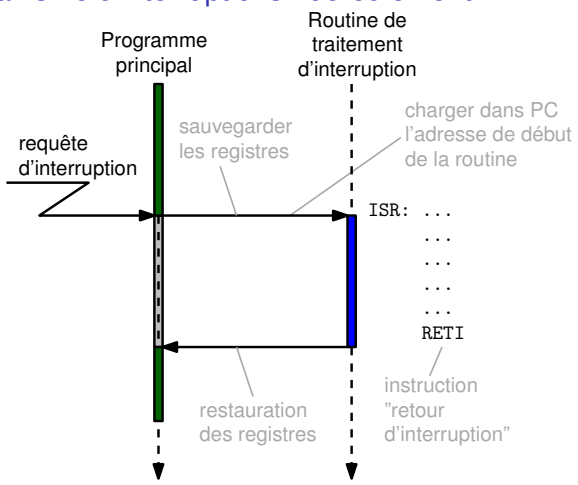
while True do :
- charger une instruction depuis la mémoire
- décoder ses bits : quelle opération, quelles opérandes, etc
- exécuter l'opération et enregistrer le résultat
- if interruption demandée then :
  - sauvegarder le contenu des registres
  - déterminer l'adresse de la routine de traitement
  - passer en mode superviseur
  - sauter à la routine = écrire son adresse dans le compteur ordinal
- endif

repeat

Note : à la fin de la routine de traitement, une instruction `RETI` repassera le CPU en *mode restreint*.



## Mécanisme d'interruptions : déroulement






## Mécanisme d'interruptions : vocabulaire

- IRQ = Interrupt Request
  - un «message» envoyé par un périphérique vers le processeur
  - de façon asynchrone (vs polling, inefficace)
  - chaque IRQ porte un numéro identifiant le périphérique d'origine
- ISR = Interrupt Service Routine
  - un fragment de programme (= séquence d'instructions) exécuté à chaque occurence de l'évènement matériel associé
  - termine toujours par une instruction `RETI` «retour d'interruption»
  - pendant une ISR : nouvelles IRQ temporairement mises en attente (permet au programmeur d'être «seul au monde»)
- Table des Vecteurs d'Interruptions
  - tableau de pointeurs indiquant l'adresse de chaque ISR
  - le CPU utilise le numéro d'IRQ pour savoir où sauter

**Définition : Noyau, ou en VO kernel**

Le noyau c'est (exactement) l'ensemble des ISR de la machine
- et de toutes les fonctions que celles-ci appellent



## Différentes sources d'interruptions

- Périphériques d'entrées-sorties
  - clavier, souris, disque, GPU, réseau, etc
- Pannes matérielles
  - température excessive, coupure de courant, etc
- Minuteur système, ou en VO System Timer
  - aka *Programmable interval timer*
  - interruptions périodiques, typiquement 100Hz ou 1000Hz
  - permet à l'OS de percevoir le passage du temps
  - bonus : permet au noyau de reprendre la main sur les applications (cf chap. 2)
- Évènements logiciels exceptionnels
  - erreurs fatales : division par zéro, instruction invalide, etc
  - trappes volontaires : appels système (cf diapos suivantes)
  - fautes de pages : constatées par la MMU (cf chap 3)

## Plan





## Changement de mode d'exécution : trappes

Problème : comment une application peut-elle invoquer une méthode du noyau ?

Mauvaise solution : autoriser les applications à sauter vers les fonctions situées dans le noyau

- destination arbitraire ▶ failles de sécurité
- passage en mode superviseur ▶ quand ? comment ?

Solution : se donner une instruction spécialisée pour cet usage

- exemples : `TRAP` (68k), `INT` (x86), `SWI` (ARM), `SYSCALL` (x64)
- interruption logicielle = trappe = exception
- fonctionnement : similaire aux autres types d'interruption
  - sauvegarde en mémoire l'état du CPU
  - bascule vers mode superviseur
  - branche dans le noyau vers une adresse bien connue



## Appel système : principe

**Appel système, ou en VO system call = syscall**

Fonction située dans le noyau, invoquée par un processus utilisateur via une interruption logicielle

Côté application :

- l'appel est invoqué avec une instruction `TRAP`
- indifférent au langage de programmation utilisé
- encapsulation dans des fonctions de bibliothèque (ex : libc)

Côté noyau :

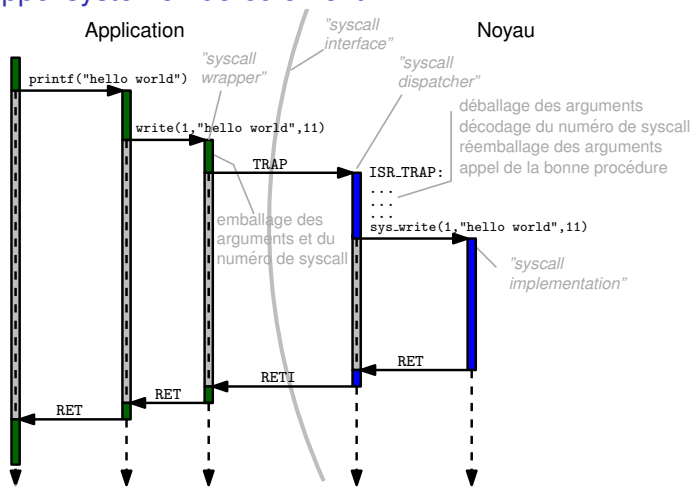
- on passe à chaque fois par l'ISR de `TRAP`
- qui appelle la bonne fonction dans le noyau,
- puis qui rend la main à l'application avec `RETI`

Exemples :

- `read()`, `write()`, `fork()`, `gettimeofday()`...
- plusieurs centaines en tout sous Linux



## Appel système : déroulement






## Appel système : langage machine

```
00410700 <__libc_read>:
  410700:       f3 0f 1e fa             endbr64
  410704:       80 3d 6d f3 08 00 00    cmpb   $0x0,0x8f36d(%rip)
  41070b:       74 13                   je     410720 <__libc_read+0x20>
  41070d:       31 c0                   xor    %eax,%eax
  41070f:       0f 05                   syscall
  410711:       48 3d 00 f0 ff ff       cmp    $0xfffffffffffff000,%rax
  410717:       77 4f                   ja     410768 <__libc_read+0x68>
  410719:       c3                      ret
  41071a:       66 0f 1f 44 00 00       nopw   0x0(%rax,%rax,1)
  410720:       55                      push   %rbp
  ...           ...

004107a0 <__libc_write>:
  4107a0:       f3 0f 1e fa             endbr64
  4107a4:       80 3d cd f2 08 00 00    cmpb   $0x0,0x8f2cd(%rip)
  4107ab:       74 13                   je     4107c0 <__libc_write+0x20>
  4107ad:       b8 01 00 00 00          mov    $0x1,%eax
  4107b2:       0f 05                   syscall
  4107b4:       48 3d 00 f0 ff ff       cmp    $0xfffffffffffff000,%rax
  4107ba:       77 54                   ja     410810 <__libc_write+0x70>
  4107bc:       c3                      ret
```



## Notion de processus

Applications exécutées sur la «machine virtuelle userland» :

- jeu d'instructions restreint (CPU en mode utilisateur)
  - pas accès au mécanisme d'interruptions
- accès interdit à certaines adresses mémoire
  - ex : code et données du noyau, périphériques matériels

Protection par «sandboxing» : une nouvelle instance de cette machine virtuelle pour chaque application en cours d'exécution

- CPU virtuel (cf chap 2), mémoire virtuelle (cf chap 3)
- périphériques : accessibles seulement au travers du noyau

**Notion de processus (ou en VO process)**

« Un programme en cours d'exécution »

Système d'exploitation = illusionniste (VM) + sous-traitant (HW)

## Notion de processus : remarques

Intuitions :

- un processus = un programme + son état d'exécution
- état d'exécution = valeurs des registres + contenu mémoire + «contexte d'exécution»

Le noyau :

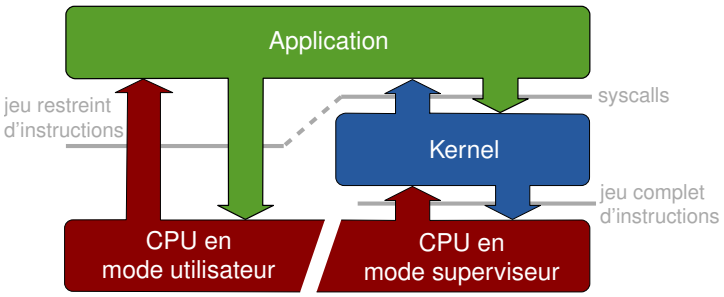
- partage les ressources matérielles entre les processus
- crée/recycle les processus lorsqu'on lui demande
  - dans le noyau : un Process Control Block par processus vivant
  - PCB = carte d'identité du processus ▶ stocke le contexte : numéro (PID), répertoire courant, liste des fichiers ouverts...

À faire chez vous :

- essayer les commandes `ps aux` et `top`
  - puis `man ps` et `man top`
- et aussi `strace ./monprogramme`



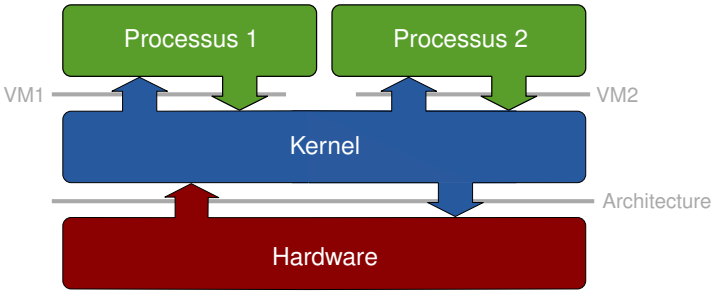
## La VM userland : en résumé




- code applicatif exécuté par CPU en mode utilisateur
- pour faire appel au noyau : interface des appels système



## Positionnement de l'OS




- chaque application qui s'exécute est un processus userland
- le noyau virtualise et arbitre les accès au matériel



## Plan





## Appels système : exemples

EXAMPLES OF WINDOWS AND UNIX SYSTEM CALLS

| | Windows | Unix |
|---|---|---|
| Process Control | CreateProcess()<br>ExitProcess()<br>WaitForSingleObject() | fork()<br>exit()<br>wait() |
| File Manipulation | CreateFile()<br>ReadFile()<br>WriteFile()<br>CloseHandle() | open()<br>read()<br>write()<br>close() |
| Device Manipulation | SetConsoleMode()<br>ReadConsole()<br>WriteConsole() | ioctl()<br>read()<br>write() |
| Information Maintenance | GetCurrentProcessID()<br>SetTimer()<br>Sleep() | getpid()<br>alarm()<br>sleep() |
| Communication | CreatePipe()<br>CreateFileMapping()<br>MapViewOfFile() | pipe()<br>shmget()<br>mmap() |
| Protection | SetFileSecurity()<br>InitializeSecurityDescriptor()<br>SetSecurityDescriptorGroup() | chmod()<br>umask()<br>chown() |

source : Silberschatz. *Operating Systems Concepts Essentials (2011)*. p 59



## Une fonction qui cache un syscall : getpid()

Pour connaître notre numéro de processus

```
#include <unistd.h>

int getpid(void);
```

Remarques :

- le noyau donne un numéro unique à chaque processus
- attribué à la création du processus. ne change jamais ensuite.
- stocké dans le PCB du processus

## Une fonction qui cache un syscall : exit()

**Pour cesser définitivement l'exécution du programme**

```
#include <stdlib.h>

void exit(int status);
```

Remarques :

- l'exécution ne «revient jamais» d'un appel à `exit()`
- `exit(n)` équivalent à un `return n` depuis le `main()`
- le «`exit status`» `n` est transmis au processus parent
  - convention : 0=OK, 1–255=erreur
  - stocké dans le PCB en attendant un syscall `wait()` du parent



## Une fonction qui cache un appel système : fork()

**Pour dupliquer le processus en cours**

```
#include <unistd.h>

int fork(void);
```

Remarques :

- sous unix : créer un processus $\neq$ changer de programme
- `fork()` duplique le processus qui a invoqué le syscall
  - processus d'origine = «parent», nouveau = «enfant»
- duplication intégrale de la machine virtuelle userland
  - CPU virtuel : les deux processus s'exécutent en concurrence
  - mémoire virtuelle : chacun s'exécute dans un espace privé
  - contexte : même répertoire courant, mêmes fichiers ouverts...

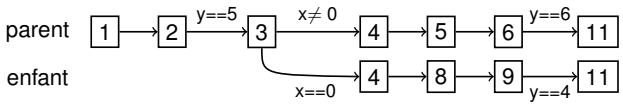
Paradigme *«Call once, return twice»*

- dans le nouveau processus `fork()` renvoie 0
- dans le parent, `fork()` renvoie le PID de l'enfant



## Appel système fork : illustration

```
1  // only one process
2  int y = 5 ;
3  int x = fork();
4  if ( x != 0 ) {
5    // parent only
6    y = y + 1;
7  } else {
8    // child only
9    y = y - 1;
10 }
11 // both processes
```






## Mon premier interpréteur de commandes

```
char command[...];
char  params[...];
main() {
    while(true) {
        print_prompt();
        read_command(&command, &params);
        x = fork();

        if (x == 0) { // we are the child process
           exec(command, params);
        } else { // we are the parent process
           wait(&status);
        }
    }
}
```



## Encore des appels système

D'autres exemples, qu'on reverra en TP :

`exec(filename)` charger un autre programme (exécutable) dans mon processus

`sleep(int num)` suspendre l'exécution de mon processus pendant `num` secondes

`wait(...)` «attendre» qu'un de mes processus enfants ait terminé son exécution

`getppid()` connaître le PID de son processus parent

`open(), read(), write()` accéder aux fichiers



## À retenir

### Architecture

- cycle de Von Neumann, MMIO, DMA, interruptions
- CPU avec *dual-mode operation* : mode restreint vs privilégié
- instruction `TRAP` pour lever une interruption

### Noyau

- l'ensemble des routines de traitement d'interruption (ISR)
  - en particulier le *syscall dispatcher*
- et des fonctions appelées par les ISR
  - en particuliers les *drivers* et les implems des syscalls

### Processus

- une «machine virtuelle» offerte aux applications
- vue simplifiée et restreinte de l'architecture

### Appels système

- interface entre les processus et le noyau
- accessibles via des fonctions de bibliothèque

OS = noyau + bibliothèques + programmes utilitaires