

# 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 : G.S., Romain Gallé, Paul Lachat, Lionel Morel

## Objectifs du cours

- Comprendre les «concepts clés» des systèmes d'exploitation
  - quel est le problème ? pourquoi se pose-t-il ?
  - 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 aussi !

## Ressources

- <http://moodle.insa-lyon.fr> > Informatique > IF-3
- diapos de CM ; sujets de TD et de TP ; vidéos des cours

# Plan du cours

- **Chap 1** Noyau, processus, appels système  
TP manipulation de processus : `fork()`, `exec()`, `waitpid()`
- **Chap 2** Multitâche, temps partagé, ordonnancement

Vacances d'hiver

26/02 .. 03/03

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()`
- **Chap 5** Synchronisation, concurrence, sémaphores  
TD algorithmes concurrents avec sémaphores

Vacances de printemps

15/04 .. 28/04

TP programmation avec `pthread`s

- **Chap 6** Stockage et systèmes de fichiers
- TD révisions, questions/réponses, examen blanc
- un TD/TP en rab'

Examen final

06/06

# Évaluation

## Contrôle «continu» 40%

- sous forme de QCM Moodle hors séances
- questions de compréhension et petits exercices
  - dont des questions sur les TD/TP
- plusieurs contrôles au fil de l'eau pendant le semestre
- anciens sujets sur Moodle

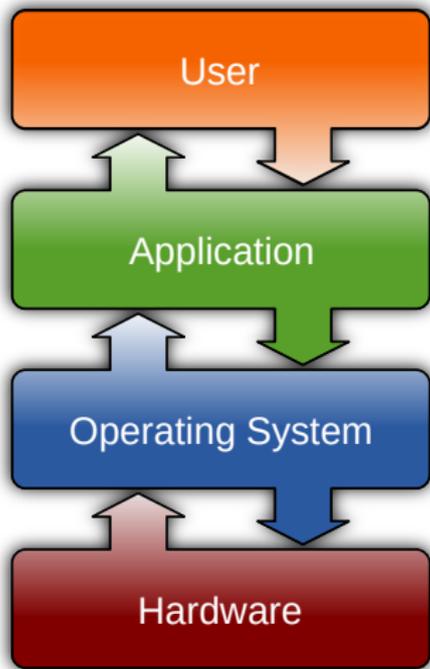
## Examen final 60%

- épreuve écrite de 1h30 le 6 juin
- sans documents **sauf une feuille A4 recto-verso manuscrite**
- anciens sujets sur Moodle

# Plan

1. Introduction : définition du terme «Système d'exploitation»
2. Interface entre OS et utilisateur : le shell
3. Interface entre logiciel et matériel : l'architecture
4. Isolation entre noyau et applications : les syscalls
5. Quelques syscalls UNIX incontournables

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 !

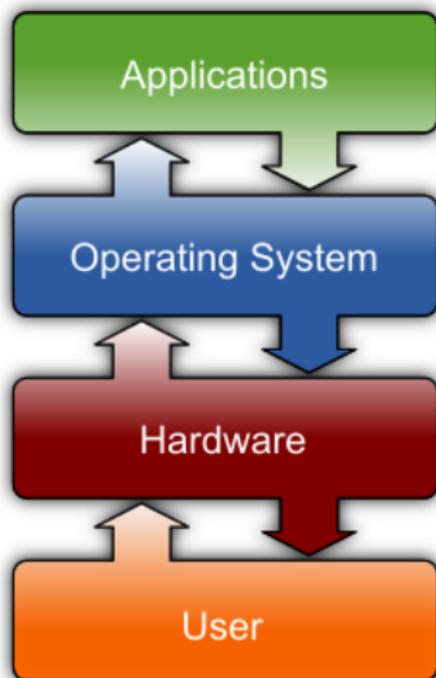
**Applications** = les logiciels avec lesquels veut interagir l'**utilisateur final**

- 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

1. Introduction : définition du terme «Système d'exploitation»
2. Interface entre OS et utilisateur : le shell
3. Interface entre logiciel et matériel : l'architecture
4. Isolation entre noyau et applications : les syscalls
5. Quelques syscalls UNIX incontournables

# 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



```
gsalagnac@plouf:~$ ls -l /
total 19K
drwxr-xr-x+ 58 root admin 2.8K Dec 22 14:37 Applications/
drwxr-xr-x+ 65 root wheel 2.3K Apr 15 2016 Library/
drwxr-xr-x  2 root wheel  68 Sep 16 2015 Network/
drwxr-xr-x+  4 root wheel 136 Dec 15 12:24 System/
drwxr-xr-x  5 root admin 170 Feb  4 2016 Users/
drwxr-xr-t+  7 root admin 238 Jan 12 18:05 Volumes/
drwxr-xr-x 39 root wheel 1.4k Jul 27 09:48 bin/
drwxr-xr-t  2 root admin  68 Sep 16 2015 cores/
dr-xr-xr-x  3 root wheel 4.4k Jan 18 17:28 dev/
lrwxr-xr-x  1 root wheel  11 Dec  3 2015 etc -> private/etc/
dr-xr-xr-x  2 root wheel  1 Jan 18 17:29 home/
dr-xr-xr-x  2 root wheel  1 Jan 18 17:29 net/
drwxr-xr-x  5 root wheel 170 Feb 11 2016 opt/
drwxr-xr-x  6 root wheel 284 Dec  3 2015 private/
drwxr-xr-x 59 root wheel 2.1k Dec 15 12:23 sbin/
lrwxr-xr-x  1 root wheel  11 Dec  3 2015 tmp -> private/tmp/
drwxr-xr-x 13 root wheel 442 Feb 18 2016 usr/
lrwxr-xr-x  1 root wheel  11 Dec  3 2015 var -> private/var/

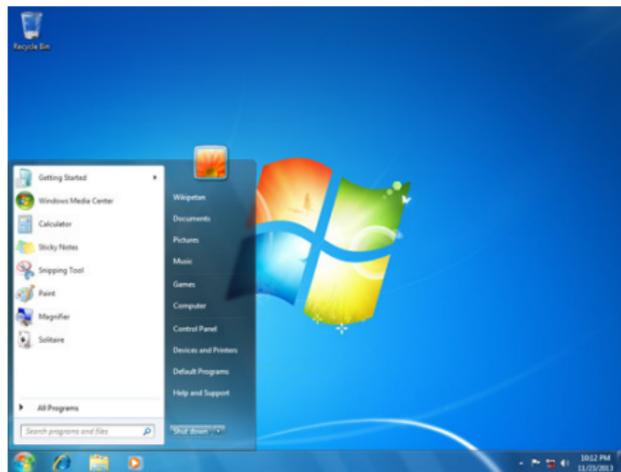
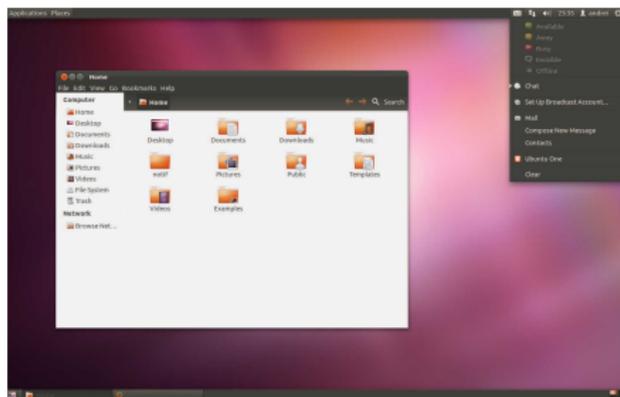
gsalagnac@plouf:~$
```

Attention : **terminal** (ou émulateur de terminal)  $\neq$  **shell** !

Interface textuelle = **Command-Line Interface** = CLI

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

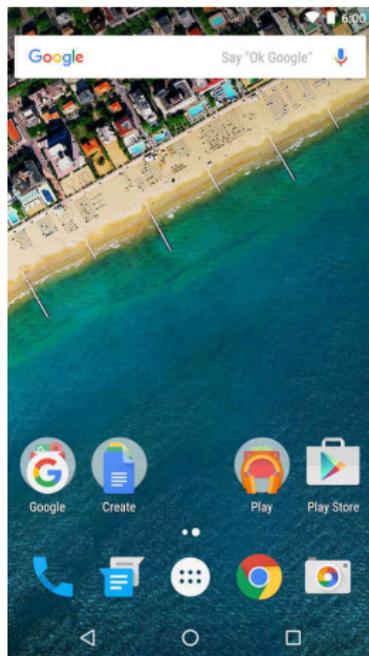
# Différents types de shell : le bureau graphique



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 !

vos OS contiennent volontiers des applications **pré-installées**...

- shell, navigateur web, explorateur de fichiers, messagerie, lecteur multimedia, app store, etc

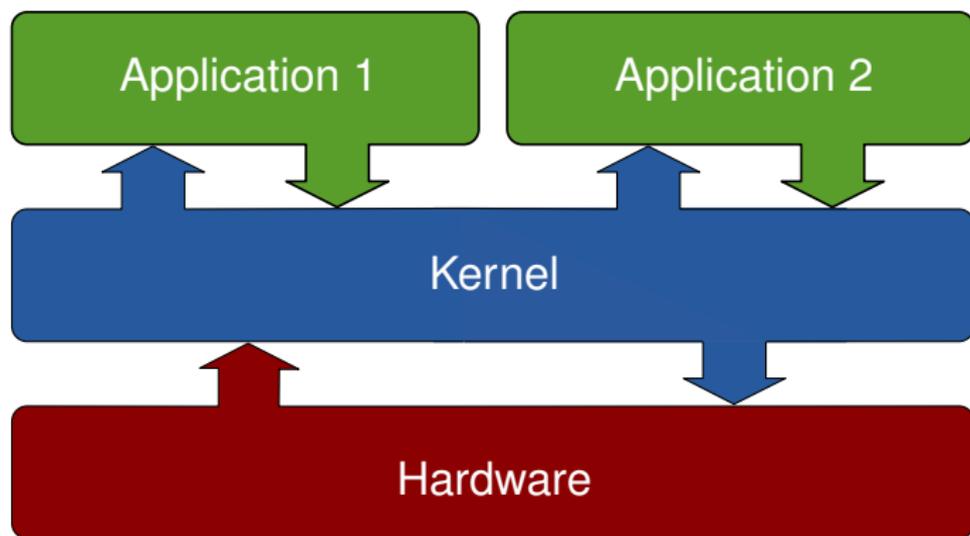
... et aussi plein de «**programmes système**» :

- 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

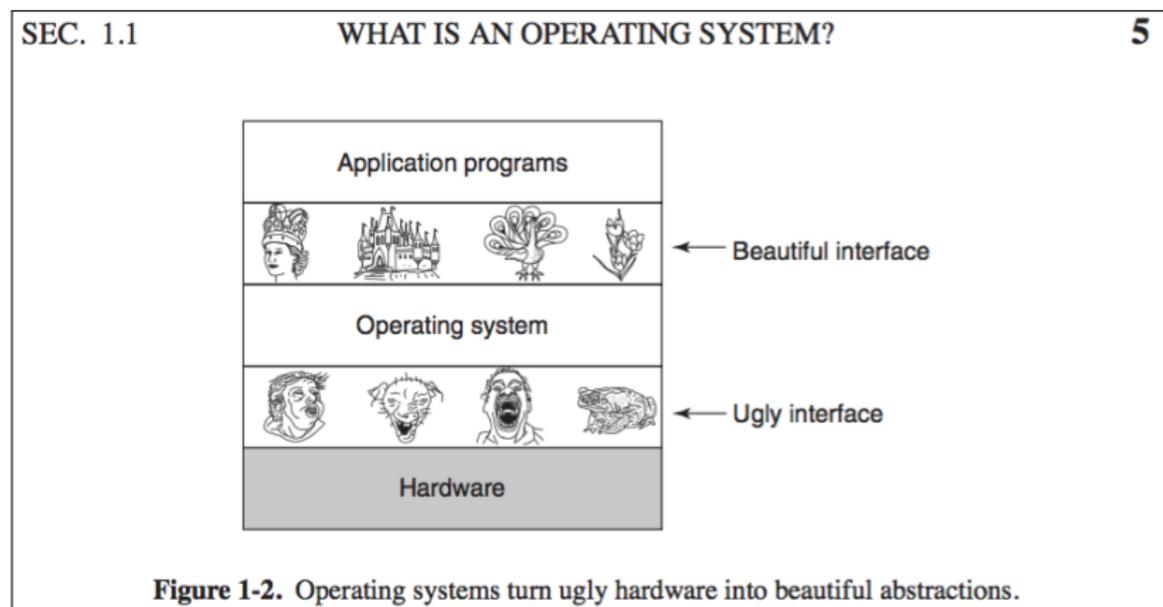
Le noyau c'est la partie de l'OS qui n'est pas une application

# Plan

1. Introduction : définition du terme «Système d'exploitation»
2. Interface entre OS et utilisateur : le shell
3. Interface entre logiciel et matériel : l'architecture
4. Isolation entre noyau et applications : les syscalls
5. Quelques syscalls UNIX incontournables

# 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

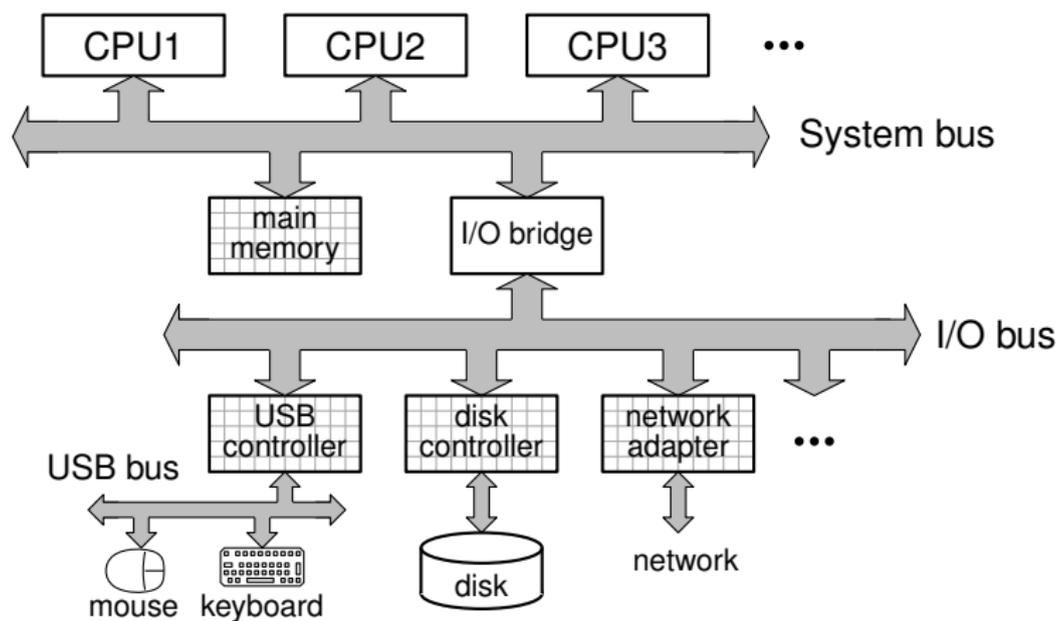
## Un exemple de programme : la commande cat

```
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

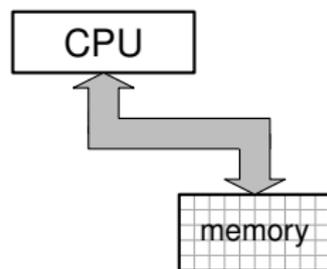


# Langage de programmation vs langage machine

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

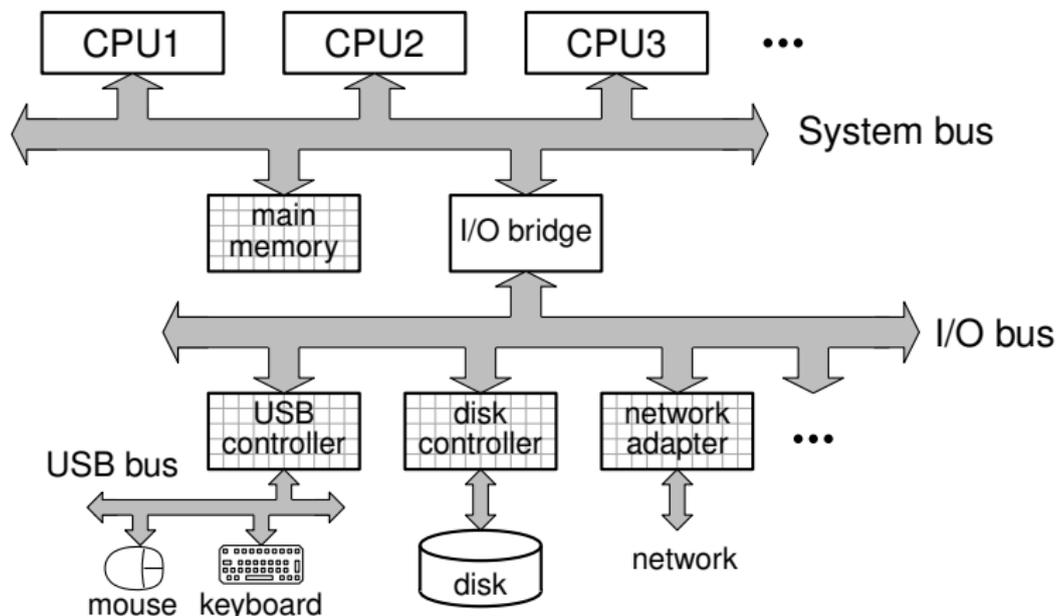
- vue **partielle** de la machine : 1 CPU + 1 mémoire
- certaines instructions **interdites**, certaines adresses **interdites**
- utile pour exécuter sereinement du code applicatif
- instructions disponibles : opérations ALU, accès mémoire, sauts

ADD R1 <- R3, R4

WRITE [R8] <- R5

CALL 123456

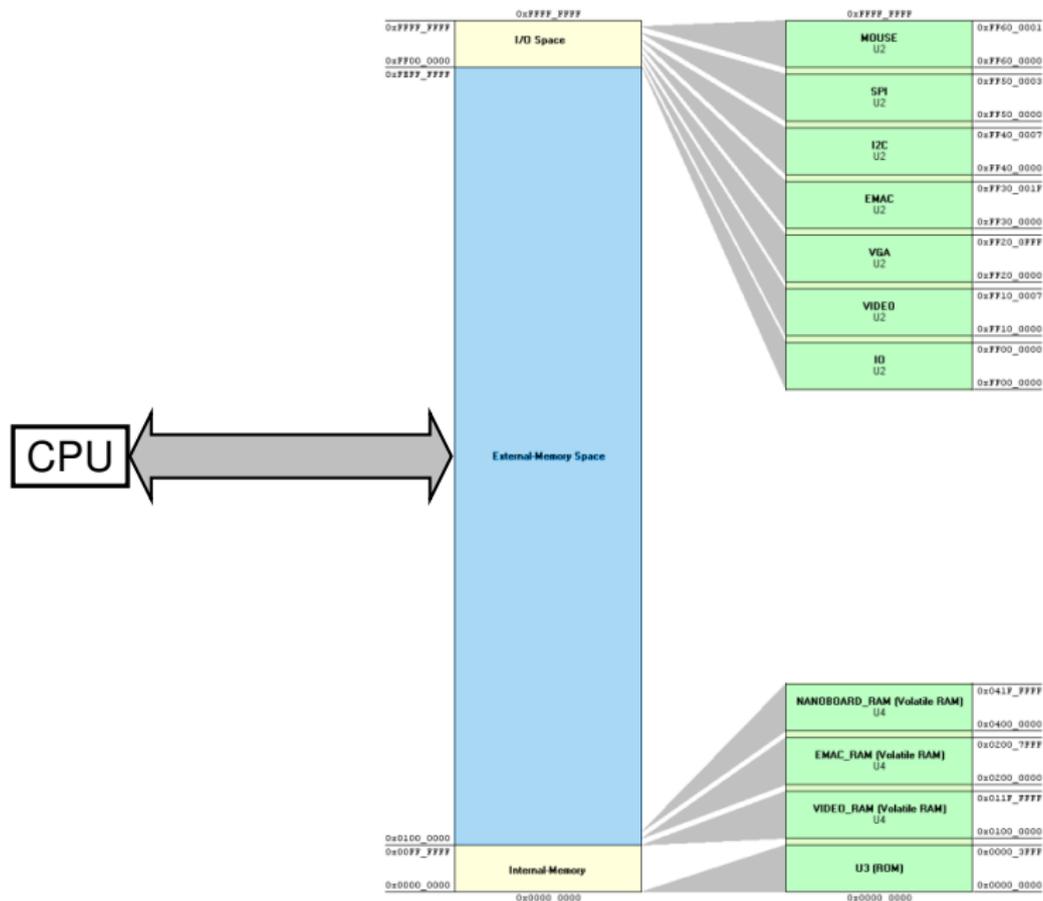
## Noyau = CPU en «mode superviseur»



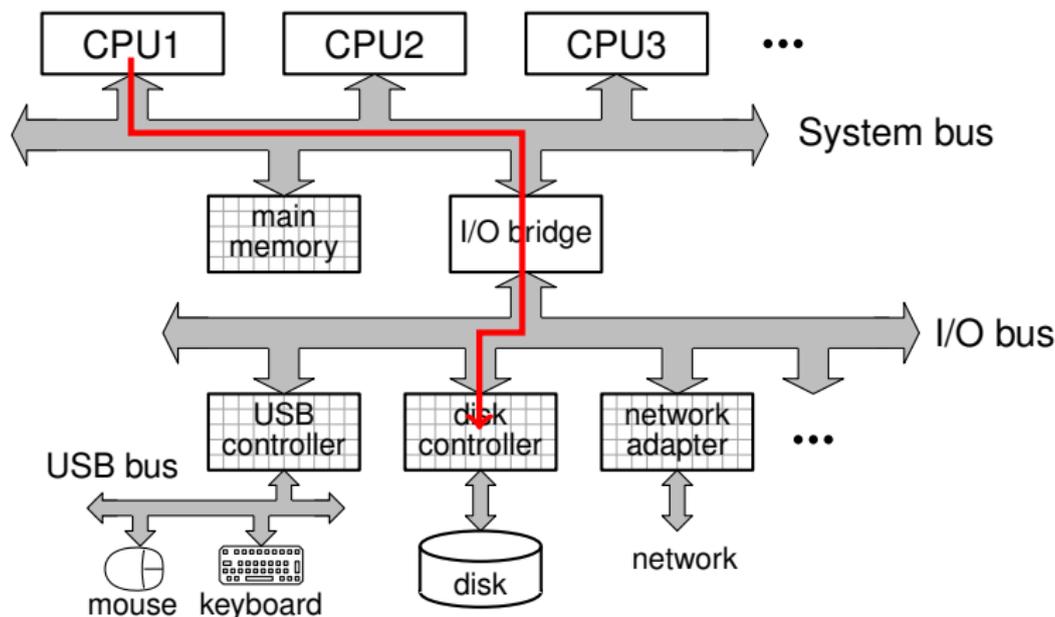
Définition : supervisor mode = ring 0 = kernel mode = privileged mode

- accès **direct** au matériel : nécessaire pour le noyau et les **drivers**
- SW<sub>→</sub>HW = Memory-mapped I/O      HW<sub>→</sub>SW = Interruptions
- mode par défaut au démarrage de la machine (boot)

# Accès au matériel = Memory-mapped Input/Output

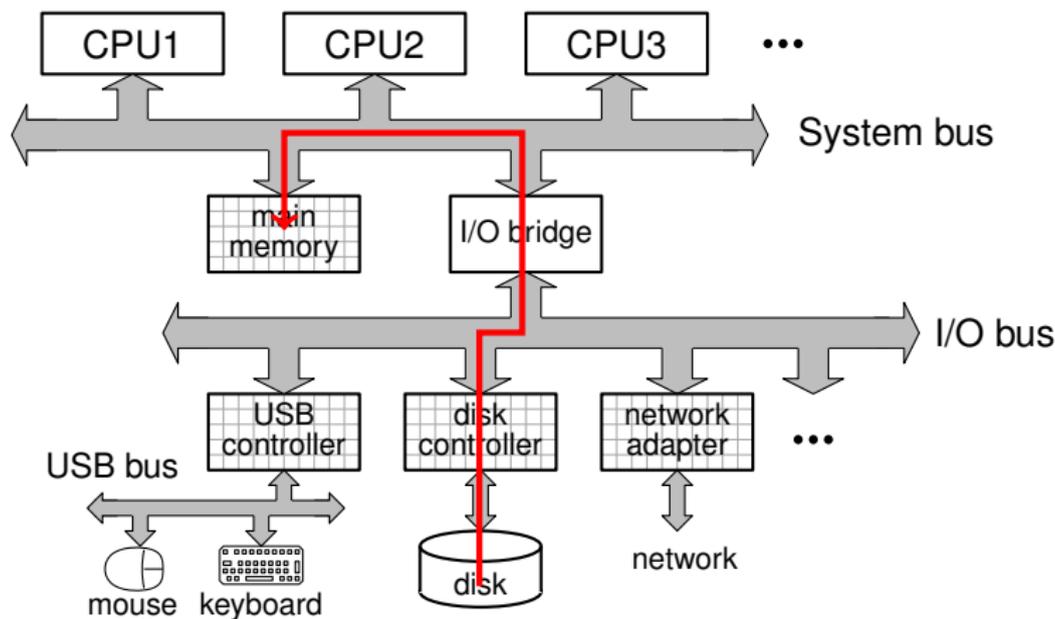


## Exemple : lecture sur le disque 1/3

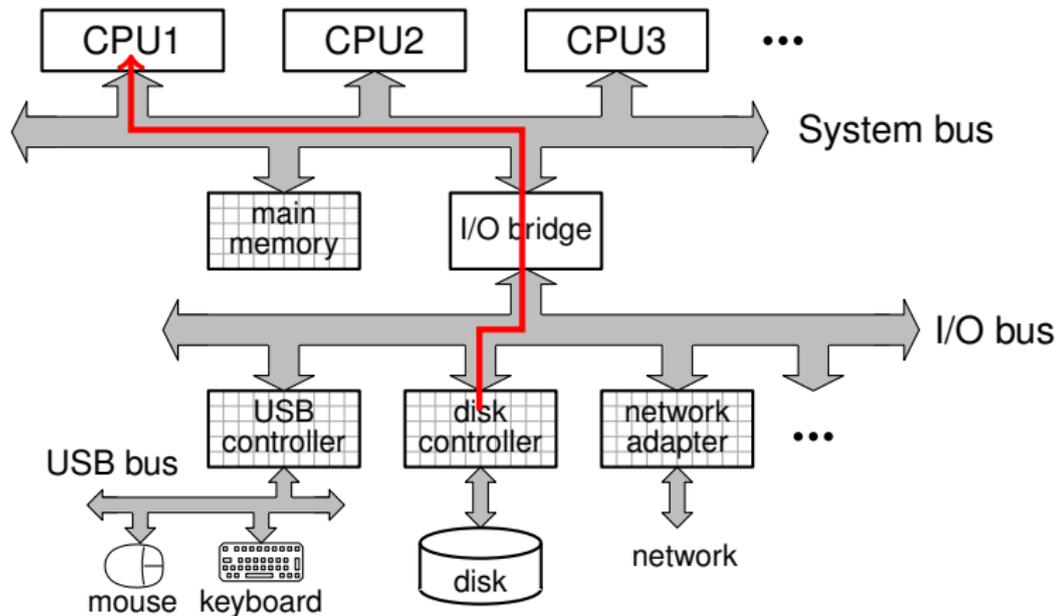


Pour initier l'opération, le CPU écrit une requête à l'adresse mémoire du contrôleur de disque.

requête = commande + n° de bloc + addr. mem destination



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)



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

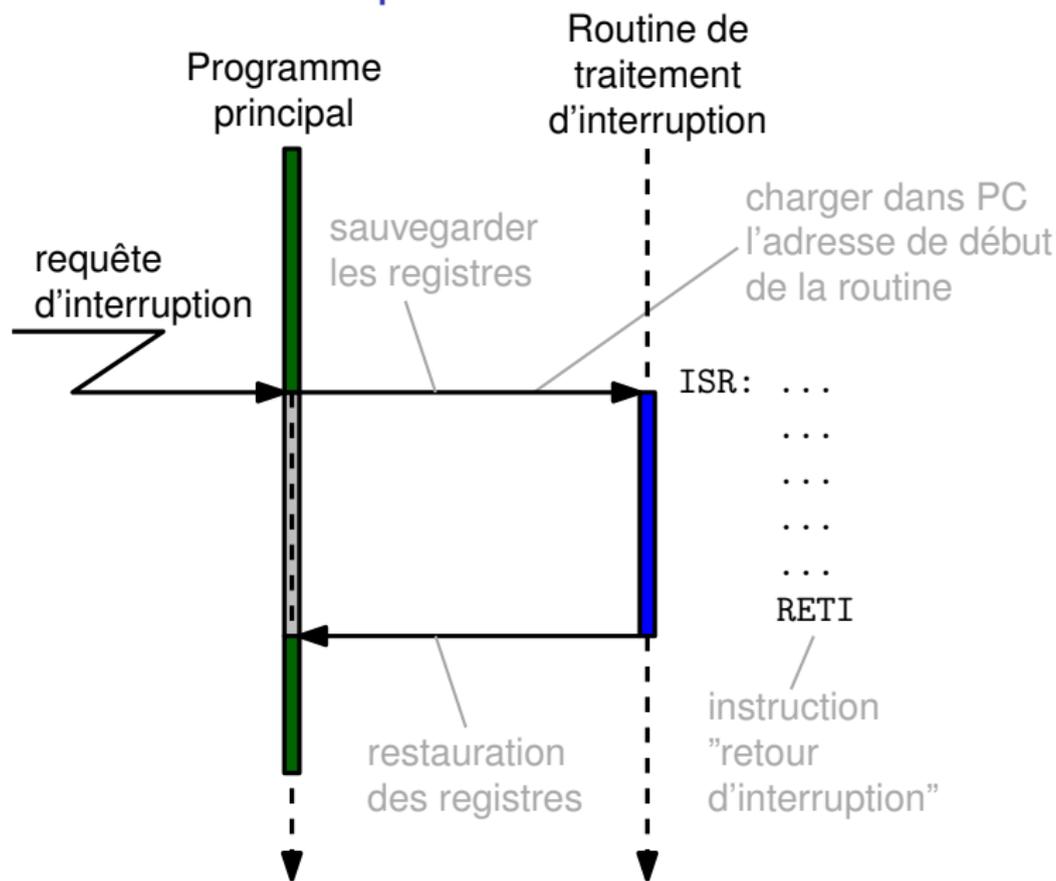
sauter à la routine = écrire son adresse dans le compteur ordinal

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 occurrence 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**
  - 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

1. Introduction : définition du terme «Système d'exploitation»
2. Interface entre OS et utilisateur : le shell
3. Interface entre logiciel et matériel : l'architecture
4. Isolation entre noyau et applications : les syscalls
5. Quelques syscalls UNIX incontournables

# 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)

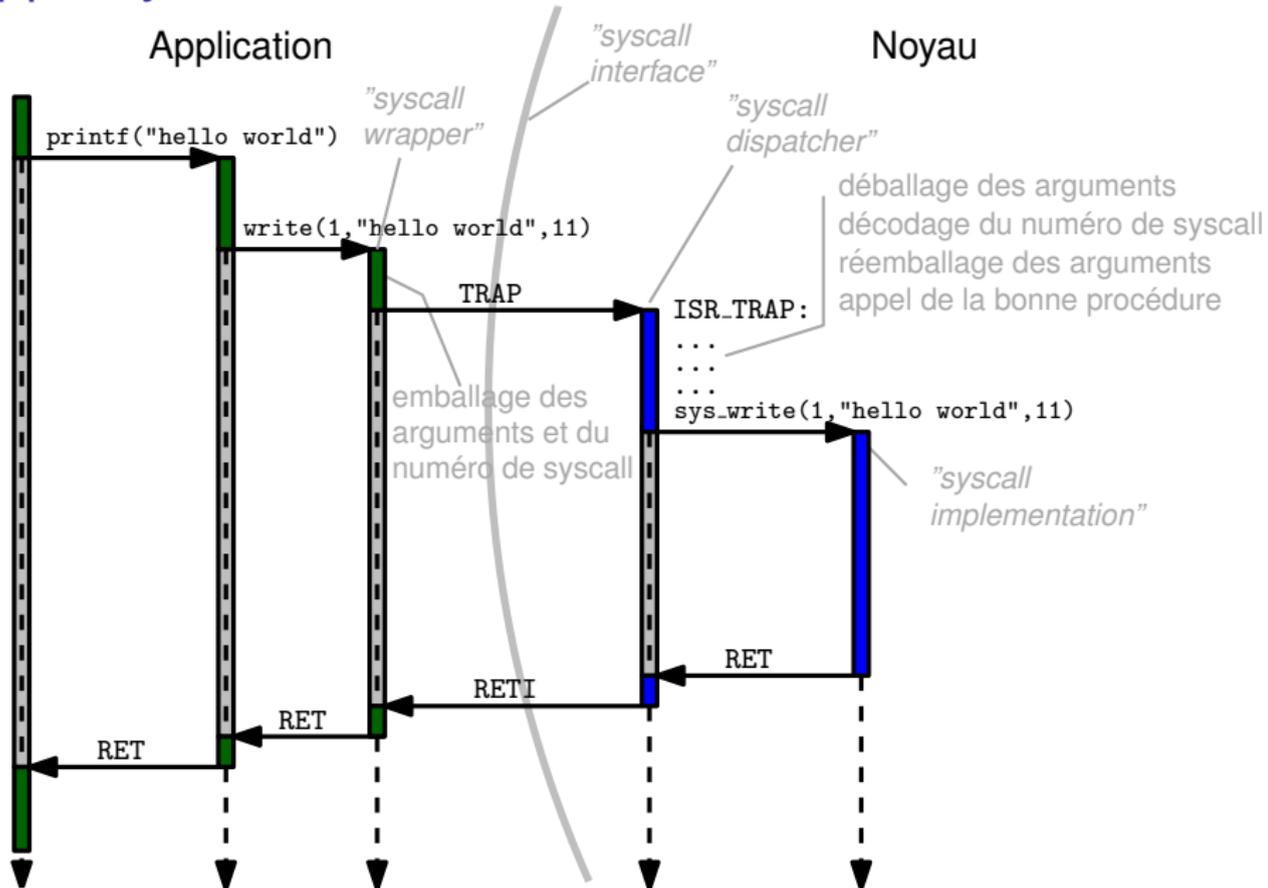
## Côté noyau :

- 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    $0xffffffffffffffff000,%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    $0xffffffffffffffff000,%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 »

Systeme 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»

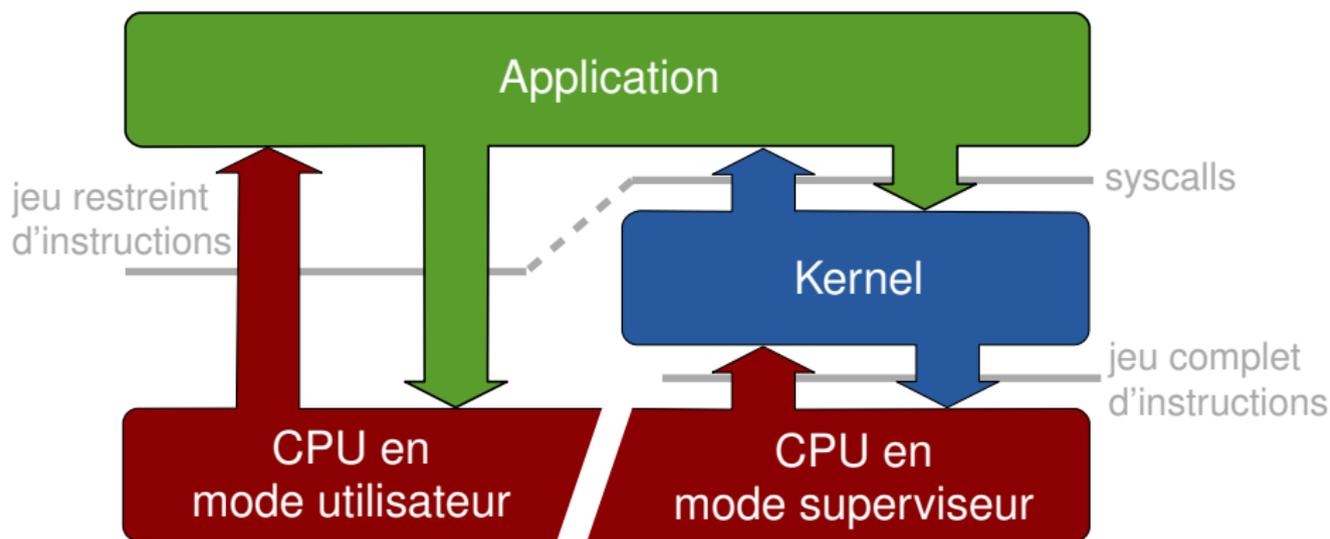
Le noyau :

- 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 :

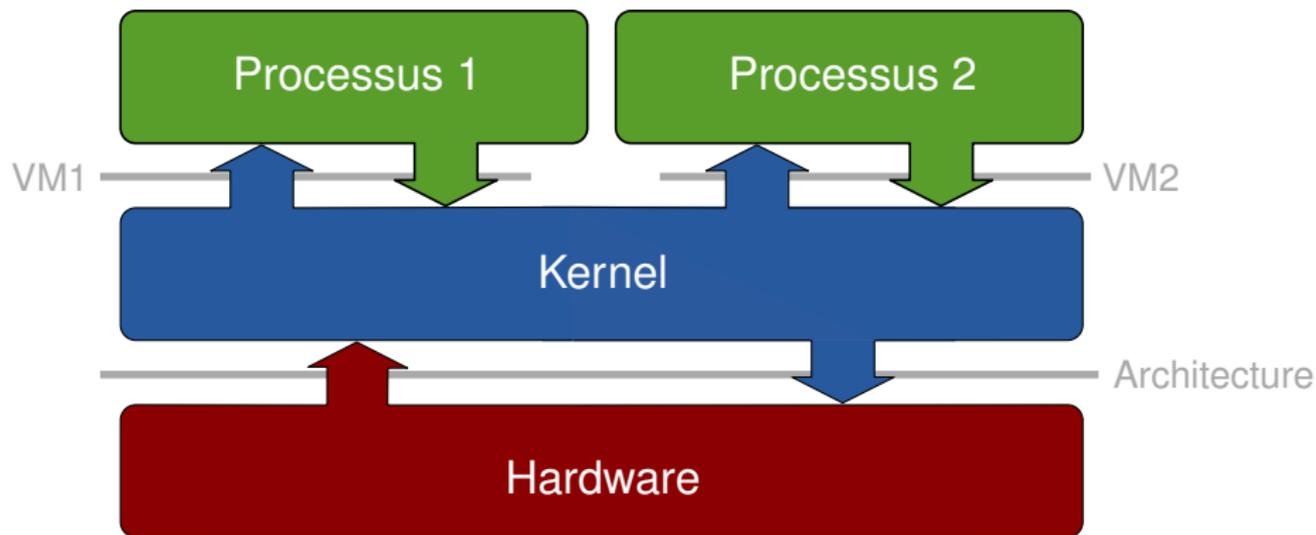
- essayer les commandes `ps aux` et `top`
  - puis `man ps` et `man top`
- et aussi `strace ./monprogramme`

## 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

1. Introduction : définition du terme «Système d'exploitation»
2. Interface entre OS et utilisateur : le shell
3. Interface entre logiciel et matériel : l'architecture
4. Isolation entre noyau et applications : les syscalls
5. Quelques syscalls UNIX incontournables

# Appels système : exemples

## EXAMPLES OF WINDOWS AND UNIX SYSTEM CALLS

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

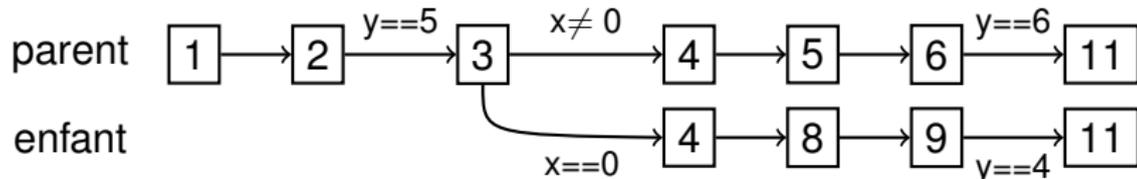
- sous unix : créer un processus  $\neq$  changer de programme
- `fork()` duplique le processus qui a invoqué le syscall
  - processus d'origine = «parent», nouveau = «enfant»
- **duplication** intégrale de la machine virtuelle userland
  - CPU virtuel : les deux processus s'exécutent **en concurrence**
  - 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