

Table des matières

1	Rappels d'architecture	1
2	Qu'est-ce qu'un ordinateur ?	2
	Architecture d'un ordinateur: plus de détails	
3	La segmentation : les différentes parties d'un processus	5
	La pile : utilisation au travers d'appels de fonction	
	La multiprogrammation	
	Les interruptions	
4	Notion de programme et de processus	9
	La création de processus	
	Commutation de contexte	
	Préemption : commutation par l'horloge	
5	Communications Inter-Processus	13
	Signaux	
	Tuyaux	
	Mémoire partagée ou «Shared Memory»	
6	Le concept de thread	18
	Threads POSIX	
7	Problèmes d'accès concurrent : synchronisation et éviter les corruptions	20
	Exemple de corruption	
	Notion de ressources	

- Interblocage, famine et coalition
- L'exclusion mutuelle entre processus
- Exclusion mutuelle : solution matérielle
- Exclusion mutuelle : solution algorithmique

8	Notion de Sémaphore	25
	Utilisation des sémaphores : Section Critique	
	Utilisation des sémaphores : l'allocation de ressources	
	Problème des Lecteurs/Rédacteurs	
	Producteur/Consommateur	
	Le repas des philosophes	
	Conclusion sur les sémaphores	
	Programmation des Sémaphores en C sous GNU/Linux	
	Sémaphore et utilisation dans des dispositifs réels	
9	Présentation de la programmation «asynchrone»	31
	La programmation asynchrone : le «producteur/consommateur»	
	La programmation asynchrone : la «boucle d'événements»	
	Programmation asynchrone : le diner des philosophes	

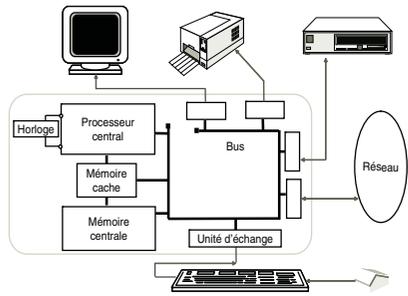
1 Rappels d'architecture

Plan

- Architecture d'un processeur :
 - ◇ les différents composants ;
 - ◇ les multi-cores ;
 - ◇ l'hyperthreading ;
 - ◇ l'exécution d'un programme ;
- Le processus
 - ◇ segmentation/exécution et pile ;
 - ◇ Contexte ;
- Le parallélisme
 - ◇ interruptions/horloge ;
 - ◇ Appel Systèmes et IPCs ;



2 Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

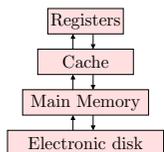
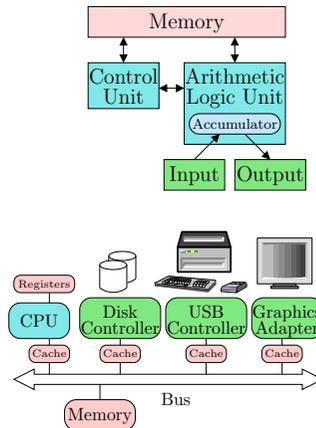


- * une *mémoire centrale* :
 - ◊ architecture «Von Neuman» : programme et données résident dans la même mémoire. *La lecture ou l'écriture dans la mémoire concerne une donnée ou une instruction.*
 - ◊ architecture «Harvard» : programme et données sont dans des mémoires différentes ; *Il est possible de charger simultanément une instruction et une donnée.*
- L'architecture d'un ordinateur est de type «von Neumann». Des matériels embarqués, comme des modules Arduino ou des DSP, «Digital Signal Processor», utilisent une architecture de type «Harvard».

- * un *processeur central* ou CPU, «Central Processing Unit» qui réalise le traitement des informations logées en mémoire centrale :
 - ◊ le processeur permet l'exécution d'un programme ;
 - ◊ chaque processeur dispose d'un langage de programmation composé d'**instructions machine** spécifiques ;
 - ◊ **résoudre un problème** : exprimer ce problème en une suite d'instructions machines ;
 - ◊ la solution à ce problème est **spécifique à chaque processeur** ;
 - ◊ le programme machine et les données manipulées par ces instructions machine sont placés dans la mémoire centrale.
- * des *unités de contrôle* de périphériques et des périphériques :
 - ◊ périphériques d'entrée : clavier, souris, etc ;
 - ◊ périphériques de sortie : écran, imprimante, etc ;
 - ◊ périphérique d'entrée/sortie : disques durs, carte réseau, etc.
- * un *bus de communication* entre ces différents composants.

Architecture d'un ordinateur : plus de détails

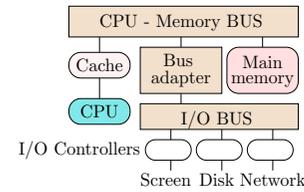
- ◊ le processeur est la combinaison :
 - ◊ d'une « unité arithmétique et logique », «ALU», «Arithmetic Logic Unit» ;
 - ◊ d'une « unité de contrôle » : contrôle du bus servant à échanger données et instructions ;
- ◊ la mémoire n'est pas d'**accès uniforme**, c-à-d que la vitesse d'accès n'est pas toujours la même :
 - ◊ les registres : cases mémoires intégrées au processeur ;
 - ◊ le cache : zone mémoire **tampon** entre la mémoire centrale et le processeur :
 - * permet d'éviter l'accès à la mémoire centrale pour des données déjà accédées et mémorisées dans le cache ;
 - * évite d'utiliser le bus de données ;
 - ◊ le disque : permet de « *simuler* » de la mémoire.



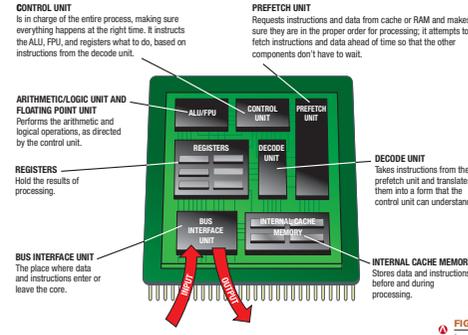
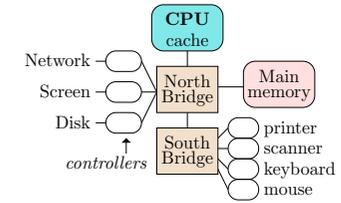
- ◊ la vitesse entre ces différentes mémoires est **très différentes** :
- ◊ la taille de ces mémoires est très différente :
 - * registres < 1ko ;
 - * cache : qqz Mo ;
 - * mémoire centrale : qqz Go ;
 - * le stockage sur disque : qqz To.

Architecture de l'ordinateur : l'évolution

«Archaic» design

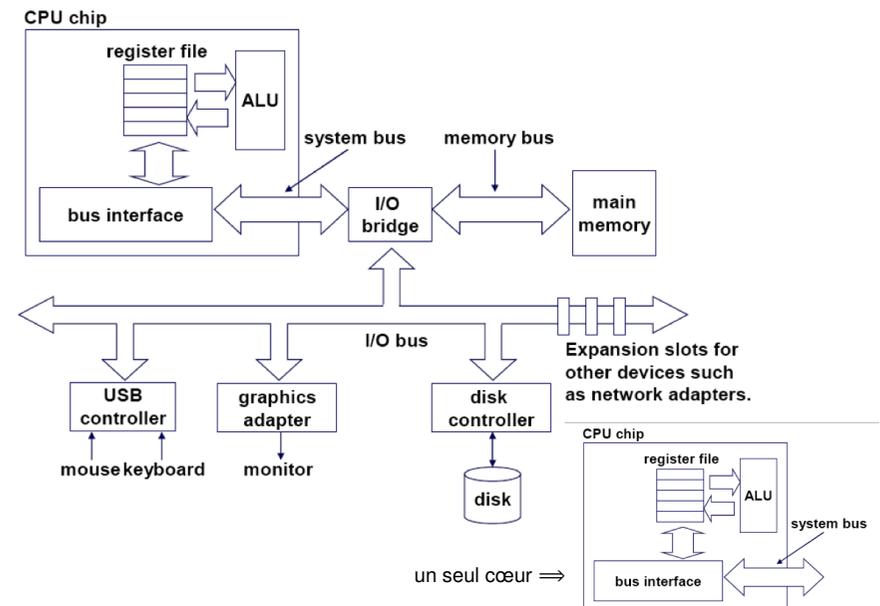


Current design

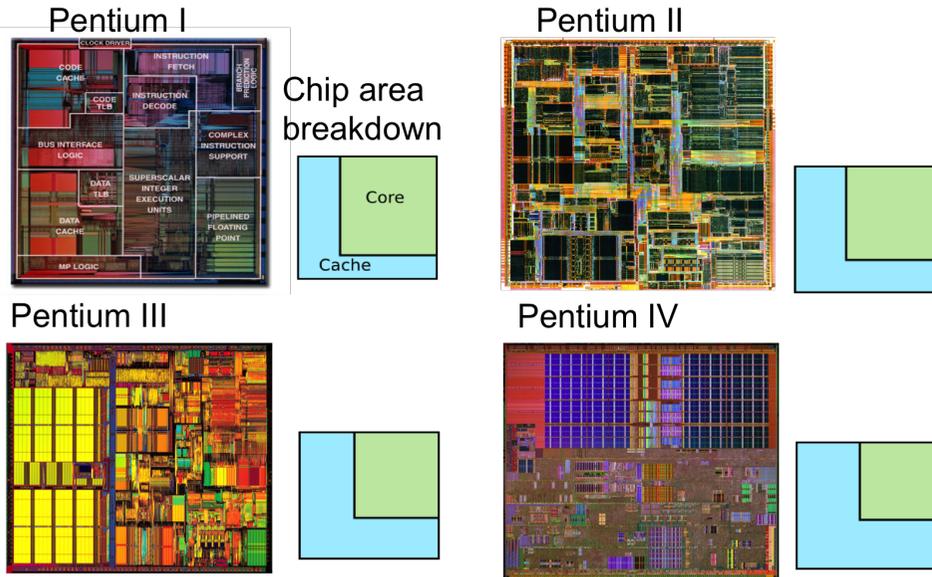


- ◊ «FPU», «Floating Point Unit» : gère les calculs sur nombre à virgule flottante ;
- ◊ «Prefetch Unit» : charger les données et instructions en amont de leur traitement pour accélérer le travail du processeur ;
- ◊ «Decode Unit» : analyse les instructions pour le processeur.

Et les multi-cores ? Qu'est-ce qu'un «core» ?

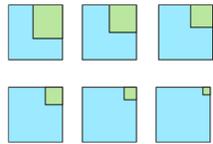


Et les multi-cores ?

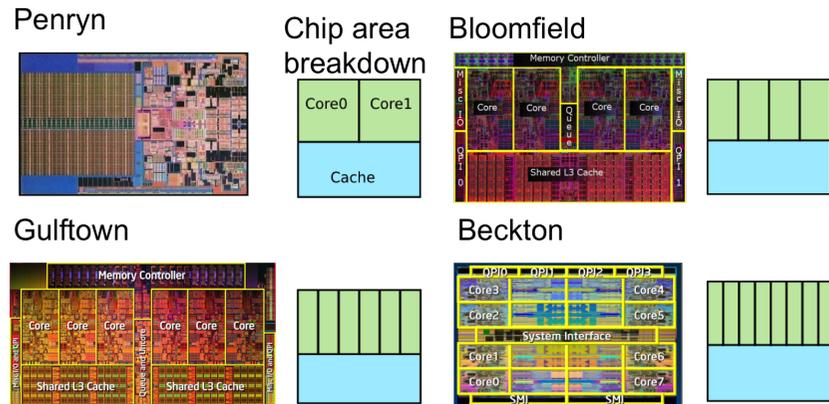


Et les multi-cores ?

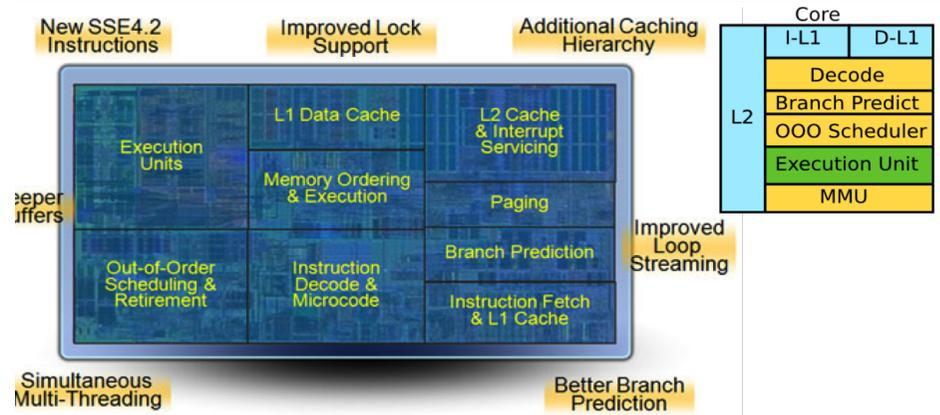
L'avenir ?



Non ! le multi-cores :



De plus près

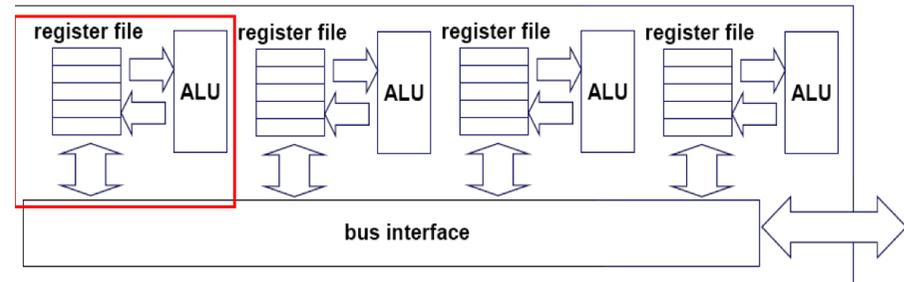


Moins de 10% de la surface sert à l'exécution réelle

«OOO» : Out of Order

Et les multi-cores ?

Processeur «multi-cores»

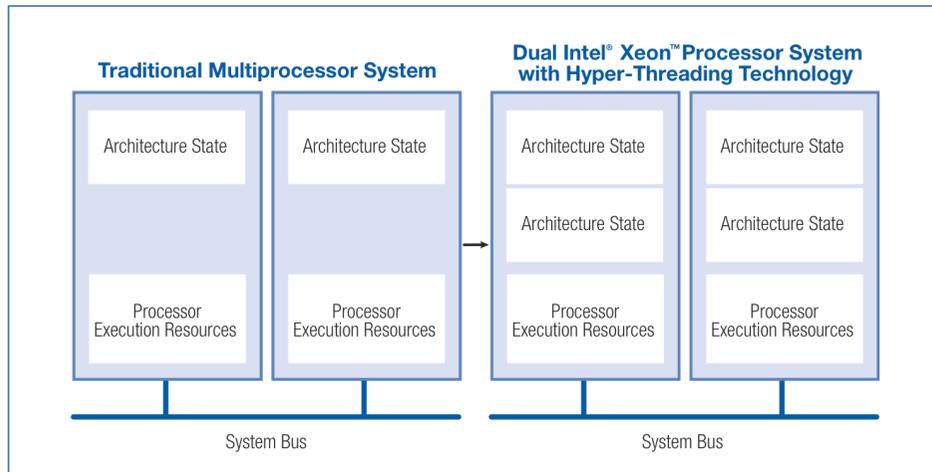


- ▷ On «grave» plusieurs processeurs sur le même support.
- ▷ Chaque cœur est vu par le système d'exploitation comme un processeur séparé.

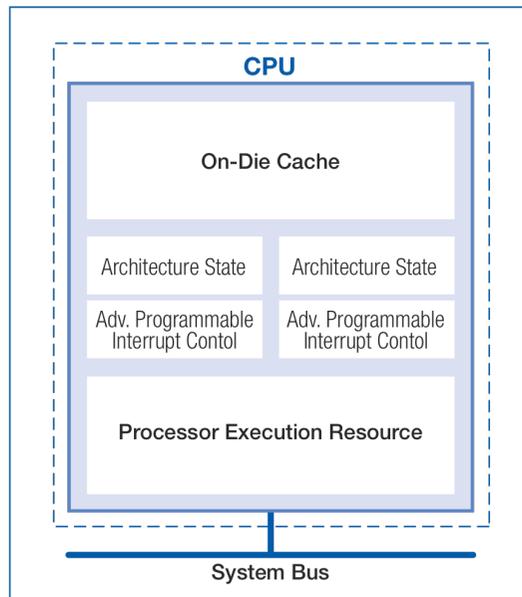
Avantages

- On **augmente moins la cadence** du processeur (échauffement, consommation, difficultés de conception)
- On va vers **plus de parallélisme** (bien !)

Et l'Hyperthreading ? Qu'est-ce que c'est ?



Une «Hyperthread»



Hyperthreading : la notion de «processeur logique»

Un processeur logique

- ▷ un «*architecture state*», c-à-d un état matériel :
 - ◇ registres, RI, CO, PSW, Interruptions ;
 - ◇ son propre flot d'instruction ;
- ▷ peut être interrompu et stoppé indépendamment.

Un processeur composé de «processeurs logiques»

Tous les processeurs logiques partagent la partie «exécution» :

- les caches mémoires ;
- les bus mémoires ;
- le CPU, ALU, FPU, etc.

D'après Intel

Each logical processor maintains a complete set of the architecture state. The architecture state consists of registers including the general-purpose registers, the control registers, the advanced programmable interrupt controller (APIC) registers and some machine-state registers. From a software perspective, once the architecture state is duplicated, the processor appears to be two processors. The number of transistors to store the architecture state is an extremely small fraction of the total. Logical processors share nearly all other resources on the physical processor, such as caches, execution units, branch predictors, control logic and buses.

Programme vs Processus

Programme

entité purement statique associée à la suite des instructions qui la composent.

Processus

entité purement dynamique associée à la suite des actions réalisées par un programme.

- ◇ La notion de processus introduit implicitement le concept et le fonctionnement des *systèmes multiprogrammés*.
- ◇ Un processus est une abstraction de données définies par 2 parties : un **état** et un **comportement**.

À chaque étape d'exécution du programme :

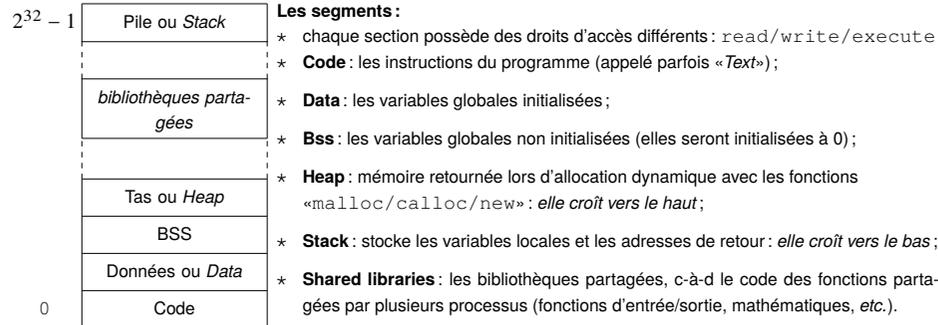
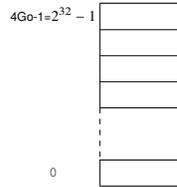
- ▷ le contenu des registres du compteur ordinal évolue ;
- ▷ le contenu de la mémoire centrale peut être modifié : écriture ou lecture.

On appelle **processus** l'image de l'état du processeur et de la mémoire au cours de l'exécution d'un programme.

Le programme est statique et le processus représente la dynamique de son exécution.

3 La segmentation : les différentes parties d'un processus

Un programme sur un adressage sur 32 bits voit la mémoire de l'adresse 0 à $2^{32} - 1$, c-à-d 4Go:



La segmentation

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <sys/types.h>
4 #include <unistd.h>
5
6 int global_init_data = 30;
7 int global_noinit_data;
8
9 void function_prints(void)
10 { char c;
11   int local_data = 1;
12   int *dynamic_data = (int *)calloc(1, sizeof(int));
13
14   printf("Pid of the process is = %d\n", getpid());
15   printf("Addresses which fall into:\n");
16   printf("(1) Data segment = %p\n", &global_init_data);
17   printf("(2) BSS segment = %p\n", &global_noinit_data);
18   printf("(3) Code segment = %p\n", &function_prints);
19   printf("(4) Stack segment = %p\n", &local_data);
20   printf("(5) Heap segment = %p\n", dynamic_data);
21   scanf("%c", &c);
22 }

```

```

24 int main()
25 {
26   function_prints();
27   return 0;
28 }

```

```

$ ./segments
Pid of the process is = 4697
Addresses which fall into:
1) Data segment = 0x804a020
2) BSS segment = 0x804a02c
3) Code segment = 0x8048494
4) Stack segment = 0xbfe47454
5) Heap segment = 0x8d76008

```

```

$ more /proc/4697/maps
08048000-08049000 r-xp 00000000 08:01 424814 ./segments
08049000-0804a000 r--p 00000000 08:01 424814 ./segments
0804a000-0804b000 rw-p 00001000 08:01 424814 ./segments
08d76000-08d97000 rw-p 00000000 00:00 0 [heap]
bfe28000-bfe49000 rw-p 00000000 00:00 0 [stack]

```

```

$ nm -f sysv segments
Symbols from segments:
Name Value Class Type Size Section
main 08048558 T | FUNC|00000012|.text
global_init_data 0804a020 D | OBJECT|00000004|.data
global_noinit_data 0804a02c B | OBJECT|00000004|.bss
function_prints 08048494 T | FUNC|000000c4|.text

```

On remarque que sur la sortie du fichier «maps» :

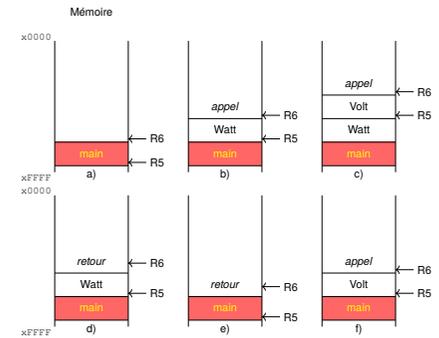
- * le segment code possède les droits d'exécution;
- * les segments bss, data possèdent les droits de lecture/écriture mais pas d'exécution.

La pile : utilisation au travers d'appels de fonction

```

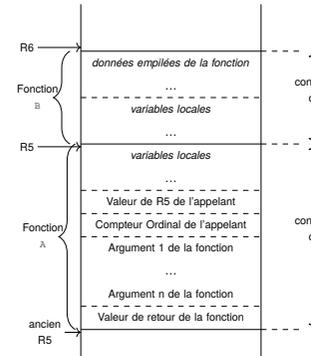
1 int main ()
2 {
3   int a = 23;
4   int b = 14;
5   ...
6
7   b = Watt(a); /* appel de Watt */
8   b = Volt(a,b); /* puis de Volt */
9   ...
10 }
11
12 int Watt(int c)
13 {
14   int w = 5;
15   ...
16   w = Volt(w,10); /* appel Volt */
17   ...
18   return w;
19 }
20
21 int Volt(int q, int r)
22 {
23   int k = 3;
24   int m = 6;
25   ...
26   return k+m;
27 }

```



- l'état de la pile au démarrage du programme :
 - ◇ registre «R5», «frame pointer» : contient l'adresse du début du contexte courant (appelé «frame»);
 - ◇ registre «R6», «Top of Stack (TOS) pointer» : contient l'adresse du sommet de la pile qui varie par empilement/dépilage;
- appel de la fonction «Watt»;
 - ◇ le registre R5 prend la valeur de R6 et pointe sur le «contexte» associé à l'exécution de la fonction, R6 sur le nouveau sommet qui va être décalé pour faire de la place aux arguments, valeur de retour et adresse de retour (empilement);
 - ◇ le processeur saute à l'adresse du code de la fonction appelée;
 - ◇ lors du retour de la fonction, le processeur dépile l'adresse de retour et le registre R6 pointe sur la valeur de retour de la fonction;
 - ◇ nettoyage de la pile pour l'exécution d'une autre fonction (dépilage valeur retour et arguments précédents);
 - ◇ ⇒ **écrasement** de l'utilisation de la pile de l'ancien appel «Watt», par le nouvel appel «Volt».

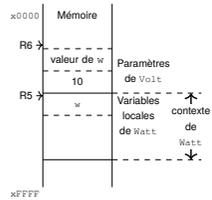
La pile : analyse du contenu d'un contexte



- soit l'état de la pile d'exécution après l'appel de la fonction A :
 - ◇ l'exécution de la fonction A crée un «contexte A» dans la pile :
 - * la valeur de retour de la fonction A;
 - * les arguments : «Argument 1 à n de la fonction»;
 - * la valeur du «PC» ou «CO» de l'appelant de la fonction A;
 - Il est nécessaire de mémoriser l'ancienne valeur du CO, puisqu'il sert maintenant à exécuter le code de la fonction A.
 - * la valeur du registre de R5 lors de l'exécution de l'appelant : obligatoire pour pouvoir remettre l'appelant dans un état correct lors du retour de la fonction;
 - * les variables locales à la fonction;
 - * les registres R5 et R6 contiennent maintenant des valeurs relatives au contexte de A;

- ensuite, la fonction A appelle la fonction B :
 - ◇ l'appel de la fonction B crée le contexte de B dans la pile :
 - * on empile les données de la fonction en rapport avec A (valeur de retour et arguments);
 - * on empile le CO de l'appelant, c-à-d l'adresse de la fonction A à laquelle il faudra retourner (A ayant appelé B). On mets l'adresse du code de la fonction B dans le CO, ce qui force l'exécution de la fonction B.
 - ◇ lors de l'exécution de B, on empile la valeur de R5 pour pouvoir la restaurer et on empile les variables locales de B;
 - ◇ cela crée une «liste chaînée» des différents appels imbriqués : il est possible de remonter dans les contextes d'appels en examinant la pile. Les outils de «débugage» permettent de visualiser et analyser le contenu de la pile d'appel. Le mécanisme «d'exception» présent dans le langage C++, Java, Python etc. permet en cas d'erreur de remonter de contexte de fonction en contexte de fonction appelante à la recherche d'une fonction capable de traiter cette erreur.

La pile : analyse du contenu d'un contexte

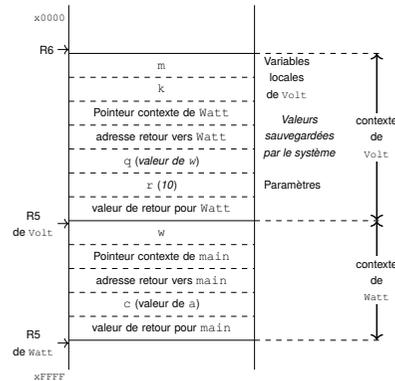


Lors de l'appel de la fonction «Volt», par la fonction «Watt», la valeur contenue dans la variable locale «w» de «Watt» est transmise en tant que paramètre à la fonction «Volt».

Cet appel correspond à la ligne 16 du code source.

Dans le contexte de la fonction «Volt» :

- la variable locale «q» reçoit la valeur du paramètre transmis, c-à-d la valeur de «w» de la fonction «Watt» ;
- la variable locale «r» reçoit la valeur du paramètre transmis, c-à-d la valeur directe 10 ;
- pour son travail, elle utilise deux variables locales «k» et «m» ;
- des sauvegardes des adresses concernant «Watt» :
 - de retour d'exécution ;
 - de **restauration de contexte**.



Qu'est-ce que le parallélisme ?

L'image de la course de voiture

Plusieurs véhicules veulent aller d'un point A à un point B le plus vite possible, ils peuvent :

- faire la course sur la route et finir par :
 - soit se **suir** les uns les autres ;
 - soit essayer de se **voler** mutuellement leurs positions respectives ;
 - soit avoir un **accident** !
- rouler sur différentes voies parallèles et arrivés ensemble **sans entrer en collision** ;
- emprunter des **routes différentes** pour aller de A à B.

Et le parallélisme ?

- Plusieurs tâches à réaliser : chaque voiture à acheminer ;
- Chacune de ses tâches peut s'exécuter :
 - une à la fois sur un **seul processeur** : une **seule route** ;
 - en parallèle sur **plusieurs processeurs** : **plusieurs voies** sur la même route ;
 - de manière **distribuées** sur plusieurs processeurs : des **routes séparées**.
- Ces tâches nécessitent souvent d'être **synchronisées** pour éviter les collisions ou de **s'arrêter** à des feux de trafic ou bien à des panneaux de signalisation (Stop).

On peut imaginer que :

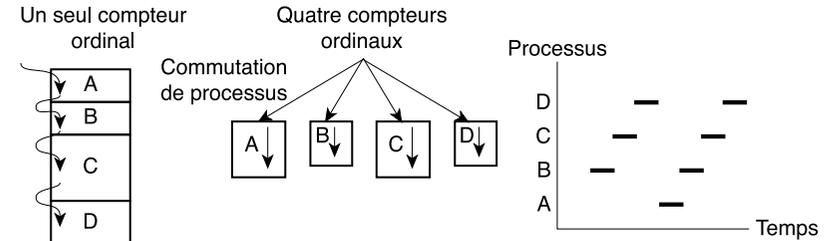
- les voitures sont des **processus** ou **threads** ;
- les routes qu'elles veulent emprunter sont des **applications** ;
- la carte des routes correspond au **matériel** ;
- et le code de la route, aux **communications** et aux **synchronisations**.



La multiprogrammation

Comment exécuter plusieurs programmes en «multi-tâche»

- charger différents programmes en mémoires :
 - répartir la mémoire entre les différents programmes ;
 - traduire les adresses *etc.*
- passer, «*switcher*», de l'exécution d'un programme à l'autre :
 - associer un contexte du processeur à chaque programme → notion de **processus** ;
 - passer d'un processus à un autre : sauvegarde un contexte et restaurer un autre contexte ;
 - passer d'un «CO» associé à un processus à un «CO» associé à un autre processus :



Comment organiser la mémoire entre les différents processus ?

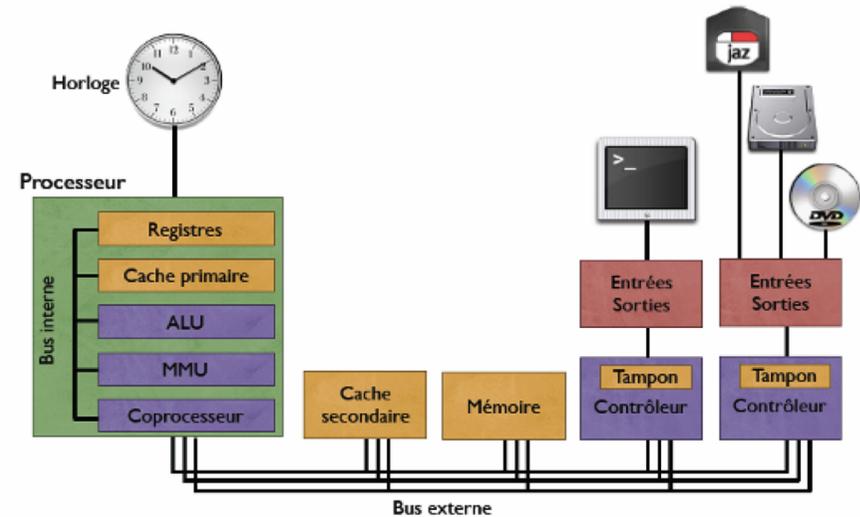
En utilisant le concept de «*pagination*».

Comment passer régulièrement et automatiquement d'un processus à l'autre ?

En utilisant le concept «*d'horloge*» et d'«*interruption*».

Représentation fonctionnelle d'un ordinateur

On ajoute dans cette représentation fonctionnelle, une horloge et des contrôleurs de périphériques



Représentation fonctionnelle d'un ordinateur

Les composants indispensables d'un système capable de supporter Unix :

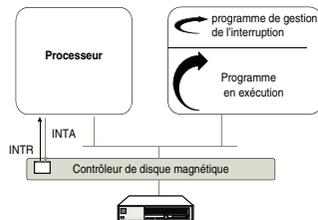
- La mémoire principale
- La mémoire cache
- Les contrôleurs de périphériques
- Les bus de communication

- Une horloge
- Un processeur permettant un mode noyau/utilisateur
- Les interruptions

Intervention concurrente !

Les interruptions

- ◊ permet d'arrêter l'exécution du programme en cours afin d'exécuter une tâche jugée plus urgente :
«Un périphérique peut signaler un événement important (fin de papier dans l'imprimante, dépassement de température signalée par une sonde placée dans un four...) au processeur qui, s'il accepte cette interruption, exécute un programme de service (dit programme d'interruption) traitant l'événement.
À la fin du programme d'interruption le programme interrompu reprend son exécution normale.»
- ◊ il en existe trois sortes provenant :
 - ◊ **d'un périphérique** : interruptions externes qui permettent à un périphérique d'avertir le processeur ;



- ◊ **d'un programme en cours d'exécution** : interruptions logicielles internes nommées **appels systèmes**.
Il s'agit de permettre à un programme en cours d'exécution de se dérouter vers un programme du système d'exploitation qui doit gérer une tâche particulière.
Par exemple les instructions d'entrées/sorties, permettant les échanges d'informations entre le processeur et les périphériques, sont traitées de cette manière : un ordre d'entrées/sorties est un appel au système (une interruption logicielle) qui interrompt le programme en cours au profit du programme spécifique (driver ou pilote) de gestion d'un périphérique.
- ◊ **du processeur** : traiter des événements exceptionnels de type division par zéro, dépassement de capacité

Interruptions, Processeur & Système d'exploitation

Principe **commutation de contexte** provoquée par un **signal géré par le matériel**.

Ce **signal** est lui-même un événement qui peut être :

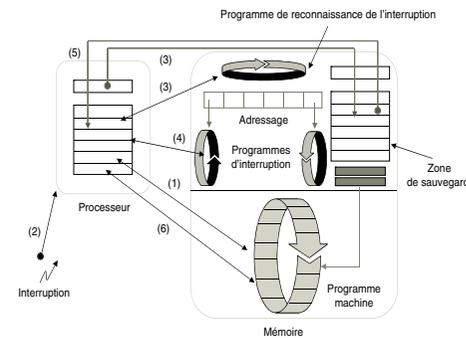
- ◊ interne au processus et donc résultant de son exécution ;
- ◊ extérieur indépendant de cette exécution.

- Exemple
- ◊ L'événement concerne 1 périphérique d'entrée / sortie.
 - ◊ L'événement concerne 1 utilisateur ou un opérateur.

Le signal :

- ▷ réalise un **changement de contexte processeur** lorsqu'il est matériel ;
- ▷ modifie un indicateur qui est **consulté régulièrement** par le système d'exploitation en vue de déterminer la cause de l'interruption lorsqu'il est logiciel.

Les interruptions : la commutation de contexte

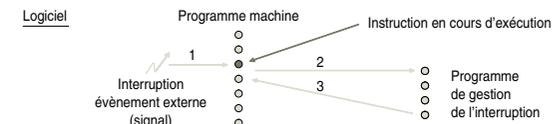


1. le programme utilisateur dispose du processeur. C'est lui qui est en cours d'exécution. Il dispose des registres, de l'unité arithmétique et logique, de l'unité de commande. Le compteur ordinal CO contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter ;
2. une interruption est déclenchée par un périphérique ;
3. sauvegarde du contexte matériel d'exécution du programme utilisateur et du compteur ordinal CO.
Le programme de reconnaissance s'exécute et lit le numéro de l'interruption.
Le numéro de l'interruption permet l'identification de l'adresse du programme de traitement ;

4. le compteur ordinal CO est chargé avec l'adresse du programme de traitement et celui-ci s'exécute ;
5. le contexte d'exécution du programme utilisateur est rechargé dans le processeur à la fin du programme d'interruption ;
6. le programme utilisateur reprend son exécution.

En version simplifiée :

Matériel Prise en compte par le processeur d'événements externes (exemple : les périphériques positionnent un signal qui est reçu par le processeur).



Horloge

Gestion logicielle de l'horloge

L'horloge est gérée par un «pilote d'horloge» pour fournir les services suivants :

- mettre à jour l'heure courante ;
- empêcher les processus de dépasser le temps qui leur est alloué ;
- comptabiliser l'allocation du processeur ;
- traiter l'appel système `alarm()` des processus utilisateur ;
- fournir des compteurs de garde au système lui-même ;
- fournir diverses informations au système (tracé d'exécution, statistiques).

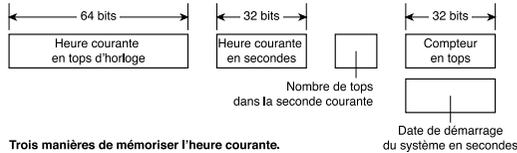
Différentes horloges

* **horloge «temps réel»** : maintenir la date et l'heure «humaine».

- ▷ une date de référence : le 1^{er} janvier 1970 ;
- ▷ un compteur exprimant le nombre de «tops» depuis la date de référence ;
- ▷ capacité du compteur : dépend du nombre de bits du compteur et de la fréquence de l'horloge ;

Exemple : un compteur sur 32bits, avec une horloge à 60Hz déborde en 2 ans...

Solutions :



Trois manières de mémoriser l'heure courante.

- ◇ compteur sur 64bits : augmente la complexité du calcul qui doit être réalisé de nombreuses fois par seconde ;
- ◇ compteur sur 32 bits par seconde + compteur supplémentaire «tops → seconde»

Solution retenue pour Unix : dépassement de capacité en 2038 !

- ◇ compteur de tops à partir de l'heure du démarrage récupérée automatiquement (utilisateur ou réseau).

Horloge

Autres services

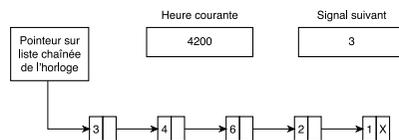
- * **Ordonnanceur** : garantie qu'un processus ne s'exécute pas plus longtemps que son «quantum de temps» :
 - ◇ lorsqu'un processus démarre **un compteur lui est associé** avec un nombre de «tops» d'horloge ;
 - ◇ à chaque interruption de l'horloge **ce compteur est décrémenté** ;
 - ◇ lorsque le compteur est à zéro, **l'ordonnanceur est rappelé** et choisi **un nouveau processus**.

* **Temps d'allocation d'un processus** : comptabiliser le temps alloué à chacun des processus :

- ◇ on incrémente un compteur associé au processus à chaque top d'horloge ;
- ◇ on distingue le temps passé en mode noyau et en mode utilisateur au service de ce processus : *on indique également le temps réel attendu par l'utilisateur devant son écran.*

```
pef@darkstar:~$ time ls
Segments segments.c
real 0m0.010s
user 0m0.004s
sys 0m0.004s
```

* **Alarmes** : chaque processus peut demander d'être alerté après un certain temps ou à une certaine heure.



Simulation de plusieurs compteurs à partir d'une horloge unique

Optimisation : une seule horloge + une liste chaînée d'alarmes qui mémorise les délais entre chacune de ces alarmes : sur la figure les signaux vont être envoyés pour 4203, 4207, 4213, 4215 et 4216

Unix

Unix est un système supportant :

- Plusieurs utilisateurs ;
- Plusieurs programmes :
 - ◇ Partage du temps d'utilisation ;
 - ◇ Protection de la mémoire ;
 - ◇ Partage des ressources ;
 - ◇ Accès à distance.

□ Problèmes :

- ◇ Équité ;
- ◇ Gestion du matériel ;
- ◇ Droits d'accès...

Unix est un système nécessitant un processeur récent disposant d'au moins **deux modes de fonctionnement** pour lui permettre de contrôler les accès aux ressources de la machine :

- un mode **noyau** (ou système ou superviseur)
 - le processeur peut exécuter toutes les instructions disponibles du système.*
- un mode **utilisateur**.
 - certaines instructions lui sont interdites, pour des raisons de sécurité du système.*

Protection fondamentale

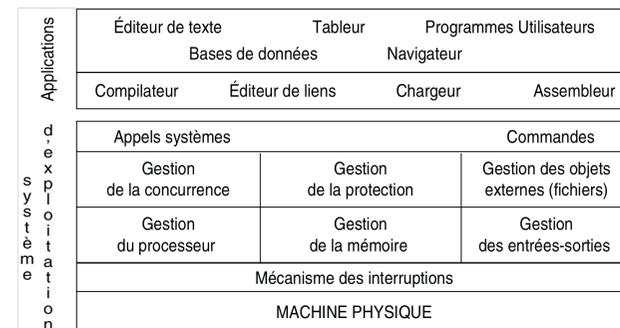
Les programmes sont exécutés en mode utilisateur :

- ◇ obligation de faire appel au système d'exploitation pour les opérations à risque qui nécessitent de passer en mode noyau. On appelle ces opérations des **appels système** (exemple : opérations de gestion de fichier pour modification des données)

◇ **Tous les accès aux ressources et aux données sont contrôlés par le système d'exploitation.**

Modélisation de la machine physique

Le système d'exploitation se présente comme une couche logicielle placée entre la machine matérielle et les applications.



Il s'interface avec :

- la couche matérielle, notamment par le biais du mécanisme des interruptions.
- les applications par le biais des primitives qu'il offre : appels système et commandes.

Fonctions du système d'exploitation

- **Gestion du processeur** : allouer le processeur aux différents programmes pouvant s'exécuter.
Cette allocation se fait suivant un algorithme d'ordonnancement qui planifie de l'exécution des programmes.
- **Gestion de la mémoire** : allouer la mémoire centrale entre les différents programmes pouvant s'exécuter (pagination/segmentation).
Mécanisme de **mémoire virtuelle** : *traduction entre adresse logique et physique, chargement uniquement des parties de code et de données utiles à l'exécution d'un programme.*
- **Gestion des E/S** :
 - ◇ accès aux périphériques,
 - ◇ faire la liaison entre appels de haut niveau des programmes (exemple : `getchar()`) et les opérations de bas niveau du système d'exploitation responsable du périphérique (exemple : le clavier).
C'est le pilote d'E/S (driver) qui assure cette liaison.
- **Gestion de la concurrence** : plusieurs programmes coexistent en mémoire centrale :
 - ◇ assurer les besoins de communication pour échanger des données ;
 - ◇ synchroniser l'accès aux données partagées afin de maintenir la cohérence de ces données.
Le système offre des outils de communication et de synchronisation entre les programmes.
- **Gestion du système de fichier** : stockage des données sur mémoire de masse (disque dur, mémoire flash, SSD, etc.)
Le système d'exploitation gère un format d'organisation (ext4 sous Linux), un système de protection (journalisation des modifications) et un format de fichier (inodes).
- **Gestion de la protection** : mécanisme de garantie que les ressources (CPU, mémoire, fichiers) ne peuvent être utilisées que par les programmes disposant des droits nécessaires.
- Gestion des **comptes** et des **droits** ,
- **Protection du système d'exploitation** : séparation du système d'exploitation en mode noyau et des programmes en mode utilisateur.

4 Notion de programme et de processus

Un **programme** est une entité purement statique associée à la suite des instructions qui la composent (le ou les fichiers stockés sur le disque dur).

Un **processus** est un programme en cours d'exécution auquel est associé :

- un environnement processeur (CO, PSW, RSP, registres généraux) ;
- un environnement mémoire appelés contexte du processus.

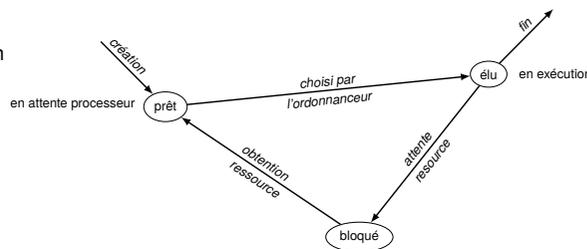
Un processus est :

- ▷ l'«instance dynamique» d'un programme ;
- ▷ le **fil d'exécution**, thread, de celui-ci dans un espace d'adressage protégé (ensemble des instructions et des données accessibles en mémoire).

État d'un processus

C'est le système d'exploitation qui détermine et modifie l'état d'un processus sous l'effet des événements :

- le choix de l'**ordre d'exécution** des processus est appelé ordonnancement ;
- l'algorithme chargé de faire ce choix est appelé **ordonnateur**.



État d'un processus

État élu

Lors de son exécution, un processus est caractérisé par un état :

- lorsque le processus obtient le processeur et s'exécute, il est dans l'état **élu**.
- l'état **élu** est l'état d'exécution du processus.

État bloqué

Lors de cette exécution, le processus peut demander à **accéder à une ressource** (réalisation d'une entrée/sortie, accès à une variable protégée) qui n'est **pas immédiatement disponible** :

- le processus **ne peut pas poursuivre** son exécution tant qu'il n'a pas obtenu la ressource (par exemple, le processus doit attendre la fin de l'entrée-sortie qui lui délivre les données sur lesquelles il réalise les calculs suivants dans son code) ;
- le processus *quitte* alors le processeur et passe dans l'état **bloqué** : l'état bloqué est donc l'état d'attente d'une ressource autre que le processeur.

État prêt

Lorsque le processus a enfin obtenu la ressource qu'il attendait, celui-ci peut potentiellement reprendre son exécution. Cependant, dans le cadre de **systèmes multiprogrammés**, il y a plusieurs programmes en mémoire centrale, et donc plusieurs processus.

- lorsque le processus est passé dans l'état bloqué, le processeur a été **alloué** à un autre processus.
- le processeur n'est donc pas forcément libre : le processus passe alors dans l'état **prêt** .

L'état «Prêt» est l'état **d'attente** du processeur.

État d'un processus

Changement d'état

- ▷ Le passage de l'état prêt vers l'état élu constitue l'opération **d'élection** .
- ▷ Le passage de l'état élu vers l'état bloqué est l'opération de **blocage** .
- ▷ Le passage de l'état bloqué vers l'état prêt est l'opération de **déblocage** .

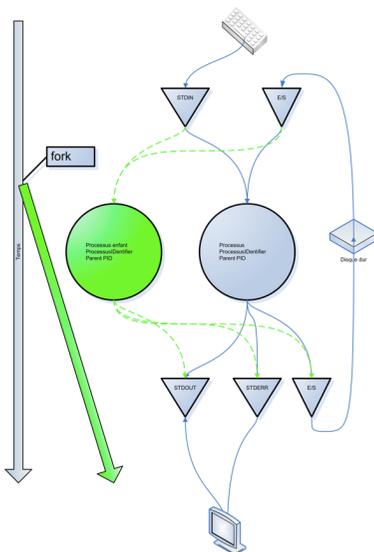
Remarques

- Un processus est toujours créé dans l'état **prêt** .
- Un processus se termine toujours à partir de l'état **élu** (sauf anomalie).

La création de processus

Création

- «clonage» du processus père.
Le premier processus père : le Shell.
- le nouveau processus partage ses E/S avec son père :
 - ◇ stdin, stdout, stderr;
la lecture de l'entrée se fait depuis le shell, les sorties se font dans le shell
 - ◇ tous les fichiers ouverts
les fichiers disques, les tubes de communication
 - ◇
- c. Possède le même code que son père :
 - ◇ différence de valeur de retour du fork :
 - * 0 pour le processus fils ;
 - * pid du fils pour le processus père ;
 - ◇ recouvrement du code par un autre avec «exec ()



Commutation de contexte

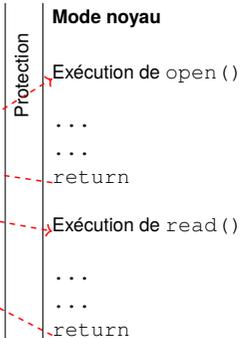
Les **appels systèmes** constituent l'interface du système d'exploitation et sont les **points d'entrées** permettant l'exécution d'une fonction du système :

- les **appels système** sont directement appelables depuis un programme.
- les **commandes** permettent d'appeler les fonctions du système depuis le prompt de l'interpréteur de commande (shell, «*Command Line Interface*»)

Déroulement d'un appel système

Mode utilisateur

```
main()
{
    int i, j, fd;
    i = 3;
    fd = open("mon_fichier", "r");
    read(fd, j, 1);
    j = j/i;
}
```



Lors de l'exécution d'un appel système, le programme utilisateur passe du mode d'exécution utilisateur au mode d'exécution **superviseur** ou **privilegié**, appelé «**mode noyau**».

Commutation de contexte

Mode utilisateur

```
main()
{
    int i, j, fd;
    i = 3;
    fd = open("mon_fichier", "r");
```

Mode noyau

```
Exécution de open ()
...
...
1 sauvegarde CO, PSW utilisateur
2 chargement CO ← adresse de la fonction open
3 chargement PSW ← mode superviseur
```

- **appel système** : demande d'exécution d'une fonction du système d'exploitation ;
- passage du **mode utilisateur** au **mode noyau** :

- ◇ déclenchement d'une **interruption logicielle** visible dans le code assembleur du programme ;
- ◇ passage dans un mode d'**exécution privilégié** qui est le mode d'exécution du système d'exploitation (mode noyau ou superviseur).

Accès à un plus grand nombre d'instructions machine que le mode utilisateur (permet l'exécution des instructions de masquage et démasquage des interruptions interdites en mode utilisateur).

- ◇ **sauvegarde du contexte** utilisateur ;

Exemple Assembleur dans le système Linux

```
Assembleur x86, sous Linux, écrit pour le compilateur NASM
section .data
helloMsg: db "Hello world!",10
helloSize: equ $-helloMsg
section .text
global _start
_start:
mov eax,4          ; Appel système "write" (sys write)
mov ebx,1          ; File descriptor, 1 pour STDOUT (sortie standard)
mov ecx,helloMsg   ; Adresse de la chaîne à afficher
mov edx,helloSize  ; Taille de la chaîne
int $0x            ; Exécution de l'appel système
; Sortie du programme
mov eax,1          ; Appel système "exit"
mov ebx,0          ; Code de retour
int $0x            ; Appel au noyau de LINUX (int 80h)
```

⇒ **commutation de contexte**

Commutation de contexte

Mode utilisateur

```
main()
{
    int i, j, fd;
    i = 3;
    fd = open("mon_fichier", "r");
```

Mode noyau

```
Exécution de open ()
...
...
return
1 restauration du contexte utilisateur
2 chargement CO ← CO sauvegardé
3 chargement PSW ← PSW sauvegardé
```

À la fin de l'**appel système** :

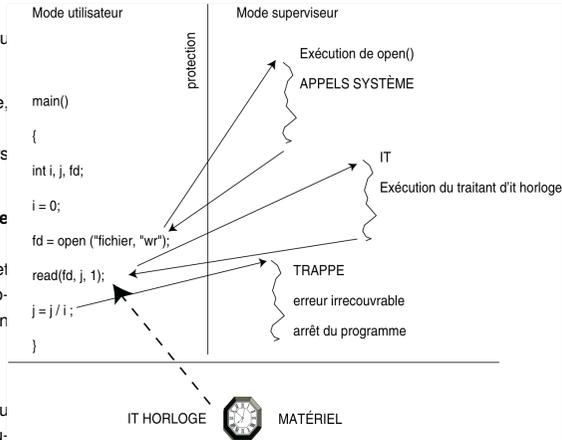
- ▷ passage du **mode noyau** au **mode utilisateur** ;

⇒ **commutation de contexte** : restauration du contexte utilisateur.

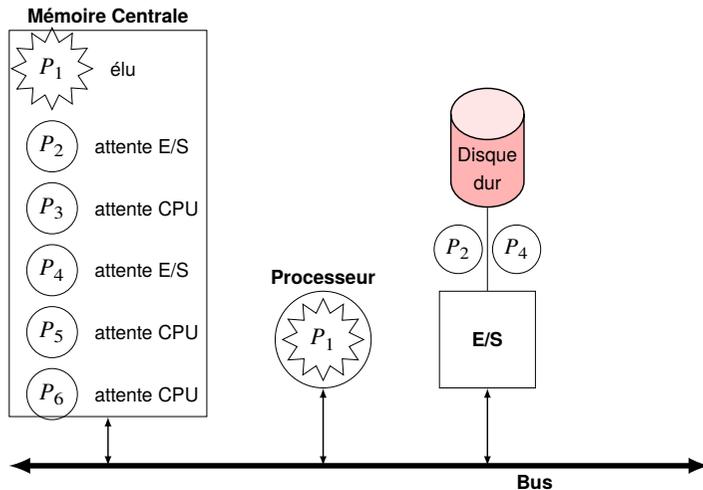
La commutation de contexte

Trois causes de passage du mode utilisateur au mode noyau

- **appel d'une fonction du système :**
demande explicite de passage en mode noyau
- **exécution d'une opération illícite**
(division par 0, instruction machine interdite, violation mémoire...): trappe.
L'exécution du programme utilisateur est alors arrêtée.
- **interruption par le matériel et le système d'exploitation :**
le programme utilisateur est alors stoppé et l'exécution de la routine d'interruption associée à l'interruption survenue est exécutée en mode superviseur.
- **interruption par l'horloge :**
c'est une interruption matérielle qui permet au système d'exploitation de passer de l'exécution d'un processus à un autre dans le cadre de la «multiprogrammation».
Cette interruption ne peut être ignorée par le processus.
On appelle ce mécanisme : la **préemption**.



Préemption : commutation par l'horloge



Préemption

Dans ce schéma, plusieurs processus sont présents en mémoire centrale.

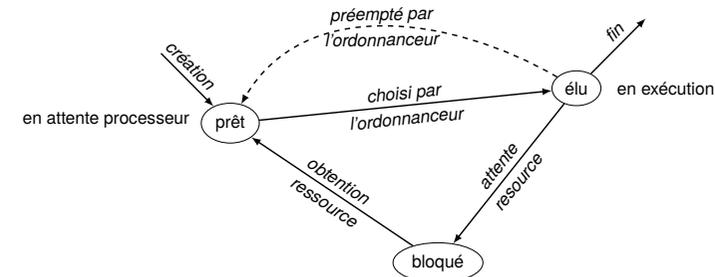
- P1 est élu et s'exécute sur le processeur.
- P2 et P4 sont dans l'état bloqué car ils attendent tous les deux une fin d'entrée- sortie avec le disque géré par l'unité d'échange (UE).
- P3, P5 et P6 quant à eux sont dans l'état prêt : ils pourraient s'exécuter (ils ont à leur disposition toutes les ressources nécessaires) mais ils ne le peuvent pas car le processeur est occupé par P1.

Lorsque P1 quittera le processeur parce qu'il a terminé son exécution, les trois processus P3, P5 et P6 auront tous les trois le droit d'obtenir le processeur.

Mais le processeur ne peut être alloué qu'à un seul processus à la fois : il faudra donc choisir entre P3, P5 et P6.

C'est le rôle de l'**ordonnancement** qui **élira** un des trois processus.

Préemption



L'**automate** montre les transitions pouvant exister entre l'**état prêt** (état d'attente du processeur) et l'**état élu** (état d'occupation du processeur).

Passage de :

- ▷ l'**état prêt** vers l'**état élu** constitue l'opération **d'élection** : allocation du processeur à un des processus prêts.
- ▷ l'**état élu** vers l'**état prêt** : **réquisition** du processeur, c-à-d que le processeur est retiré au processus élu alors que celui-ci dispose de toutes les ressources nécessaires à la poursuite de son exécution.

Cette réquisition porte le nom de **préemption**.

Ordonnancement préemptif ou non préemptif

- **non préemptif** ou **coopératif** : la transition de l'état élu vers l'état prêt est **interdite** : un processus quitte le processeur s'il a terminé son exécution ou s'il se bloque.
- **préemptif** : la transition de l'état élu vers l'état prêt est **autorisée** : un processus quitte le processeur s'il a terminé son exécution, s'il se bloque ou si le processeur est réquisitionné.

Primitives et commandes de processus

Obtention du PID, «Processus Identifiant»

```
#include <unistd.h>

pid_t getpid(void) // retourne le pid du processus appelant
pid_t getppid(void) // retourne le pid du père du processus appelant
```

Obtenir des informations sur les processus

La commande `ps` : retourne la liste des processus avec leur caractéristiques (pid, ppid, état, terminal, durée d'exécution, commande associée...)

```
pef@cube:~$ ps l
F  UID  PID  PPID  PRI  NI   VSZ  RSS  WCHAN  STAT  TTY          TIME COMMAND
0  1000  3889  3880  20   0  22840  4988  poll_s  Ss+   pts/0        0:00 bash
0  1000  25566  25565  20   0  23120  5888  poll_s  Ss+   pts/2        0:01 -bash
0  1000  29150  25566  20   0  54772  9300  signal  T     pts/2        0:06 vi build_architecture
0  1000  30199  30198  20   0  22772  5252  wait    Ss    pts/1        0:00 -bash
0  1000  30772  30770  20   0  22900  5672  poll_s  Ss+   pts/3        0:00 -bash
0  1000  32705  30199  20   0  31344  1580  -       R+    pts/1        0:00 ps l
```

Envoyer un signal à un processus

```
pef@cube:~$ kill -9 29150
```

Le signal n°9 correspond à `SIGKILL` : il termine de immédiatement le processus donné par son PID.

```
pef@cube:~$ ps l
F  UID  PID  PPID  PRI  NI   VSZ  RSS  WCHAN  STAT  TTY          TIME COMMAND
0  1000  3889  3880  20   0  22840  4988  poll_s  Ss+   pts/0        0:00 bash
0  1000  25566  25565  20   0  23120  5888  poll_s  Ss+   pts/2        0:01 -bash
0  1000  30199  30198  20   0  22776  5256  wait    Ss    pts/1        0:00 -bash
0  1000  30772  30770  20   0  22900  5672  poll_s  Ss+   pts/3        0:00 -bash
0  1000  32733  30199  20   0  31344  1604  -       R+    pts/1        0:00 ps l
```

Primitives et commandes de processus

Création de processus

La primitive `fork()` permet la **création dynamique** d'un nouveau processus qui s'exécute de manière concurrente avec le processus qui l'a créé :

```
#include <unistd.h>

pid_t fork(void)
```

- Tout processus Unix/Linux hormis le processus 0 est créée à l'aide de cette primitive.
- Le processus créateur (le père) crée un processus fils par un appel à la primitive `fork()` qui est une **copie exacte** de lui-même (code et données)

Déroulement de l'appel système `fork`

MODE UTILISATEUR

PROCESSUS PID 10279

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10 }
```

MODE NOYAU

Exécution de l'appel système `fork` :

- Si les ressources noyau sont disponibles :
- allouer une entrée de la table des processus au nouveau processus
 - allouer un **pid unique** au nouveau processus
 - dupliquer le contexte du processus parent (code, données, pile)
 - retourner :
 - ◊ 0 au processus fils
 - ◊ le pid du processus créée à son père

MODE UTILISATEUR

PROCESSUS PID 10279

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10 }
```

PROCESSUS PID 10280

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10 }
```

MODE NOYAU

Exécution de l'appel système `fork` :

- Si les ressources noyau sont disponibles :
- allouer...
 - allouer...
 - dupliquer...
 - retourner :
 - ◊ 0 au processus fils
 - ◊ le pid du processus créée à son père

Primitives et commandes de processus

Chaque processus père et fils reprend son exécution après le `fork()` :

- le code et les données étant strictement identiques, il est nécessaire de disposer d'un mécanisme pour différencier le comportement des deux processus après le `fork()` ;
- on utilise pour cela le code retour du `fork()` qui est différent chez le fils (toujours 0) et le père (pid du fils créée).

PROCESSUS PID 10279

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10  if (ret == 0)
11    printf("Je suis le fils");
12  else
13    {
14      printf("Je suis le pere");
15      printf("pid de mon fils %d",ret);
16    }
17 }
```

PROCESSUS PID 10280

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10  if (ret == 0)
11    printf("Je suis le fils");
12  else
13    {
14      printf("Je suis le pere");
15      printf("pid de mon fils %d",ret);
16    }
17 }
```

Pid du fils	10280
getpid	10279
getppid	pid du shell

getpid	10280
getppid	10279

Primitives et commandes de processus

Création de processus

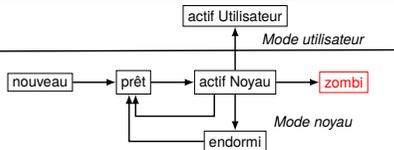
```
1 #include <stdlib.h>
2
3 void exit (int valeur);
4 pid_t wait (int *status);
```

un appel à la primitive `exit()` provoque la terminaison du processus effectuant l'appel avec un code retour valeur. Par défaut, en C, la sortie du dernier bloc d'instructions tient lieu d'`exit`.

- ▷ un processus qui se termine passe dans l'état **Zombi** tant que son père n'a pas pris en compte sa terminaison;
- ▷ le processus père «récupère» la terminaison de ses fils par un appel à la primitive `wait()`

PROCESSUS PID 10279

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10  if (ret == 0)
11    printf("Je suis le fils");
12  else
13    {
14      printf("Je suis le pere");
15      printf("pid de mon fils %d",ret);
16      wait();
17    }
18 }
```



PROCESSUS PID 10280

```
1 int main (void)
2 {
3   pid_t ret;
4   int i, j;
5
6   for(i=0; i<8; i++)
7     i = i + j;
8
9   ret = fork();
10  if (ret == 0)
11    printf("Je suis le fils");
12  else
13    {
14      printf("Je suis le pere");
15      printf("pid de mon fils %d",ret);
16      wait();
17    }
18 }
```

5 Communications Inter-Processus

- Signaux ;
- Tubes ;
- Mémoire partagée.

Signaux

Définition

Un signal est une **information atomique** envoyée à un processus ou à un groupe de processus par le système d'exploitation ou par un autre processus.

Le signal constitue un système de **communication entre processus** qui peut les amener à réagir en conséquence :

Un signal peut provoquer 3 types de réaction :

- l'exécution du processus est **immédiatement dérivée** vers une fonction spécifique, qui réagit au signal ;
- le signal est ignoré ;
- le signal provoque l'arrêt du processus (avec ou sans génération d'un fichier *core*).

Par défaut, la réception d'un signal termine le processus.

Exemple de signaux envoyés depuis le shell

- ▷ «Ctrl-c» : terminaison du processus en cours d'exécution depuis le shell ;
- ▷ «Ctrl-z» : suspension du processus ;
- ▷ à l'aide de la commande «kill» :

```
□ xterm  
$ kill -9 34567
```

envoi le signal de terminaison *SIGKILL* au processus de PID 34567.

Signaux : les différents types

Deux catégories d'événement déclenchant un signal :

- **extérieur au processus** : frappe caractère, terminaison d'un autre processus, etc.
- **intérieur au processus**, c-à-d relatif à l'exécution du processus par le CPU :
 - ◊ une erreur arithmétique (division par zéro) ;
 - ◊ violation mémoire, «*segmentation fault*» : levée d'une trappe.

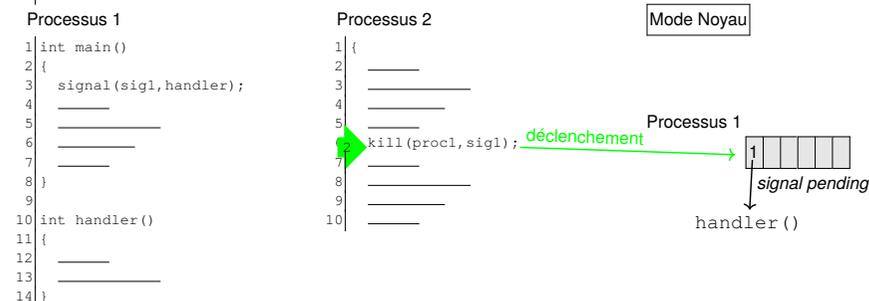
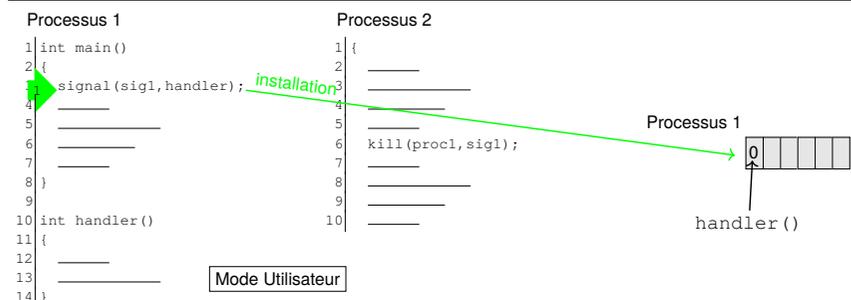
signaux relatifs à la fin de processus	
SIGCHLD (17)	mort du fils
SIGKILL (9)	signal de terminaison
signaux relatifs à des erreurs	
SIGILL (4)	instruction illégale
SIGFPE (8)	erreur arithmétique
SIGSEGV (11)	violation mémoire
SIGPIPE (13)	écriture dans un tube sans lecteur
signaux relatifs aux temporisations	
SIGALRM (14)	fin de temporisation (fonction alarm)
signaux relatifs aux interactions avec le terminal (extinction, frappe touche DELETE et BREAK)	
SIGHUP, SIGINT (ctrl C), SIGQUIT (ctrl \)	
signaux relatifs à la mise au point de programmes	
Deux signaux disponibles pour les utilisateurs	
SIGUSR1, SIGUSR2	

Signaux : la programmation

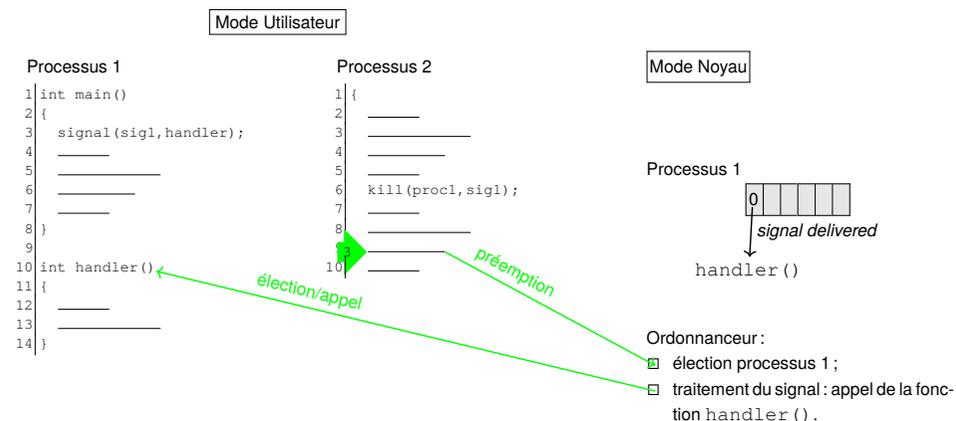
```
#include <signal.h>  
void message1(int n) {  
    if (n == SIGQUIT) {  
        printf("SIGQUIT recu\n");  
        exit(1) ;  
    }  
    else {  
        printf("SIGINT recu\n");  
        exit(2) ;  
    }  
}  
void message2(int n) {  
    printf("Signal %d : recu\n", n);  
}  
int main(int argc, char **argv) {  
    int n;  
    signal(SIGINT, message1);  
    signal(SIGQUIT, message1);  
    signal(SIGUSR1, message2);  
    signal(SIGUSR2, message2);  
    for( ; ; )  
}
```

- Envoyer un signal à un processus:
`int kill (pid_t pid, int sig)`
- Associer un «*handler*» à un signal:
`signal(int sig, fonction)`
Modifier le «*handler*»:
`sigaction(int sig, struct sigaction action, NULL)`
- Armer une temporisation
`int alarm (int secondes)`
au bout de secondes unités de temps, le signal SIGALRM est envoyé au processus
- Attendre un signal
`int pause();`

Signaux : l'exécution



Signaux : l'exécution



Signaux :

- Le processus P_2 envoie un signal au processus P_1 (signal pendant chez P_1).
- Plus tard**, le processus P_1 est élu. Il quitte le **mode noyau**. Il exécute le handler du signal en **mode utilisateur** (signal délivré à P_1).

Interruptions :

- Le dispositif matériel X envoie une interruption lors de l'exécution du processus P_1 .
- Immédiatement**, le processus P_1 est dérivé en **mode noyau** pour exécuter le handler «routine» de l'interruption.

Tuyaux

Définition et contexte d'utilisation

Les tuyaux permettent à un processus d'**envoyer des données** à un autre processus. Ces données sont envoyées directement en mémoire sans être stockées temporairement sur disque, ce qui est donc très rapide.

Tout comme un tuyau de plomberie, un tuyau de données a deux côtés :

- un côté permettant d'écrire des données
- un côté permettant de les lire.

Chaque côté du tuyau est un descripteur de fichier ouvert soit en lecture soit en écriture, ce qui permet de s'en servir très facilement, au moyen des fonctions d'entrée / sortie classiques.

Caractéristiques

La lecture d'un tuyau est **bloquante**, c-à-d que : si aucune donnée n'est disponible en lecture, le processus essayant de lire le tuyau sera suspendu (il ne sera pas pris en compte par l'Ordonnanceur et n'occupera donc pas inutilement le processeur) jusqu'à ce que des données soient disponibles.

L'utilisation de cette caractéristique comme effet de bord peut servir à **synchroniser des processus entre eux** (les processus lecteurs étant synchronisés sur les processeur écrivains).

Tuyaux

Caractéristiques

La lecture d'un tuyau est **destructrice**, c-à-d que si plusieurs processus lisent le même tuyau, **toute donnée lue par l'un disparaît pour les autres**.

Par exemple :

- ▷ si un processus écrit les deux caractères «ab» dans un tuyau lu par les processus A et B et que A lit un caractère dans le tuyau, il lira le caractère «a» qui disparaîtra immédiatement du tuyau sans que B puisse le lire.
- ▷ Si B lit alors un caractère dans le tuyau, il lira donc le caractère «b» que A, à son tour, ne pourra plus y lire.

Si l'on veut envoyer des informations identiques à plusieurs processus, il est nécessaire de **créer un tuyau vers chacun d'eux**.

Synthèse

Les tuyaux sont très utilisés sous UNIX pour faire communiquer des processus entre eux.

Deux contraintes :

- Les tuyaux ne permettent qu'une communication **unidirectionnelle** ;
- Les processus pouvant communiquer au moyen d'un tuyau doivent être issus d'un **ancêtre commun**.

Tuyaux et appel système

L'appel système `pipe()`

Un tuyau se crée très simplement au moyen de l'appel système `pipe()` :

- L'argument de `pipe()` est un tableau de deux descripteurs de fichier (un descripteur de fichier est du type `int` en C) similaires à ceux renvoyés par l'appel système `open()` et qui s'utilisent de la même manière.
- Lorsque le tuyau a été créé, le premier descripteur, `tuyau[0]`, représente le côté lecture du tuyau et le second, `tuyau[1]`, représente le côté écriture.

Un moyen *mnémotechnique* pour se rappeler quelle valeur représente quel côté, est de rapprocher ceci de l'entrée et de la sortie standard :

- ▷ L'entrée standard, dont le numéro du descripteur de fichier est toujours 0, est utilisée pour lire au clavier : 0 lecture.
- ▷ La sortie standard, dont le numéro du descripteur de fichier est toujours 1, est utilisée pour écrire à l'écran : 1 écriture.

Pour faciliter la lecture des programmes et éviter des erreurs, il est préférable de définir deux constantes dans les programmes qui utilisent les tuyaux :

```
#define LIRE 0
#define ECRIRE 1
```

Tuyaux

Méthodologie

La mise en place d'un tuyau permettant à deux processus de communiquer est relativement simple.

Prenons l'exemple d'un processus qui crée un fils auquel il va envoyer des données :

- Le processus père crée le tuyau au moyen de `pipe()`.
- Puis il crée un processus fils grâce à `fork()`.

Les deux processus partagent donc le tuyau.

- ▷ Le père va écrire dans le tuyau, il n'a pas besoin du côté lecture, donc il le ferme.
- ▷ Le fils ferme le côté écriture.
- ▷ Le processus père peut dès lors envoyer des données au fils.

Attention

Le tuyau doit être créé avant l'appel à la fonction `fork()` pour qu'il puisse être partagé entre le processus père et le processus fils (les descripteurs de fichiers ouverts dans le père sont hérités par le fils après l'appel à `fork()`).

Tuyaux

Recommandations pour la fermeture d'un des bouts du tuyau

Un tuyau ayant plusieurs lecteurs peut poser des problèmes, c'est pourquoi le processus père doit fermer le côté lecture après l'appel à `fork()`.

Il en va de même pour un tuyau ayant plusieurs écrivains donc le processus fils doit aussi fermer le côté écriture.

Omettre de fermer le côté inutile peut entraîner l'**attente infinie** d'un des processus si l'autre se termine.

Exemple de scénario bloquant

Imaginons que le processus fils n'ait pas fermé le côté écriture du tuyau.

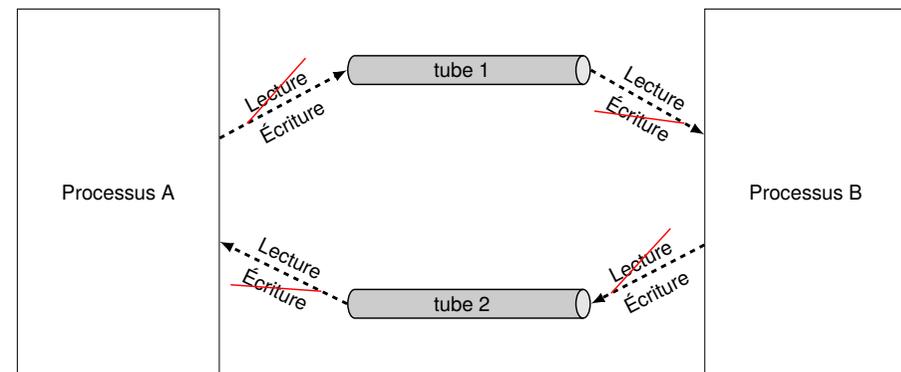
- Si le processus père se termine, le fils va rester bloqué en lecture du tuyau sans recevoir d'erreur puisque son descripteur en écriture est toujours valide.
- En revanche, s'il avait fermé le côté écriture, il aurait reçu un code d'erreur en essayant de lire le tuyau, ce qui l'aurait informé de la fin du processus père.

Tuyaux et signal

Lorsqu'un processus écrit dans un tuyau qui n'a plus de lecteurs (parce que les processus qui lisaient le tuyau sont terminés ou ont fermé le côté lecture du tuyau), ce processus recoit le signal `SIGPIPE`.

Comme le comportement par défaut de ce signal est de terminer le processus, il peut être intéressant de le gérer afin, par exemple, d'avertir l'utilisateur puis de quitter proprement le programme.

Tuyaux

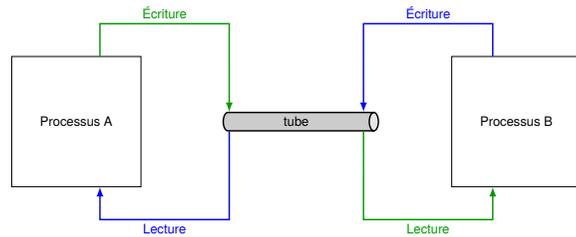


— Fermeture des descripteurs inutiles

Tuyaux et synchronisation

Un effet de bord intéressant des tuyaux est la possibilité de **synchroniser** deux processus :

- un processus tentant de lire un tuyau dans lequel il n'y a rien est **suspendu** jusqu'à ce que des données soient disponibles.
- il est possible de **synchroniser** le processus **lecteur** sur le processus **écrivain** :



Limitation des tuyaux

- ils ne permettent qu'une communication unidirectionnelle ;
- les processus pouvant communiquer au moyen d'un tuyau doivent être issus d'un ancêtre commun.

D'autres moyens de communication entre processus sont possibles pour pallier ces inconvénients :

- les **tuyaux nommés** ;
- les **sockets réseaux** qui permettent une communication bidirectionnelle entre divers processus, fonctionnant sur la même machine ou sur des machines reliées par un réseau.

Tuyaux nommés

Les processus désirant communiquer **désignent le tuyau** qu'ils souhaitent utiliser.

Ceci se fait grâce au **système de fichiers**.

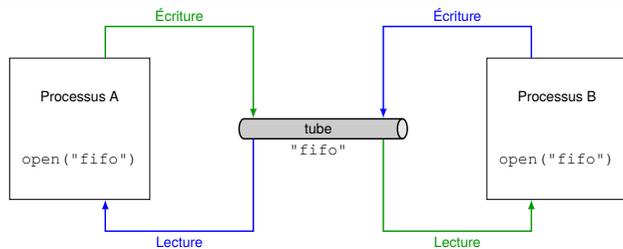
- Un tuyau nommé est un fichier :

```
linux$ mkfifo fifo
linux$ ls -l fifo
prw-r--r-- 1 pef pef 0 Jan 10 17:22 fifo
```

il s'agit cependant d'un fichier d'un type particulier, comme le montre le p dans l'affichage de ls.

- une fois créé, un tuyau nommé s'utilise très facilement :

```
linux$ echo coucou > fifo &
[1] 25312
linux$ cat fifo
[1] + done      echo coucou > fifo
Coucou
```



Tuyaux nommés et synchronisation

Un processus tentant d'écrire dans un tuyau nommé ne possédant pas de lecteurs sera **suspendu** jusqu'à ce qu'un processus ouvre le tuyau nommé en lecture.

C'est pourquoi, dans l'exemple, *echo* a été lancé en tâche de fond, afin de pouvoir récupérer la main dans le shell et d'utiliser *cat*.

On peut étudier ce comportement en travaillant dans deux fenêtres différentes.

De même, un processus tentant de lire dans un tuyau nommé ne possédant pas d'écrivains se verra **suspendu** jusqu'à ce qu'un processus ouvre le tuyau nommé en écriture.

On peut étudier ce comportement en reprenant l'exemple mais en lançant d'abord *cat* puis *echo*.

Remarque

En particulier, ceci signifie qu'un processus ne peut pas utiliser un tuyau nommé pour **stocker des données** afin de les mettre à la disposition d'un autre processus une fois le premier processus terminé.

Synchronisation

On retrouve le même phénomène de synchronisation qu'avec les tuyaux classiques.

En C, un tuyau nommé se crée au moyen de la fonction `mkfifo()`.

Il doit ensuite être ouvert (grâce à `open()` ou à `fopen()`) et s'utilise au moyen des fonctions d'entrées / sorties classiques.

Tuyaux nommés

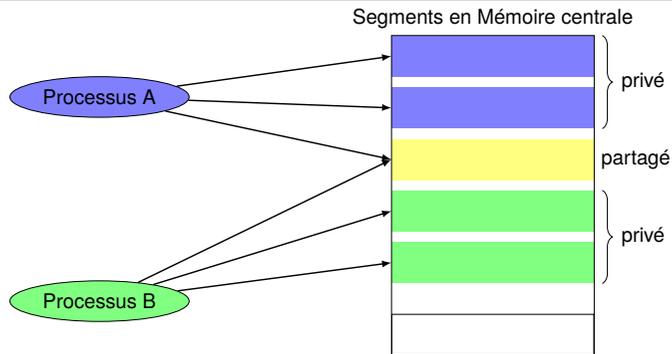
Processus écrivain

```
1#include <stdio.h>
2#include <sys/types.h>
3#include <sys/stat.h>
4main()
5{
6    mode_t mode;
7    int tube;
8    mode = S_IRUST | S_IWUSR;
9    mkfifo ("fictube",mode); /* création fichier FIFO */
10   tube = open("fictube",O_WRONLY); /* ouverture fichier */
11   write (tube,"0123456789",10); /* écriture dans fichier */
12   close (tube);
13   exit(0);
14}
```

Processus lecteur

```
1#include <stdio.h>
2#include <sys/types.h>
3#include <sys/stat.h>
4
5main()
6{
7    int tube;
8    char buf[11];
9    tube = open("fictube",O_RDONLY); /* ouverture fichier */
10   read (tube,buf,10); /* lecture du fichier */
11   buf[11]=0;
12   printf("J'ai lu %s\n", buf);
13   close (tube);
14   exit(0);
15}
```

Mémoire partagée ou «Shared Memory»



La **mémoire partagée** est une **région de mémoire ou segment** dont l'utilisation est partagée entre plusieurs processus :

- un processus doit **attacher la région** à son espace d'adressage avant de pouvoir l'utiliser ;
- cette région de mémoire partagée est **identifiée par une clé unique** ;
- l'accès aux données présentes dans la région peut requérir une **synchronisation** ;
- la région ou segment partagé correspond à des pages de mémoire.

Mémoire partagée : les instructions

- Création ou accès à la mémoire partagée :

```
int shmget(key_t cle, int taille, int option);
```

- ▷ shmget : retourne l'identifiant interne propre au processus de la région partagée ;
- ▷ cle : identifiant externe de la région ;
- ▷ taille : taille de la région ;
- ▷ option : bits de configuration : IPC_CREAT, IPC_EXCL et droits d'accès.

- Attachement de la mémoire partagée :

```
void *shmat(int shmId, void *shmdat, int option);
```

- ▷ shmat : retourne l'adresse de la région partagée dans l'espace d'adressage du processus ;
- ▷ shmId : identification interne de la région ;
- ▷ shmdat : adresse dans la région partagée, en général 0 ;
- ▷ option : similaire à l'instruction précédente.

- Détachement de la région partagée :

```
void *shmdt(void *adresse)
```

- ▷ adresse : l'adresse interne au processus de la mémoire partagée.

- Destruction de la région partagée :

```
int shmctl(int shmId, int cmd, struct shmId_ds *buf);
```

- ▷ shmId : l'identifiant de la région ;
- ▷ cmd : la commande, ici IPC_RMID ;
- ▷ buf : une structure permettant la récupération des statistiques d'accès sur la région ;

Mémoire partagée : création et écriture

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/shm.h>

#define CLE 256

int main(void)
{
    int shmId;
    char *mem;

    printf("Mon pid est %d\n", getpid());

    /* création du segment de mémoire partagée avec la clé CLE */
    shmId = shmget((key_t)CLE, 1000, 0750 | IPC_CREAT | IPC_EXCL);

    /* attachement */
    if ((mem = shmat(shmId, NULL, 0)) == (char *)-1) {
        perror("shmat");
        exit(2);
    }

    /* écriture dans le segment */
    strcpy(mem, "voici une écriture dans le segment");
    exit(0);
}
```

Mémoire partagée : attachement et lecture

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/shm.h>

#define CLE 256

int main() {
    char *mem;
    int shmId;

    /* récupération du segment de mémoire */
    shmId = shmget((key_t)CLE, 0, 0);

    /* attachement */
    mem = shmat(shmId, NULL, 0);

    /* lecture dans le segment */
    printf("lu: %s\n", mem);

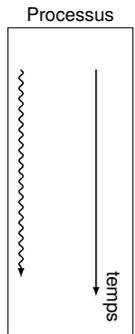
    /* détachement du processus */
    shmdt(mem);

    /* destruction du segment */
    shmctl(shmId, IPC_RMID, NULL);
    exit(0);
}
```

```
xterm
pef@beelink:~/ParallelismeI$ ./shm_mem_write
Mon pid est 17396
pef@beelink:~/ParallelismeI$ ipcs -mp
----- Shared Memory Creator/Last-op PIDs -----
shmId  owner  cpid  lpid
196608  pef    2430  2246
327681  pef    17396 17396
pef@beelink:~/ParallelismeI$ ./shm_mem_read
lu: voici une écriture dans le segment
pef@beelink:~/ParallelismeI$ ipcs -mp
----- Shared Memory Creator/Last-op PIDs -----
shmId  owner  cpid  lpid
196608  pef    2430  2246
```

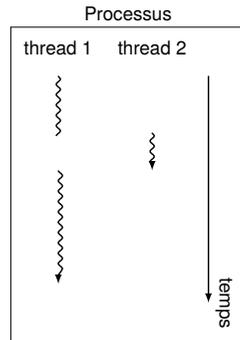
6 Le concept de thread

Un **processus** peut être vu comme des instructions qui s'exécutent les unes après les autres : cela forme un «fil d'exécution», ou «*thread*» :



On parle aussi de «*processus de poids lourd*».

On peut créer plus d'une «*thread*» et **partager le temps** alloué au Processus, entre l'exécution de ces différentes threads :



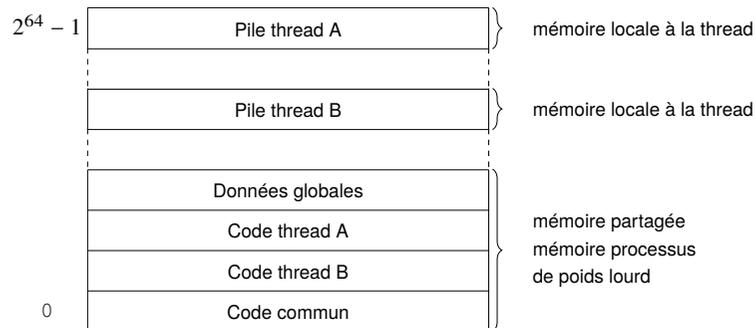
On parle de processus «*de poids léger*» pour chaque thread existant dans le processus.

Du point de vue de l'utilisateur, les différentes threads semblent se dérouler en **parallèle**.

- Chaque thread :
- ▷ **partage** l'espace mémoire du processus ;
 - ▷ possède sa propre **pile**.

Concept de thread

Threads et espace d'adressage mémoire



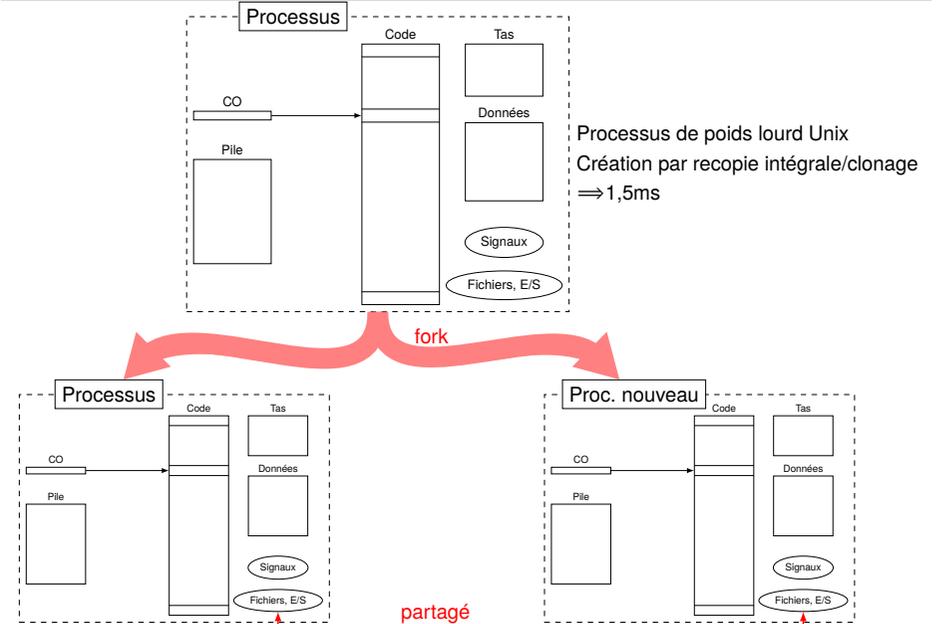
Une **thread** est plus légère à gérer et sa gestion peut être personnalisée.

La **commutation de contexte** est plus simple et plus entre threads qu'entre processus.

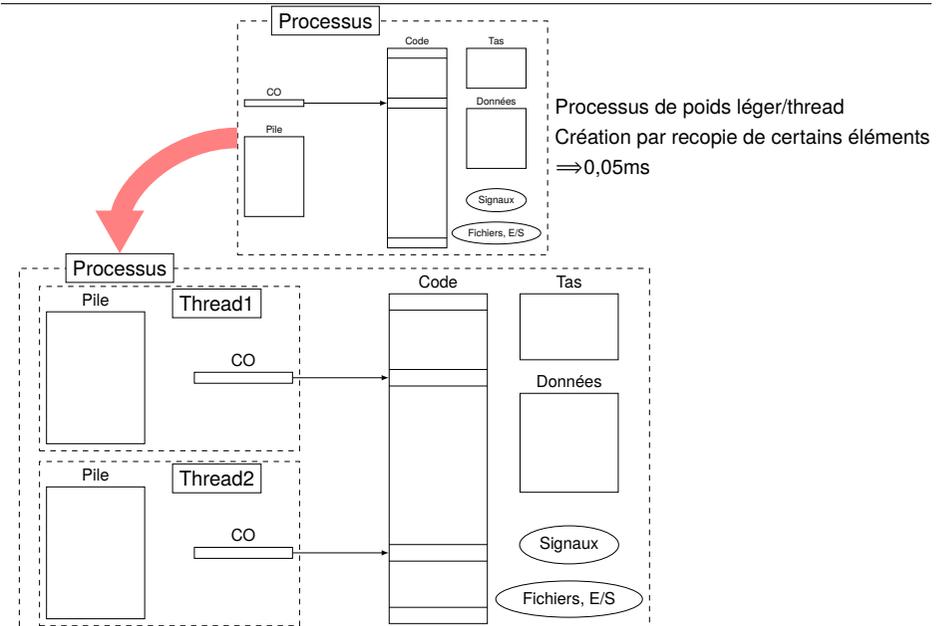
États uniques pour chaque thread :

- identificateur de thread ;
- état des registres : CO, «*compteur ordinal*», registre d'état, registre de pile ;
- pile ;
- masques de signaux (décrivent à quels signaux la thread répond) ;
- priorité ;
- données privées de la thread.

Processus de poids lourd



Processus de poids léger



Processus vs threads

Critique des processus

Un processus ne convient pas toujours :

- ▷ **contexte lourd**, coûteux à créer et à détruire ;
- ▷ **pas efficace** : changement de contexte lent entre les processus ;
- ▷ **partage de données** «pas naturel» : il faut utiliser des IPC, «*Inter Process Communication*», pour passer par l'OS ;
- ▷ **pas intégré** dans les langages de programmation (à part le fork) ;
- ▷ fournis par des **opérations OS complexes**, pas souples du point de vue de l'utilisateur ;
- ▷ **programmation difficile**, non contrôlable par l'utilisateur.

Rappel sur l'exécution des processus

- ▷ le temps processeur est **partagé** entre les différents processus ;
- ▷ le processeur **passé d'un processus à l'autre** suivant un intervalle régulier ou lorsque un processus actif est retardé ;
- ▷ permet de dé-programmer (de-schedule) les processus bloqués en attente de fin d'E/S par exemple.

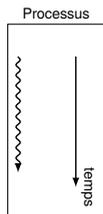
Thread : dérivée de la notion de processus

- **unité d'exécution concurrente** dans un même programme applicatif («*Light-weight process*») ;
- introduit la notion de programmation «*multi-threads*»
 - ◇ les threads partagent le même espace d'adressage, la mémoire du processus : code, données globales, tas
 - ◇ elles exécutent **même code** ou des **fonctions dédiées** ;
 - ◇ elles **partagent** tout ou partie des **ressources OS** (E/S par exemple) ;
 - ◇ elles peuvent disposer d'un **contexte de travail privé** alloué par l'application ;
- bibliothèque standardisée Posix : `pthread`.

Mise en œuvre des threads

Processus classique dit «lourd»

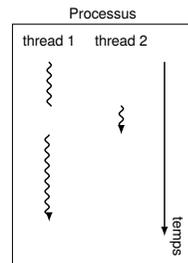
- espace d'adressage protégé à un fil d'exécution :



- **Commutation de contexte** : Toujours un changement d'espace d'adressage
- **Communication** : Outils noyau entre espace d'adressage : tubes, «*messages queues*»
- **pas de parallélisme dans le même espace d'adressage**.

Processus avec threads appelées «léger»

- espace d'adressage protégé à *n* fils d'exécution :



- **Commutation de contexte** : allégée, pas de changement d'espace d'adressage d'un fil à l'autre
- **Communication** : allégée :
 - les fils partagent les données ;
 - ⇒ **attention à la synchronisation !**
- **parallélisme dans le même espace d'adressage**.

Threads POSIX

IEEE Portable Operating System Interface, POSIX, 1003.1 standard

- Création :

```
int pthread_create (pthread_t *thread, pthread_attr_t *attr,
                  void *(*start_routine)(void *), void *arg);
```

- synchronisation entre threads :

```
int pthread_join ( pthread_t thread, void **value_ptr);
```

- terminaison de threads :

```
int pthread_exit (void **value_ptr);
```

La liste complète des instructions

Thread call	Description
<code>pthread_create</code>	Create a new thread
<code>pthread_exit</code>	Terminate the calling thread
<code>pthread_join</code>	Wait for a specific thread to exit
<code>pthread_yield</code>	Release the CPU to let another thread run
<code>pthread_attr_init</code>	Create and initialize a thread's attribute structure
<code>pthread_attr_destroy</code>	Remove a thread's attribute structure

Threads POSIX

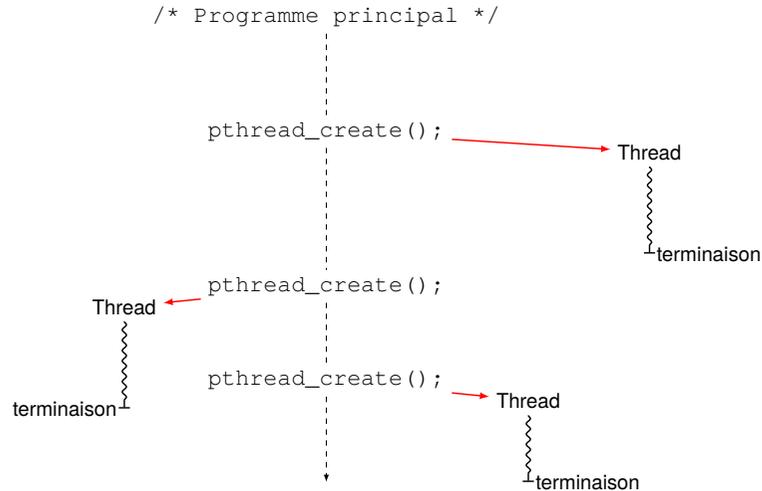
Exécution d'une thread POSIX avec attente de terminaison

```
/* Programme principal */
pthread_create(&thread1, NULL, procl, &arg);
return (*status);
pthread_join(thread1, *status);
```

- ▷ depuis le programme principal, le `pthread_create` déclenche la **thread 1** et lui transmet `&arg` ;
- ▷ le programme principal devient lui-même une **thread** ;
- ▷ le programme principal attend la terminaison de la **thread 1** avec le `pthread_join` et reçoit `status`.

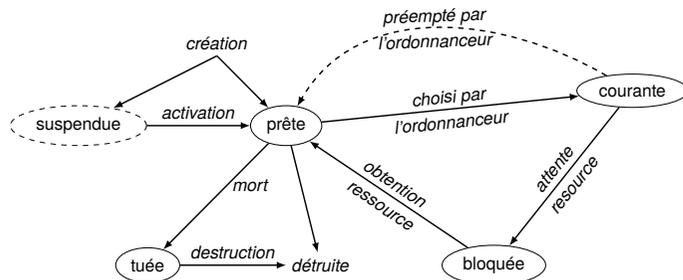
Threads POSIX

Exécution d'une thread POSIX avec attente de terminaison



- ▷ en les lançant en mode «*detached thread*» ;
- ▷ lorsque ces threads terminent, elles sont détruites et leur espace mémoire est récupéré.

Thread



La thread évolue suivant les différents états :

- ▷ la notion de «*courante*» correspond à la thread qui s'exécute.
- ▷ Courante ⇒ prête (préemption) :
 - ▷ le CPU est retiré à la thread courante pour être attribué à la thread la plus prioritaire ;
- ▷ Courante ⇒ bloquée (mise en attente)

La thread doit arrêter son exécution pour attendre l'arrivée d'un événement (fin d'E/S)

- ◊ elle libère volontairement le CPU ;
- ◊ l'OS alloue le CPU à la thread prête la plus prioritaire ;

▷ Bloquée ⇒ prête (réveil)

La thread est réveillée par :

- ◊ un événement ou par une fonction d'interruption (fin d'E/S)
- ◊ la thread courante (le scheduler ?)

Elle rejoint le groupe des demandeurs de ressource CPU.

▷ Prête ⇒ courante (élection), le CPU est attribué à la thread prête la plus prioritaire ⇒ elle devient la thread courante.

Thread POSIX : exemple de code

```
#include <stdio.h>
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>
#include <pthread.h>

pthread_t pthread_id[3];

void *f_thread(void *d)
{
    int i = *((int *) d);
    printf ("je suis la %d-eme pthread du processus %d, mon id est %ld\n", i, getpid(),
pthread_self());
}

int main(void)
{
    int i;

    for (i=0; i<3; i++)
        if (pthread_create(&pthread_id[i], NULL, f_thread, (void *) &i) == -1)
            fprintf(stderr, "erreur de creation pthread numero %d\n", i);
    printf ("je suis la thread initiale du processus %d, mon id est %ld\n", getpid(),
pthread_self());
    for (i=0; i<3; i++)
        pthread_join(pthread_id[i], NULL);
}
```

Attention

Ce programme d'exemple ne protège pas l'accès à la variable *i* utilisée par chaque thread pour indiquer son numéro.
⇒ la valeur de *i* affichée peut être la mauvaise...

7 Problèmes d'accès concurrent : synchronisation et éviter les corruptions

Communication entre processus

Il existe deux mécanismes principaux pour faire communiquer deux processus :

- la communication via la **mémoire partagée** ;
- la communication par **échange de messages** au travers d'un tube ;

Au niveau d'une thread

Les threads qui ont besoin d'échanger des données le font via la **mémoire** en partageant une partie de la mémoire appartenant à leur **espace d'adressage commun**.

Problèmes

- ▷ Que se passe-t-il si deux threads **lisent en même temps** ? ...rien de particulier.
- ▷ Que se passe-t-il si une thread **lit pendant qu'une autre écrit** ? ...un gros problème, la donnée risque de ne pas être dans un état cohérent et peut ne correspondre ni à la donnée avant l'écriture, ni à la donnée après l'écriture.

Exécution de l'exemple de code précédent :

```
xterm
pef@beelink:~/ParallelismeI$ ./pthread_example
je suis la 2-eme pthread du processus 15214, mon id est 139747692533504
je suis la 2-eme pthread du processus 15214, mon id est 139747684140800
je suis la thread initiale du processus 15214, mon id est 139747701020480
je suis la 3-eme pthread du processus 15214, mon id est 139747675748096
```

la variable *i* utilisé par la thread a été modifiée par une autre thread!

- ▷ Que se passe-t-il si deux threads **écrivent simultanément** ? ...de **gros problèmes** en perspective.

⇒ **Problèmes de synchronisation** des processus et de **protection des accès**.

Exemple de corruption

Guichet bancaire et accès simultanée en dépôt et en retrait

- ▷ dépôt de s euros au guichet;
 - ▷ retrait par carte de s euros;
- } *simultanément*

Dépôt

- 1 $x := \text{moi.solde}$
- 2 $x := x + s$
- 3 $\text{moi.solde} := x$

Retrait

- 4 $x' := \text{moi.solde}$
- 5 $x' := x' - s$
- 6 $\text{moi.solde} := x'$

Entrelacement des instructions :

- 1 2 3 4 5 6

$x := \text{moi.solde}; x := x + s; x' := \text{moi.solde}; x' := x' - s; \text{moi.solde} := x; \text{moi.solde} := x'$
⇒ **Une perte d'argent!**

- 1 2 3 4 5 6 3

$x := \text{moi.solde}; x := x + s; x' := \text{moi.solde}; x' := x' - s; \text{moi.solde} := x'; \text{moi.solde} := x$
⇒ **Un gain d'argent!**

Illustration en assembleur Z80

<pre>int solde; void main() { int x; x = solde; x = x + 100; solde = x; }</pre>	<pre>_main:: ;compteur.c:6: x = solde; ld bc, (_solde) ;compteur.c:7: x = x + 100; ld hl, #0x0064 add hl, bc ld (_solde), hl ;compteur.c:8: solde = x; ;compteur.c:9: }</pre>
---	--

La valeur 100 en hexa sur 16bits

Utilisation du compilateur C *sdcc* vers processeur z80.

Interactions

Problème

Les opérations de lecture/écriture en mémoire ne sont pas **atomiques** :
⇒ une lecture, comme une écriture, peut être **interrompue** au cours de son action.

La solution

Utiliser une **exclusion mutuelle** :

- ▷ elle rend l'opération de lecture/écriture **atomiques** en restreignant l'accès à **un segment de mémoire partagé à une seule thread à la fois**.

Risques ?

Imaginons qu'il existe :

- **plusieurs segments de mémoire partagée** s_1, s_2 et s_3 ;
- **plusieurs threads** t_1, t_2 et t_3 ;

▷ t_1 bloque l'accès à s_1 , t_2 bloque l'accès à s_2 et t_3 bloque l'accès à s_3 ;

▷ t_1 pour libérer s_1 a besoin d'accéder à s_2 ;

▷ Mais t_2 pour libérer s_2 , a besoin de lire s_3 .

▷ Si t_3 n'a pas besoin de quoi que ce soit d'autre, il fait ce qu'il a à faire, puis libère s_3 , ce qui libère s_2 et par la suite s_1 ... ouf !!

▷ par contre, si t_3 a besoin de lire s_1 pour libérer s_3 ... ⇒ situation **d'interblocage**.

Notion de ressources

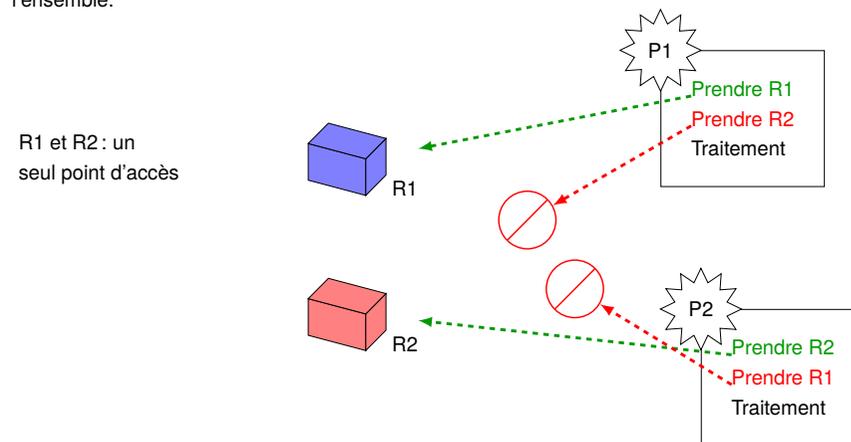
Définitions

- Une ressource désigne toute entité dont a besoin un processus pour s'exécuter.
 - ◇ Ressource matérielle (processeur, périphérique)
 - ◇ Ressource logicielle (variable)
- Une ressource est caractérisée
 - ◇ par un état : «libre» ou «occupée»
 - ◇ par son **nombre de points d'accès** : nombre de processus pouvant l'utiliser en même temps.
- Utilisation d'une ressource par une thread, «processus de poids léger» :
 - ◇ Trois étapes :
 - * Allocation
 - * Utilisation
 - * Restitution
 - ◇ Les phases **d'allocation** et de **restitution** doivent assurer que le ressource est utilisée conformément à son **nombre de points d'accès**.
- Une **ressource critique à un seul point d'accès**.

Interblocage, famine et coalition

Interblocage

Ensemble de n processus **attendant** chacun une ressource déjà **possédée** par un autre processus de l'ensemble.



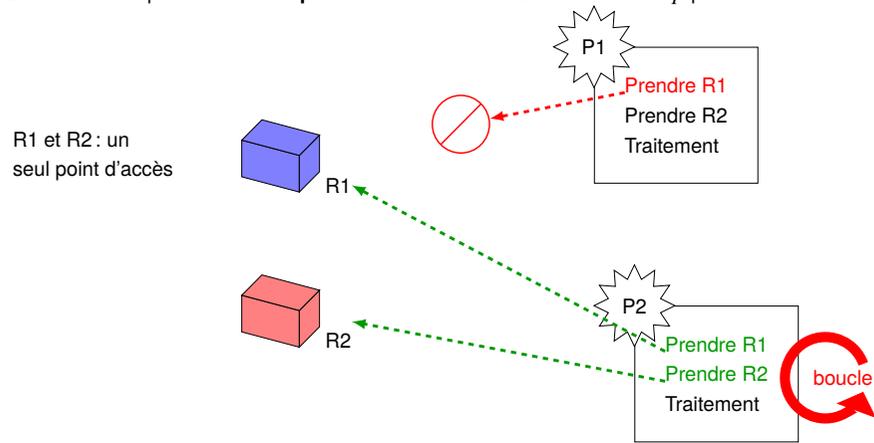
Aucun processus ne peut poursuivre son exécution :

⇒ **Attente infinie!**

Interblocage, famine et coalition

Coalition

Ensemble de n processus **monopolisant** les ressources **au détriment** de p processus.



Le processus P1 n'obtiendra jamais R1, car P2 la monopolise :

⇒ **Famine!**

⇒ Attente finie, mais **indéfinie**.

P1 sera débloqué lorsque P2 terminera.

Interblocage, Famine, Coalition

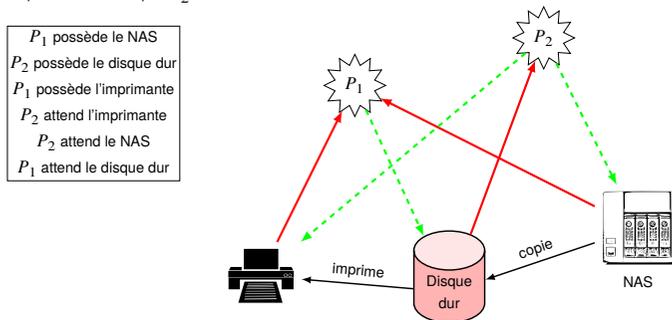
Conditions nécessaires à l'obtention d'un interblocage

- **Ressource critique** : Une ressource au moins doit se trouver dans un mode non partageable
- **Occupation et attente** : Un processus au moins occupant une ressource attend d'acquies des ressources supplémentaires détenues par d'autres processus
- **Pas de réquisition** : Les ressources sont libérées sur seule volonté des processus les détenant
- **Attente circulaire** : au moins un processus P1 attend une ressource détenue par un autre processus P2, P2 attend lui-même une ressource détenue par P1

Détection automatique ?

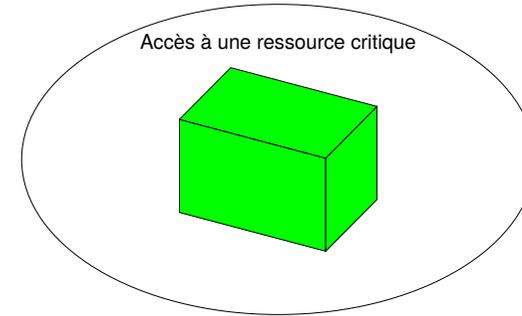
Attente Circulaire... la détection est possible mais complexe à réaliser...et que faire ensuite ?

- ▷ P_2 attend l'imprimante détenue par P_1 ;
- ▷ P_1 attend le disque dur détenue par P_2



L'exclusion mutuelle entre processus

Un premier problème de synchronisation est celui de l'accès par un ensemble de processus à une **ressource critique**, c'est-à-dire une ressource à un **seul point d'accès** donc utilisable par un seul processus à la fois.



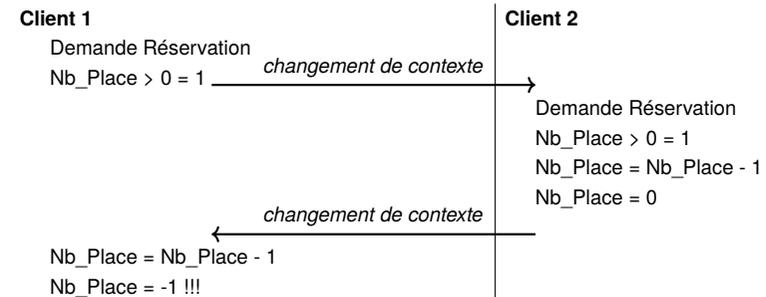
L'exclusion mutuelle entre processus

Illustration du problème : réservation d'une place

```

1 Réservation :
2 Si nb_place > 0
3 alors
4   Réserver une place
5   nb_place = nb_place - 1
6 fsi
    
```

Utilisation par deux clients s'exécutant en concurrence



Définitions de la section critique

Processus

Début
Entrée Section Critique

Ressource critique
Nb_Place

Sortie Section Critique
Fin

L'entrée et la sortie de la «*Section Critique*» doivent assurer qu'**à tout moment**, un **seul processus** s'exécute en SC \Rightarrow **exclusion mutuelle**.

SECTION CRITIQUE
(code d'utilisation de la ressource critique)

Section critique

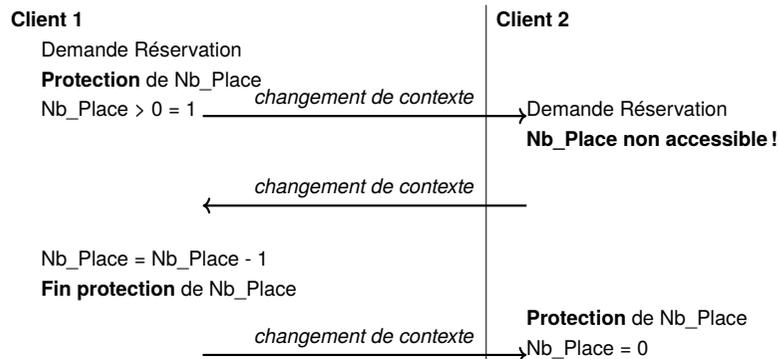
Partie d'un programme dont l'exécution de doit pas **s'entrelacer** avec d'autres programmes.

Une fois qu'une tâche y entre, il faut lui **permettre de terminer** cette section sans permettre à d'autres tâches de travailler sur les mêmes données.

L'exclusion mutuelle entre processus

```
1 Réserveur :
2 Protection de nb_place
3 Si nb_place > 0
4 alors
5   Réserver une place
6   nb_place = nb_place - 1
7 fsi
8 Fin protection de nb_place
```

Utilisation par deux clients s'exécutant en concurrence avec exclusion mutuelle



Exclusion mutuelle : généralisation du problème

Problématique présente dans :

- les bases de données
- le partage des ressources (fichiers, connexions, réseaux, ...)
- les automates (exemple du DAB, «distributeur automatique de billets»)
- le matériel et périphérique (Disquedur, ...)
- le développement (MMORPG, clients/serveur, ...)
- etc.

Ecriture algorithmique

```
Repeat
  Section d'entrée
  Section critique, SC
  Section de sortie
  Section restante, SR
Forever
```

Plusieur types de solutions

- Solution matérielle ;
- Solutions algorithmiques ;
- Solutions fournies par le Système d'Exploitation.

Exclusion mutuelle : solution matérielle

Processus 1

```
Demande Réserveur
Masquer IT
Si Nb_Place > 0
alors
  Réserver une place
  Nb_Place = Nb_Place - 1
fsi
Démasquer IT
```



préemption
ordonnanceur

Processus 2

```
Demande Réserveur
Masquer IT
Si Nb_Place > 0
alors
  Réserver une place
  Nb_Place = Nb_Place - 1
fsi
Démasquer IT
```

Masquage des interruptions

Section critique : interdire la prise en compte des interruptions durant l'utilisation de la ressource critique.

Inconvénients majeurs :

- ▷ attente de tous les processus car le **processeur est monopolisé** ;
- ▷ exécution uniquement en **mode noyau**.

Il faut trouver une solution **bloquant seulement les processus concernés** : *solution algorithmique* ou *solution par le système d'exploitation*.

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

Algorithme 1 : Threads se donnant mutuellement le tour

- ▷ la variable partagée «turn» est initialisée à 0 ou à 1;
- ▷ la SC de T_i est exécutée seulement si $turn = i$
- ▷ T_i est occupé à attendre si T_j est dans SC.

```

1 Thread Ti:
2 repeat
3   while (turn != i) {};
4   SC ←
5   turn = j;
6   SR ←
7 forever
    
```

□ SC, «Section critique» : les instructions en exclusion mutuelle;

□ SR, «Section Restante» : des instructions sans accès concurrent.

Exécution de l'algorithme

```

1 Thread T0:
2 repeat
3   while (turn!=0) {};
4   SC
5   turn = 1;
6   SR
7 forever

1 Thread T1:
2 repeat
3   while (turn!=1) {};
4   SC
5   turn = 0;
6   SR
7 forever
    
```

On considère que :

- ▷ chaque tâche exécute le **même algorithme** de contrôle de concurrence : l'indice de la tâche permet de les différencier ;
- ▷ les parties SC et SR sont **spécifiques** à chaque tâche ;
- ▷ chaque tâche recommence **indéfiniment** son travail.

Exécution de l'algorithme

Modélisation de l'exécution : table des états d'exécution

L'état d'un processus est **entièrement déterminé** par la combinaison de son CO et de la valeur des variables.
Imaginons que l'ordonnanceur alterne entre T_0 et T_1 et que chaque ligne prend le même temps d'exécution :

CO	CPU	variable	explication
T0 T1	T0 T1	turn	
2	2	0	initialisation
3	2	0	T0 est exécuté par le CPU et teste la condition ⇒ il peut sortir du while
3	3	0	T1 est exécuté par le CPU et teste la condition ⇒ il reste dans le while
4	3	0	T0 exécute la section critique
4	3	0	T1 teste la condition ⇒ il reste dans le while
5	3	1	T0 change la variable turn à 1
5	3	1	T1 teste la condition ⇒ il peut sortir du while
6	3	1	T0 exécute sa section restante
6	4	1	T1 exécute la section critique
7	4	1	T0 recommence la boucle repeat et va repartir à la ligne 3
7	5	0	T1 change la variable turn à 0
3	6	0	T0 teste la condition ⇒ il peut sortir du while
3	6	0	T1 exécute sa section restante
4	6	0	T0 exécute la section critique
4	7	0	T1 recommence la boucle repeat et va repartir à la ligne 3
5	7	1	T0 change la variable turn à 1
5	3	1	T1 teste la condition ⇒ il peut sortir du while

↓ solution

état déjà connu

Lorsque l'on rencontre un **état déjà connu**, c-à-d une combinaison de (CO_{T0}, CO_{T0}, variable), on sait que l'on va recommencer la même séquence dans le tableau ⇒ le comportement du programme est entièrement détaillé.

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

Bilan de l'algorithme 1 : Généralisation à n threads : avant qu'une thread ne puisse rentrer dans sa section critique, il lui **faut attendre** que tous les autres aient eu cette chance !

Algorithme 2 : Threads exprimant leur souhait de rentrer en SC

```

1 Thread Ti:
2 repeat
3   flag[i] = vrai;
4   while (flag[j] == vrai) {};
5   SC
6   flag[i] = faux;
7   SR
8 forever
    
```

▷ une variable booléenne par thread : flag[0] et flag[1];

▷ T_i signale qu'elle désire exécuter sa SC par flag[i]=vrai

Exécution de l'algorithme

```

1 Thread T0
2 repeat
3   flag[0] = vrai;
4   while (flag[1] == vrai) {};
5   SC
6   flag[0] = faux;
7   SR
8 forever

1 Thread T1
2 repeat
3   flag[1] = vrai;
4   while (flag[0] == vrai) {};
5   SC
6   flag[1] = faux;
7   SR
8 forever
    
```

Après vous!

Après vous!

Analyse

- ▷ Que se passe-t-il si les deux threads exécutent l'une après l'autre ligne 3 ? ⇒ **blocage** !
Exemple : T_0 exécute 3, puis on passe à l'exécution de T_1 qui exécute aussi la ligne 3.

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

Algorithme de Dekker

```

int c1, c2, Turn = 1;

Thread T1
1 while (True)
2 { nc1: /* Section non critique*/
3   c1 = 0;
4   while (c2 == 0)
5     { c1 = 1;
6       while (Turn == 2) {};
7       c1 = 0;
8     }
9   crit1: /* Section critique */
10    Turn = 2;
11    c1 = 1;
12}

Thread T2
1 while (True)
2 { nc2: /* Section non critique*/
3   c2 = 0;
4   while (c1 == 0)
5     { c2 = 1;
6       while (Turn == 1) {};
7       c2 = 0;
8     }
9   crit2: /* Section critique */
10    Turn = 1;
11    c2 = 1;
12}
    
```

La symétrie est rompue grâce à la variable Turn.

Analyse

Le fonctionnement correct de l'algorithme de Dekker dépend du fait que chaque processus **finit toujours par progresser**.
⇒ **propriété d'équité**

L'**hypothèse d'équité** simple, suffisante pour raisonner au sujet de l'algorithme de Dekker, est la suivante :

⇒ **Tout processus qui a la possibilité d'exécuter une instruction finira toujours par le faire.**

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

Propriétés souhaitées pour un programme parallèle

Deux catégories :

□ Propriétés de **sûreté** :

- ▷ certains états d'exécution du système **indésirables** ne sont **jamais atteints**.
Elles ne dépendent pas d'une hypothèse d'équité.

□ Propriétés de **vivacité** :

- ▷ les états d'exécution du système **désirables** seront forcément **atteints**.
En général ces propriétés ne sont vraies qu'en présence d'une hypothèse d'équité.

L'état d'exécution d'un système est défini par l'ensemble des valeurs associées à chacune des threads du système :

- état de la pile et ensemble des valeurs des variables propre à chaque thread ;
- contenu du Compteur Ordinal exprimant l'endroit du code où chaque thread se trouve ;
- valeur des variables partagées.

Un **état désirable** d'exécution du système est un état où le système se comporte conformément aux attentes du programmeur.

Un **état indésirable** d'exécution du système est un état où :

- le système est **corrompu** : valeurs des variables perdues ou erronées ;
- système **bloqué** : le système ne plus atteindre d'état désirable.

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

L'algorithme de Peterson

Combine les deux idées : $flag[i]$ = intention d'entrée et $turn = j$ à qui le tour

Initialisation

- $flag[0] = flag[1] = \text{faux}$
- $turn = i \text{ ou } j$
- le désir d'exécuter SC est indiqué par $flag[i] = \text{vrai}$
- à la sortie de la SC : $flag[i] = \text{faux}$

```
1 repeat
2   flag[i] = vrai; /* Je veux entrer */
3   turn = j; /* je donne une chance à l'autre */
4   do while ((flag[j] == vrai) && (turn == j)) {};
5   SC
6   flag[i] = faux;
7   SR
8 forever
```

Thread T0

```
1 repeat
2   flag[0] = vrai;
3   turn = 1;
4   do while ((flag[1] == vrai)
5     && (turn == 1)) {};
6   SC
7   flag[0] = faux;
8   SR
9 forever
```

Thread T1

```
1 repeat
2   flag[1] = vrai;
3   turn = 0;
4   do while ((flag[0] == vrai)
5     && (turn == 0)) {};
6   SC
7   flag[1] = faux;
8   SR
9 forever
```

Exclusion mutuelle : solution algorithmique

L'instruction Test and Set

```
bool testset(int *i)
{
  if (i == 0)
  {
    i = 1;
    return true;
  }
  else
    return false;
}
```

Instruction(s) atomique(s)

Un algorithme utilisant `testset` pour l'exclusion mutuelle :

- ▷ variable partagée b initialisée à zéro ;
 - ▷ c'est le premier T_i qui met b à 1 qui entre en SC :
- Thread T_i :

```
while testset(b) == false{};
SC
b = 0;
SR
```

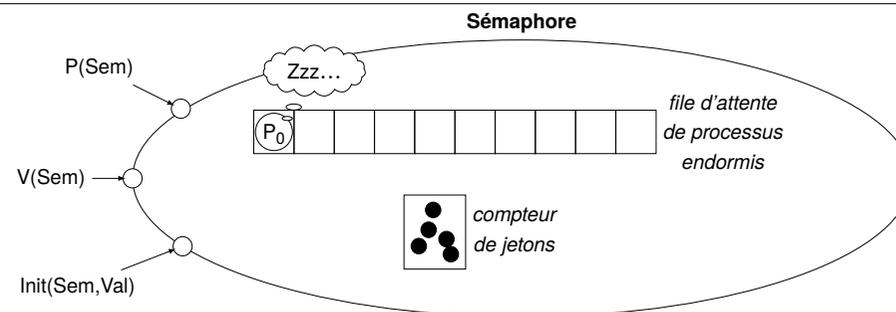
Le `testset` peut être intégré au processeur : une instruction du processeur réalise l'opération de test/modification ce qui en fait une opération réellement atomique.

Bilan des solutions algorithmiques

L'**inconvenient majeur** de ces solutions logicielles est l'**attente active**.

Une autre solution est d'utiliser un outil de synchronisation offert par le **système d'exploitation** :
⇒ les **sémaphores**.

8 Notion de Sémaphore



Un **sémaphore**, Sem , peut être vu comme un **distributeur de Jetons** manipulable au travers des opérations **atomiques** :

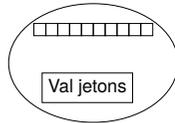
- **Init(Sem, Val)** : fixe le nombre de jetons initial ;
- **P(Sem)** : attribue un jeton au processus appelant s'il en reste, sinon **bloque** le processus et le met dans la file d'attente des processus endormis ;
- **V(Sem)** : restitue un jeton et **débloque** un processus de la file d'attente s'il y en a un et lui attribue le jeton.

Définition d'une Sémaphore : les opérations

Opération Ini(Sem,Val)

```

Init (Sem, Val)
début
  masquer_it
  Sem.compteur_jetons := Val jetons
  Sem.file_attente := vide
  démasquer_it
fin
    
```

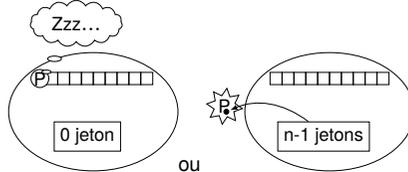


«masquer_it» et «démasquer_it» servent à empêcher l'interruption de l'opération par une interruption : rendre atomique l'opération «Init» (les interruptions sont suspendues pendant un très court instant).

Opération P(Sem)

```

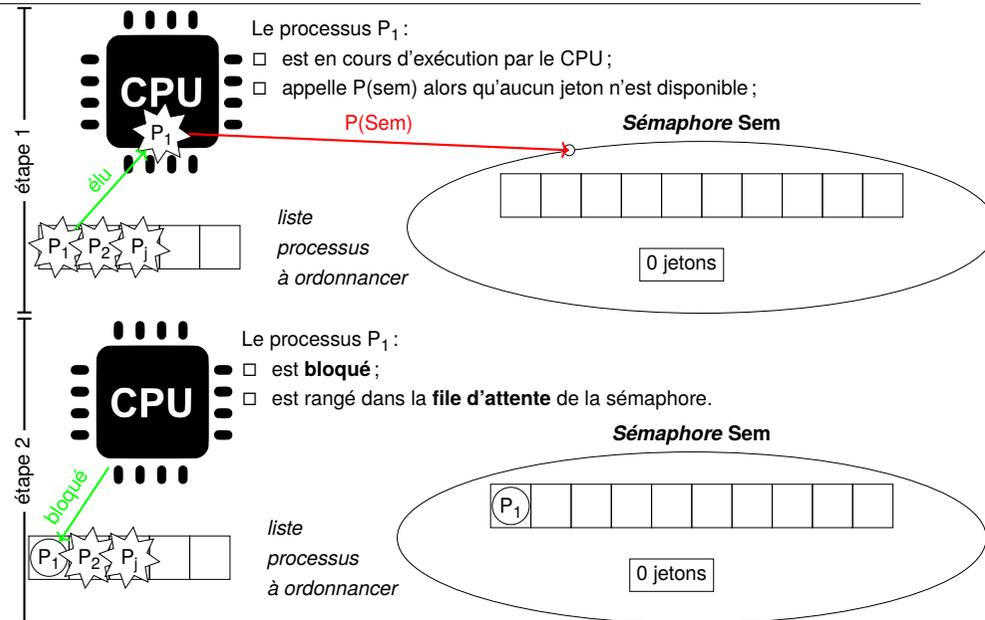
P (Sem)
début
  masquer_it
  Si il reste un jeton
  alors
    le donner à ce processus
  sinon
    ajouter ce processus à Sem.file_attente
    bloquer ce processus
  fsi
  démasquer_it
fin
    
```



Le processus qui ne peut obtenir de jeton est :

- ▷ **endormi** : il ne sera plus ordonnancé tant qu'un jeton ne devient pas libre : pas d'attente active ;
- ▷ il est **mis dans la file d'attente** : il sera traité suivant la priorité de son entrée dans la file d'attente, ce qui garantit l'équité.

Définition d'une sémaphore : explications pour P(Sem) bloquant

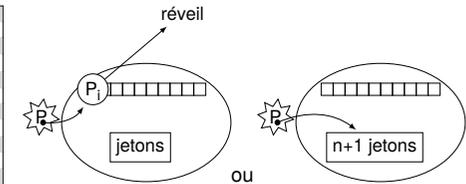


Définition d'une sémaphore : les opérations

Opération V(Sem)

```

V (Sem)
début
  masquer_it
  Ajouter un jeton à S.K
  Si il y a un processus P en attente
  alors
    sortir P de Sem.file_attente
    donner un jeton à P
    réveiller P
  fsi
  démasquer_it
fin
    
```



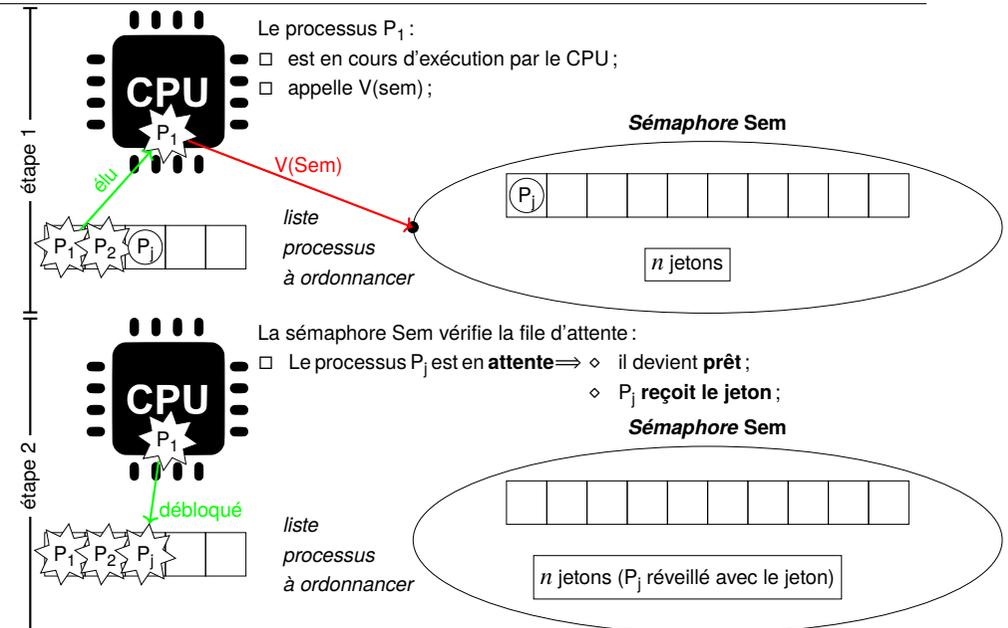
Lorsqu'un jeton est rendu alors qu'un processus était endormi en attente de celui-ci :

- ▷ ce processus obtient immédiatement le jeton ;
- ▷ il redevient «ordonnancable» ;

Passage de l'état «Bloqué» ⇒ «Prêt» par la sémaphore :

- le **plus efficace** :
 - ◇ le processus a été suspendu sans attente active ⇒ pas de «temps CPU» perdu ;
 - ◇ à son réveil le processus possède le jeton ;
- **équitable** : il utilise la file d'attente pour garantir cette équité : les processus sont sélectionnés dans leur ordre d'entrée dans la file d'attente.

Définition d'une sémaphore : explications pour V(Sem) débloquent



Utilisation des sémaphores : Section Critique

Un seul processus en section critique à la fois \Rightarrow un seul jeton

```
Sémaphore Mutex initialisée à 1
P (Mutex)      /* Entrée section_critique */

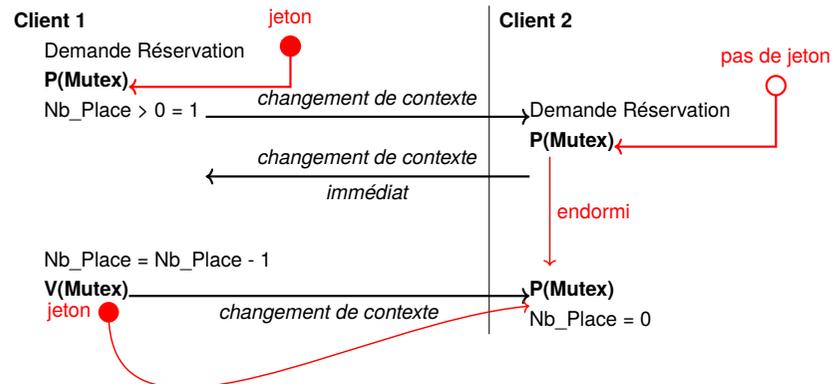
/* Section critique */

V (Mutex)      /* Sortie section_critique */
```

Section critique avec sémaphore

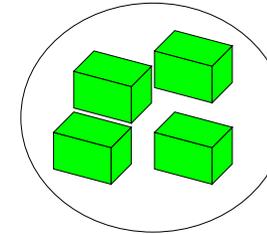
```
1 Réserve :
2 P (Mutex)
3 Si nb_place > 0
4 alors
5   Réserver une place
6   nb_place = nb_place - 1
7 fsi
8 V (Mutex)
```

Utilisation par deux clients s'exécutant en concurrence avec exclusion mutuelle



Allocation de ressources

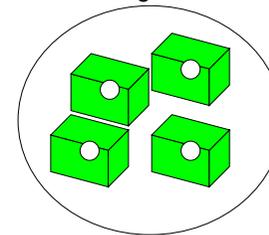
Accès à un ensemble de N ressources critiques



Un deuxième problème de **synchronisation** est celui de l'accès par un ensemble de processus à n ressources critiques :

\Rightarrow c'est une **généralisation** du cas précédent :

- N ressources exclusives de **même type**
- Allouer une ressource \Rightarrow prendre un jeton Res
- Libérer une ressource \Rightarrow rendre un jeton Res

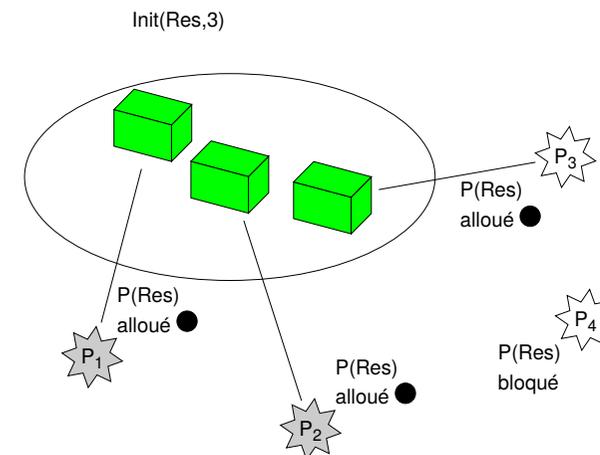


```
Sémaphore Res initialisée à N /* 1 jeton par ressource */
P (Res) /* Allocation */

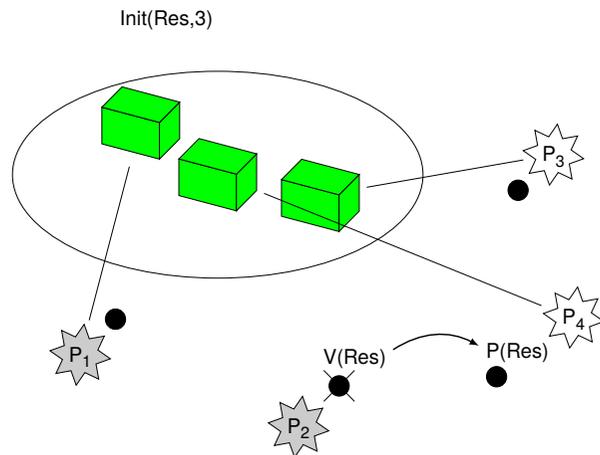
/* Utilisation Ressource */

V (Res) /* libération ressource */
```

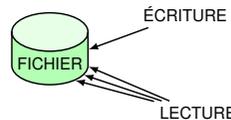
Utilisation des sémaphores : l'allocation de ressources



Utilisation des sémaphores : l'allocation de ressources



Problème des Lecteurs/Rédacteurs



- ▷ Le contenu du fichier doit rester **cohérent** : pas d'écritures simultanées ;
- ▷ Les lectures doivent être **cohérentes** : pas de lectures en même temps que les écritures.

Code du lecteur et rédacteur

- ▷ Lecteur :

```

Consulter_Fichier_annonce:
début
ouvrir(fichier_annonce, lecture);
pour chaque annonce du fichier faire
lire(annonce) ;
fin pour
fermer(fichier_annonce) ;
Fin
    
```

- ▷ Rédacteur :

```

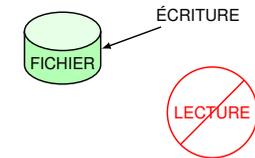
Modifier_Fichier_annonce (annonce, opération) avec opération=ajouter,modifier ou effacer
début
ouvrir(fichier_annonce, ecriture);
opération(annonce) ;
fermer(fichier_annonce) ;
fin
    
```

Problème du Lecteurs/Rédacteurs

Écriture seule – Lectures simultanées

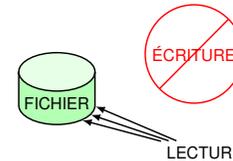
Un **écrivain** exclut :

- les écrivains : un seul écrivain à la fois ;
- les lecteurs : pas d'écriture et de lecture simultanées.



Un **lecteur** exclut :

- les écrivains.



Solution ? Un écrivain exclut les écrivains et les lecteurs :

- ▷ Un écrivain accède toujours seul ;
- ▷ Un écrivain effectue des accès en **exclusion mutuelle** des autres écrivains et des lecteurs.

⇒ **Sémaphore d'exclusion mutuelle** «Accès» initialisée à 1.

Les Lecteurs/Rédacteurs

Intégration de la sémaphore Accès

Travail de l'écrivain :

```

M'assurer que l'accès au fichier est libre
P(Accès)
entrer en écriture
Libérer l'accès au fichier
V(Accès)
    
```

d'où, le code de l'écrivain :

```

Modifier_Fichier_annonce (annonce, opération)
avec opération = ajouter, modifier ou effacer :
début
P(Accès)
ouvrir(fichier_annonce, ecriture);
opération(annonce);
fermer(fichier_annonce);
V(Accès)
fin
    
```

Et pour les lecteurs ?

Un lecteur exclut les écrivains :

- NL, nombre de lecteurs courants, initialisé à 0 ;

⇒ Un premier lecteur doit s'assurer qu'il n'y a **pas d'accès en écriture en cours** ;

⇒ Le dernier lecteur doit réveiller un éventuel Écrivain

```

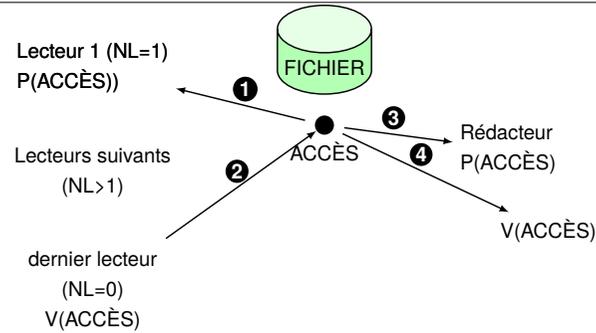
Compter un lecteur de plus
Si je suis le premier lecteur alors
Y-a-t-il un écrivain ?
si oui, attendre
Fsi
P(Mutex)
NL := NL + 1
Si (NL = 1) alors
P(Accès)
fsi
V(Mutex)
    
```

entrer en lecture

```

Compter un lecteur de moins
Si je suis le dernier, réveiller un écrivain
P(Mutex)
NL := NL - 1;
Si (NL = 0) alors
V(Accès)
fsi
V(Mutex)
    
```

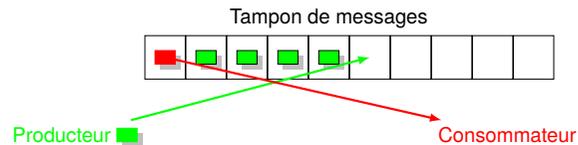
Les Lecteurs/Rédacteurs



- 1 le premier lecteur prends la sémaphore «Accès», ce qui interdit à l'écrivain de pouvoir la prendre ;
- de nouveaux lecteurs peuvent se présenter et consulter le contenu du fichier ;
- 2 le dernier lecteur libère la sémaphore «Accès», ce qui permet au rédacteur de la prendre ;
- 3 le rédacteur peut prendre la sémaphore ;
- 4 le rédacteur peut ensuite libérer la sémaphore.

Producteur/Consommateur

Gestion d'un tampon de messages en FIFO



- Le producteur ne doit **pas produire** si le tampon est **plein** ;
- Le consommateur de doit **pas faire de retrait** si le tampon est **vide** ;
- Producteur et Consommateur ne doivent **jamais travailler** dans une même case.

Producteur :

```
Si il n'y a pas de case libre alors
attendre
sinon
déposer le message
fsi
```

Consommateur :

```
Si il y a pas de case pleine alors
attendre
sinon
prendre le message
fsi
```

Solution ?

- ▷ Modéliser le «tampon» par une sémaphore de n jetons ;
- ▷ le «jeton» représente le «produit» ;
- ⇒ le consommateur est **bloqué** s'il n'y a pas de produit/jeton, ok...
- ⇒ le producteur n'est **jamais bloqué** !
- ⇒ On ne peut pas y arriver avec **une sémaphore** !

Producteur/Consommateur

Solution

- On associe un ensemble de jetons aux **cases vides** :
 - ◇ N jetons VIDE à l'initialisation ;
 - ◇ déposer le message = prendre un jeton VIDE
- On associe un ensemble de jetons aux **cases pleines** :
 - ◇ 0 jetons PLEIN à l'initialisation ;
 - ◇ prendre le message = prendre un jeton PLEIN.

```
Producteur
Si il n'y a pas de case libre alors } P(Sem Vide)
attendre
sinon
déposer le message
nouvelle case pleine ← V(Sem Plein)
fsi
```

```
Consommateur
Si il y a pas de case pleine alors } P(Sem Plein)
attendre
sinon
prendre le message
nouvelle case vide ← V(Sem Vide)
fsi
```

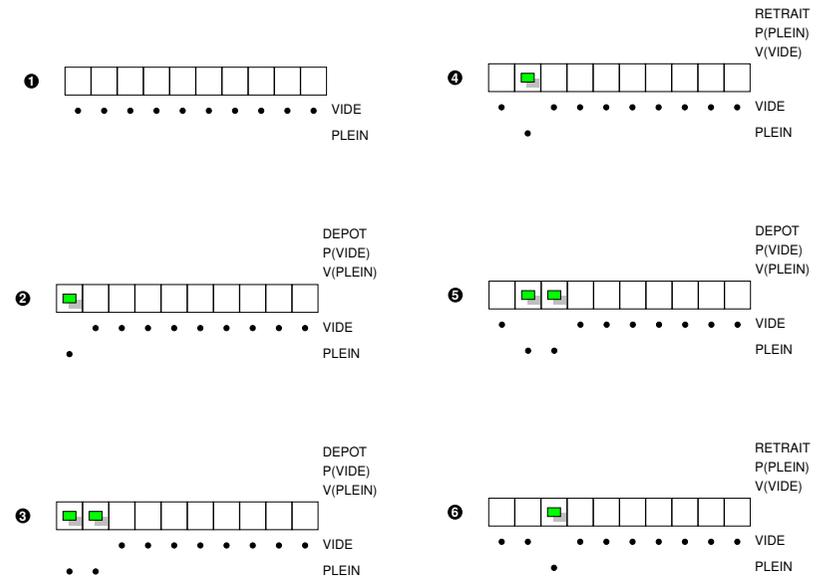
D'où le code final :

```
Sémaphore Vide initialisé à N : Init (Vide, N)
Sémaphore Plein initialisé à 0 : Init (Plein, 0)
```

```
Producteur :
P (Vide)
déposer le message
V (Plein)
```

```
Consommateur :
P (Plein)
retirer le message
V (Vide)
```

Producteur/Consommateur



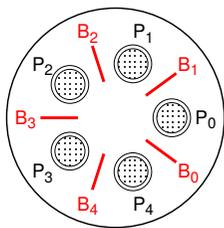
Le repas des philosophes

Hypothèses

- chaque assiette a une place fixe ;
- chaque baguette a une place fixe ;
- l'accès à chaque baguette est en **exclusion mutuelle** ;

Propriétés souhaitées

- pas d'interblocage ;
- pas de famine.



Première solution

- ▷ on associe une sémaphore :
 - ◊ à chaque baguette B_i ;
 - ◊ à chaque assiette/philosophe P_i ;
- ▷ chaque philosophe pense, puis mange et recommence.

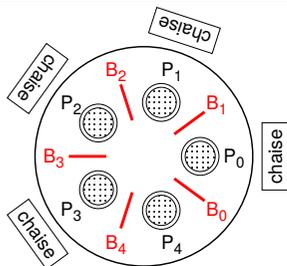
```
Sémaphore baguette[n] // chaque sémaphore doit être initialisée à 1
processus Philosophe(i) // i identifiant 0..n-1
tant que vrai faire
    penser()
    P(baguette[i]) // prendre la baguette i
    P(baguette[(i+1)%n]) // prendre la baguette de droite i+1
    manger()
    V(baguette[i]) // rendre la baguette i
    P(baguette[(i+1)%n]) // rendre la baguette de droite i + 1
```

⇒ **Interblocage possible !**

Le repas des philosophes

Seconde solution

```
Sémaphore baguette[n] // chaque sémaphore doit être initialisée à 1
Sémaphore chaise // initialisée à n-1
processus Philosophe(i) // i identifiant 0..n-1
tant que vrai faire
    penser()
    P(chaise)
    P(baguette[i]) // prendre la baguette i
    P(baguette[(i+1)%n]) // prendre la baguette de droite i+1
    manger()
    V(baguette[i]) // rendre la baguette i
    V(baguette[(i+1)%n]) // rendre la baguette de droite i + 1
    V(chaise)
```



La **solution** pour éviter l'interblocage :

- ▷ autoriser seulement $n - 1$ philosophes à manger ;
- ▷ ⇒ $n - 1$ chaises !

⇒ **pas de famine** si la file de chaise est gérée à l'ancienneté.

Conclusion sur les sémaphores

- Les exécutions de processus ne sont pas **indépendantes** : les processus peuvent vouloir
 - ◊ **communiquer** ;
 - ◊ accéder de manière **concurrente** à des ressources ;
- La **sémaphore S** est un **outil système** de synchronisation :
 - ◊ assimilable à un **distributeur de jeton bloquant** ;
 - ◊ manipulable par seulement **trois opérations atomiques** P(S), V(S) et Init(S) ;
- Il existe **plusieurs schémas typiques** de synchronisation à partir desquels sont élaborés des outils de communication entre processus :
 - ◊ **l'exclusion mutuelle** ;
 - ◊ **les lecteurs/rédacteurs** ;
 - ◊ **les producteur/consommateur** ;
 - ◊ **le repas des philosophes**.

Programmation des Sémaphores en C sous GNU/Linux

Pour utiliser les sémaphores, il faut :

- inclure le fichier de définition :

```
#include <semaphore.h>
```
- relier avec la bibliothèque `-lpthread`

```
$ gcc -o mon_programme mon_source.c -lpthread
```

Pour créer la sémaphore

```
sem_t semaphore;
sem_init(&semaphore, p, n);
```

- ◊ p : indique si la sémaphore doit être partagée entre différents processus ;
on mettra la valeur 0 pour indiquer qu'elle n'est pas partagée entre processus mais entre threads.
- ◊ n : indique la valeur initiale de la sémaphore.

Prendre et libérer la sémaphore

```
sem_wait(&semaphore);
```

```
sem_post(&semaphore);
```

Pour détruire la sémaphore

```
sem_destroy(&semaphore)
```

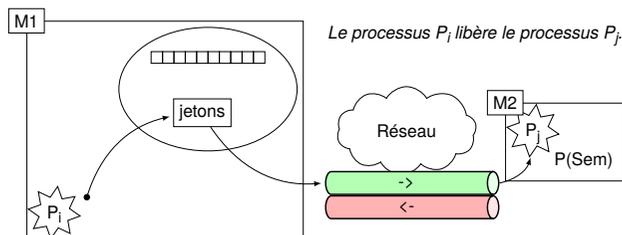
Sémaphore et utilisation dans des dispositifs réels

Une sémaphore peut être utilisée pour **synchroniser** différents processus :

- dans **la même machine** : l'exécution, le blocage et l'échange des jetons a lieu au sein du même système d'exploitation ;
- entre **différentes machines au travers d'un réseau de communication**.

Exemple entre deux machines M_1 et M_2 :

- ◇ un processus P_1 s'exécute sur la machine M_1 : il gère la sémaphore (comportement serveur) ;
 - ◇ un processus P_2 s'exécute sur la machine M_2 : il accède à la sémaphore de P_1 au travers du réseau par deux tubes qui le synchronisent avec la sémaphore, chacun utilisé pour un sens différent d'échange (comportement client) :
 - * il **lit** sur le tube :
- ▷ **sans blocage** si la sémaphore contient un jeton, ce jeton est décrémenté du compteur : il obtient un «jeton» ;
 - ▷ **avec blocage** si la sémaphore ne contient plus de jeton : il sera débloqué lorsqu'un processus rendra un jeton qu'il pourra ensuite lire sur le tube ;
- * il **écrit** sur le tube un jeton qui s'ajoute au compteur, ce qui peut ou non débloquer un processus en attente de jeton.

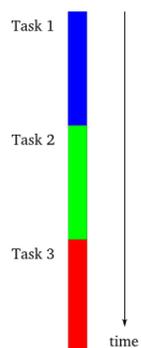


On peut généraliser ce fonctionnement à plusieurs machines clientes utilisant la même sémaphore.

9 Présentation de la programmation «asynchrone»

Qu'est-ce que la programmation asynchrone ?

Le contraire de la programmation synchrone !



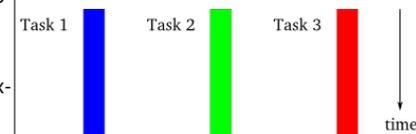
Imaginons que nous voulions exécuter un programme décomposable en 3 tâches

« $Task\{1,2,3\}$ » :

- ◇ la version «*single threaded*» indiquée à gauche est la version la plus simple : chaque tâche est exécutée une à la fois, l'une s'achevant **complètement** avant que l'autre ne commence :
 - ◇ les tâches s'exécutent dans un **ordre prédéfini** ;
 - ◇ la dernière tâche peut ainsi être **sûre** que :
 - * les tâches précédentes se sont exécutées **sans erreur** ;
 - * que tous les **résultats** de ces tâches précédentes sont **disponibles**.

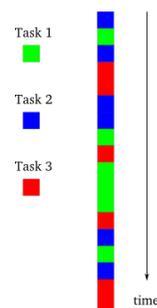
La programmation asynchrone vs programmation «multi-thread»

- ◇ la version «*multi-threaded*» permet à chaque tâche de s'exécuter dans une *thread* de contrôle différente :



- ◇ les threads sont **ordonnées** par le système d'exploitation ;
- ◇ les threads peuvent s'exécuter de manière **concurrente** :
 - * **réellement** si l'ordinateur dispose de différents processeurs ou cœurs ;
 - * de manière **entrelacée** si l'ordinateur ne dispose que d'un processeur ;
- ◇ le programmeur pense en terme de **flots d'instructions** s'exécutant simultanément ;
- ◇ la coordination et la communication entre ces différentes threads est **complexe** et **difficile**.

La programmation asynchrone : la gestion direct de l'entrelacement



- ◇ la version «asynchrone» :

- ◇ les tâches s'exécutent de manière **entrelacées** au sein de la même «*thread*» de contrôle ;
- ◇ le modèle de programmation est **plus simple** que celui «*multi-threaded*» car le programmeur sait «qu'une seule tâche s'exécute à la fois» :

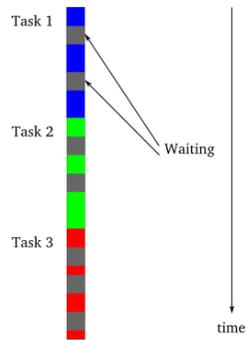
lorsqu'une tâche est exécutée, aucune autre ne s'exécute

- ◇ **bien que** dans un environnement avec un seul processeur, la version «*multi-thread*» s'exécute aussi de manière entrelacée, le programmeur **doit toujours penser en terme de threads** pouvant s'exécuter simultanément ;

- ◇ la version «asynchrone» s'exécute **toujours** de manière entrelacée même dans un environnement multi-processeurs ;
- ◇ dans la version «*multi-thread*», **c'est le système d'exploitation** qui décide de l'ordonnement des différentes threads et le programmeur doit en tenir compte : chaque thread peut être suspendue à n'importe quel moment pour laisser la place à l'exécution d'une autre thread.
- ◇ dans le modèle «asynchrone», une tâche s'exécute jusqu'à ce qu'elle **décide de libérer** le contrôle à une autre tâche.

La programmation asynchrone : mieux utiliser le processeur

Quel est l'intérêt de la programmation «asynchrone» ? *les performances !*



- le modèle «asynchrone» est **plus simple** que le modèle «multi-thread» : un seul fil de contrôle et le passage du contrôle d'une tâche à une autre est **explicite** ;
- le modèle «asynchrone» impose au programmeur de «penser» chaque tâche comme une succession d'étapes plus petites s'exécutant de manière **intermittente** :
 - ◊ si une tâche utilise la sortie d'une autre tâche, la tâche dépendant de cette sortie doit être écrite de manière à obtenir ses entrées par **morceaux** au lieu d'une réception en totalité ;
- le modèle «asynchrone» **n'exploite pas de parallélisme** : le temps d'exécution de l'application est le même que dans le modèle synchrone...
- **Mais** lorsqu'une tâche est forcée d'attendre ou est bloquée en attente d'une ressource externe (accès réseau, accès disque, etc), c'est **l'ensemble** de l'application qui est **retardé** : le temps d'exécution du modèle «asynchrone» peut être très **nettement inférieur** à celui synchrone (voir schéma du modèle asynchrone) !

La programmation asynchrone : les avantages

- lorsqu'une tâche est **bloquée dans le modèle synchrone**, il est possible d'exécuter une tâche qui est **capable de progresser** :
 - ◊ le passage d'une tâche à une autre correspond :
 - * soit à la terminaison de la tâche courante,
 - * soit à l'arrivée à un point où la tâche va se bloquer ;
 - ◊ avec un nombre important de tâches pouvant potentiellement se bloquer, le modèle «asynchrone» peut **obtenir de bien meilleures performances** que le modèle «synchrone».

Le modèle «asynchrone» est meilleur dans le cas où :

- ▷ il y a de **nombreuses tâches** à réaliser, de telle manière à ce qu'il y est toujours une tâche capable de progresser dans son exécution ;
- ▷ les tâches réalisent **beaucoup d'entrées/sorties**, qui mèneraient un programme synchrone à gaspiller beaucoup de temps bloqué alors qu'une tâche serait capable de s'exécuter ;
- ▷ les tâches sont **indépendantes** les unes des autres, ce qui fait qu'il y a peu de communication nécessaire entre elles.

La programmation asynchrone : les avantages

Dans le cas de nombreuses entrées/sorties

Les performances sont très différentes en fonction des périphériques :

device	périphérique	cycles d'horloge
L1-cache	cache de niveau 1 sur le processeur	3 cycles
L2-cache	cache de niveau 2 sur le processeur	14 cycles
RAM	mémoire vive	250 cycles
Disk	disque dur	41 000 000 cycles
Network	réseau	240 000 000 cycles

L'utilisation d'une **seule thread** permet de travailler en gaspillant le moins possible de cycles d'horloge : moins de défaut de cache, pas de changement de contexte.

Les entrées/sorties mémoire, disque et réseau étant très lentes, on peut effectuer beaucoup de travail pendant qu'elles se déroulent, ce qui justifie l'utilisation d'E/S **asynchrones**.

La programmation asynchrone : intérêt ?

Dans quel domaine d'application le modèle asynchrone peut-il s'appliquer ? *le réseau !*

Une application serveur (comme un serveur Web) peut tirer parti de ce modèle :

- les bibliothèques «Twisted» et «Tornado» pour Python ;
- le serveur applicatif basé sur Javascript «Node.js».

Pourquoi le modèle «multi-threaded» n'est-il pas une bonne réponse ?

- lorsqu'une thread se bloque sur une entrée/sortie, une autre thread peut s'exécuter : pareil que dans le modèle asynchrone ;
- **mais** avec chaque thread, il y a un **surcoût** :
 - ◊ de **mémoire** : une **pile d'exécution** associée à chaque thread plus les structures diverses de gestion et de protection des threads ;
 - ◊ de **temps** : pour passer d'une thread à une autre : **changement de contexte** (sauvegarde de registres, manipulation mémoires etc.) et restauration du contexte de la nouvelle thread.

Ce surcoût peut **alourdir considérablement** le travail de gestion d'un serveur.

La programmation asynchrone : le «producteur/consommateur»

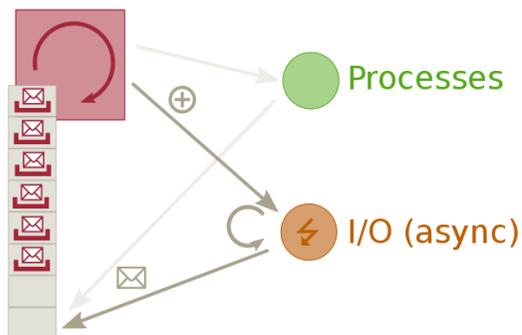
```
1 var produit = 0;
2
3 function appel_producteur() {
4   producteur.next();
5 }
6
7 function* p() {
8   var compteur = 0;
9   while(true)
10  {
11    compteur++;
12    produit = compteur;
13    console.log("Production " + produit);
14    setTimeout(appel_consommateur, 0);
15    yield null;
16  }
17 }
```

```
1 function appel_consommateur() {
2   consommateur.next();
3 }
4
5 function* c() {
6   while(true)
7   {
8     console.log("Consommation "+produit);
9     setTimeout(appel_producteur, 0);
10    yield null;
11  }
12 }
13
14 var producteur = p();
15 var consommateur = c();
16
17 producteur.next();
```

- ▷ l'instruction «yield» permet de retourner une valeur et de conserver l'état de la fonction. L'appel à la méthode «next () » permet de retourner à l'instruction suivant le «yield».
- ▷ l'instruction «setTimeout (fonction, 0) » permet d'ajouter une fonction à exécuter dans la boucle d'événement de NodeJS. Cet événement ne sera déclenché que lors de la terminaison de la fonction courante : *on prépare l'avenir de l'application.*

La programmation asynchrone : la «boucle d'événements»

Event Loop



L'«event loop» correspond à une file d'événements qui peuvent déclencher l'exécution de «processes» qui sont suspendus en attente de leur arrivée.

Les E/S asynchrones :

- se déroulent pendant qu'un «process» s'exécute ;
- produisent des événements lorsqu'elles se terminent qui pourront ensuite déclencher l'exécution de «process».

L'«Event Loop» représente le «fil de contrôle» de l'application asynchrone.

- ▷ un «process», fonction ou méthode, ou une E/S asynchrone qui se termine ⇒ retour à l'«Event Loop» ;
- ▷ un événement ajouté lors la terminaison de l'E/S ou lors d'une soumission d'un «process» ne peut être pris en compte qu'à la fin du «process» courant (lors du retour à l'«Event Loop») ;
- ▷ un «process», qui s'exécute peut **ajouter un événement**, lié à un délai ou à une E/S, en indiquant la fonction à exécuter lors de son déclenchement (*callback*).
Le plus simple des événements correspond à celui d'un temps d'attente, qui s'apparente à de l'ordonnancement («setTimeout» avec la valeur zéro).

Programmation asynchrone : le diner des philosophes

```
1 var liste_philosophes = [];
2 var liste_philosophes_a_traiter = null;
3 var philosophe_a_reveiller = null;
4
5 var compteur_chaises = 4;
6
7 function reveil_philosophe ()
8 {
9   philosophe_a_reveiller.next();
10 }
11
12 function* philosophe (n)
13 {
14   while (true)
15   {
16     if (compteur_chaises > 0)
17     {
18       compteur_chaises --;
19       console.log("Philosophe : "+n+" prend une chaise");
20       yield null;
21       console.log("Philosophe : " + n + " mange");
22       yield null;
23       console.log("Philosophe : " + n + " se leve");
24       compteur_chaises ++;
25     }
26     else
27     {
28       console.log("Philosophe : " + n + " reflechit");
29     }
30     yield null;
31   }
32 }
```

C'est l'ordonnanceur qui garantit l'équité de traitement entre les philosophes. C'est le programmeur qui est responsable de l'entrelacement.

Il n'y a pas de problème d'accès concurrent aux variables partagées.

- lignes 7-10 : la fonction de réveil d'un philosophe qui sera attachée à un événement de l'«Event Loop» ;
- lignes 12-32 : le travail du philosophe décomposé en étapes :
 - ◊ chaque étape se termine sur un «yield» pour permettre de :
 - * retourner à l'«Event Loop» ;
 - * traiter des événements présents : activer l'ordonnanceur ;
 - ◊ cette décomposition permet d'entrelacer le travail des différents philosophes.

Programmation asynchrone : le diner des philosophes

```
33 for(i=0; i<5; i++)
34   liste_philosophes.push(philosophe(i));
35
36 liste_philosophes_a_traiter = liste_philosophes.slice(0);
37
38 function scheduler()
39 {
40   var numero_philosophe = Math.floor(Math.random() * liste_philosophes_a_traiter.length);
41   philosophe_a_reveiller = liste_philosophes_a_traiter[numero_philosophe];
42   liste_philosophes_a_traiter.splice(numero_philosophe, 1);
43   if (liste_philosophes_a_traiter.length == 0)
44   {
45     liste_philosophes_a_traiter = liste_philosophes.slice(0);
46   }
47   setTimeout(reveil_philosophe, 0);
48   setTimeout(scheduler, 0);
49 }
50
51 scheduler();
```

- ligne 33 :
 - ◊ on lance 5 fonctions philosophes en état suspendu (utilisation de la déclaration «function*»);
 - ◊ on ajoute chacune de ces fonctions suspendues dans une liste ;
- ligne 36 : on duplique la liste des philosophes ;
- ligne 38 : la fonction «scheduler» permet de :
 - ◊ ligne 40 : de choisir un philosophe de manière aléatoire dans la liste des philosophes à traiter ;
 - ◊ ligne 41 : on positionne le philosophe à réveiller sur celui que l'on vient de sélectionner ⇒ un événement le réveillera dans la fonction «reveil_philosophe» ;
 - ◊ ligne 42 : on enlève le philosophe choisi de la liste qui sera réinitialisée en ligne 43-46 quand elle est vide ;
- lignes 47-48 : l'ordonnancement : ré-activation du philosophe et rappel de l'ordonnanceur.