Université Joseph Fourier, Grenoble
Licence d'Informatique L3

Introduction aux Systèmes et Réseaux

TD n°2 : Réalisation des processus – Signaux

L'objectif de ce TD [1] est d'introduire une vue élémentaire des aspects de "bas niveau" des processus, pour faire notamment le lien avec l'enseignement d'ALM.
Les principaux points développés sont les suivants :

- mise en œuvre des processus sur un processeur, ordonnancement.
- relations entre interruptions (vues en ALM) et processus.
- communication entre processus au moyen de signaux.
- utilisation élémentaire des signaux.

Les notions sur les signaux seront appliquées dans le TP n°2.

1 Allocation du processeur

1.1 Rappel sur l'allocation de ressources

Rappelons qu'un processus représente l'exécution d'un programme. Pour faire exécuter un ensemble de processus sur un ordinateur, il faut partager la mémoire et le processeur entre ces processus. Pour cela, on utilise la notion de *ressource virtuelle* : une ressource virtuelle est une image d'une ressource réelle. Pour permettre l'exécution effective d'un processus, le système d'exploitation matérialise les ressources virtuelles par les ressources physiques correspondantes (on dit qu'il alloue les ressources physiques).

Dans un premier temps, nous considérons deux ressources : la mémoire et le processeur. On examinera plus tard les communications entre processus, les fichiers et les entrées-sorties.

- Chaque processus dispose d'une *mémoire virtuelle* dont la taille est égale à la capacité d'adressage du processeur, soit 2^{32} octets pour une taille d'adresse de 32 bits. C'est au système d'exploitation d'allouer au processus la mémoire physique correspondante, à mesure de ses besoins. Nous n'examinons pas ici les détails de la gestion de la mémoire virtuelle.
- Le processeur est alloué tour à tour aux processus. Pour respecter l'équité entre processus, chacun d'eux reçoit le processeur pendant une tranche de temps fixée appelée *quantum*, dont la durée est de l'ordre de 10 à 50 millisecondes. Néanmoins, lorsqu'un processus doit attendre (par exemple, attente de la réponse à une demande de lecture de fichier sur disque), il ne peut pas utiliser le processeur. Il doit alors le céder à un autre processus.

1. Plusieurs des figures et exemples sont empruntés à R. E. Bryant, D. O'Hallaron. *Computer Systems: a Programmer's Perspective*, Prentice Hall, 2003.

1.2 Détails sur l'allocation de processeur

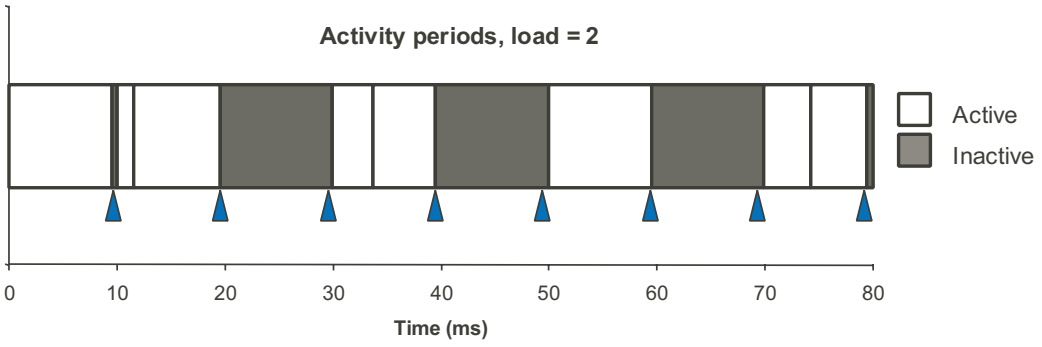
C'est le système d'exploitation qui réalise l'allocation du processeur. Lorsque le processeur passe d'un processus au suivant (à la fin d'un quantum), le système doit sauvegarder l'état du processus interrompu (en particulier le contenu des registres) et recharger l'état du nouveau processus. Ces opérations sont exécutées en mode superviseur, alors que les processus des usagers du système sont exécutés en mode utilisateur.

Il est possible de visualiser cette allocation du processeur en examinant le temps passé. En effet, le système permet de mesurer le temps d'exécution d'un processus, le temps réel écoulé, et le temps consommé par le système pour ses tâches de gestion.

À titre d'exemple, on considère le tableau ci-après, qui note le temps d'activité d'un processus particulier pendant une certaine période de temps. Les périodes d'activité (pour le processus considéré) sont notées A (par ex. A48, etc.) et les périodes d'inactivité sont notées I (par ex. I48, etc.). On note aussi la date de début et la durée de chaque période, en cycles d'horloge et en millisecondes.

```
A48  Time   191514104   (349,4  ms)   Duration   5224961  ( 9,532449  ms)
I48  Time   196739065   (358,93 ms)   Duration   247557   ( 0,451644  ms)
A49  Time   196986622   (359,38 ms)   Duration   858571   ( 1,566382  ms)
I49  Time   197845193   (360,95 ms)   Duration   8297     ( 0,015137  ms)
A50  Time   197853490   (360,97 ms)   Duration   4357437  ( 7,949733  ms)
I50  Time   202210927   (368,91 ms)   Duration   5718758  (10,433335  ms)
A51  Time   207929685   (379,35 ms)   Duration   2047118  ( 3,734774  ms)
I51  Time   209976803   (383,08 ms)   Duration   7153     ( 0,01305   ms)
A52  Time   209983956   (383,1  ms)   Duration   3170650  ( 5,784552  ms)
I52  Time   213154606   (388,88 ms)   Duration   5726129  (10,446783  ms)
A53  Time   218880735   (399,33 ms)   Duration   5217543  ( 9,518916  ms)
I53  Time   224098278   (408,85 ms)   Duration   5718135  (10,432199  ms)
A54  Time   229816413   (419,28 ms)   Duration   2359281  ( 4,304286  ms)
I54  Time   232175694   (423,58 ms)   Duration   7096     ( 0,012946  ms)
A55  Time   232182790   (423,6  ms)   Duration   2859227  ( 5,21639   ms)
I55  Time   235042017   (428,81 ms)   Duration   5718793  (10,433399  ms)
```

La figure ci-après est une autre représentation de cette trace :



Les triangles représentent les interruptions d'horloge (*timer*) qui provoquent le passage d'un processus à un autre. On notera que ce passage (réallocation du processeur) prend lui-même un certain temps. On notera aussi qu'il y a d'autres interruptions de très courte durée.

Question 1.1

a) Sur la trace ci-avant, indiquer si le processus observé était actif ou inactif au moment de chacune des interruptions.
b) Déterminer la période et la fréquence des interruptions d'horloge (*timer*), qui délimitent chaque quantum de temps.
c) Déterminer la période et la fréquence d'horloge du processeur.
d) Quelle est la durée du traitement des interruptions de l'horloge (appel à l'ordonnanceur) ?
e) Expliquer pourquoi les plus longues périodes d'inactivité ont une durée supérieure à celle des plus longues périodes d'activité.

Question 1.2

On considère un ordinateur partagé par 100 utilisateurs, tous occupés à une tâche d'édition de textes. L'éditeur utilisé provoque une interruption lors de la frappe de chaque caractère. Le traitement de cette interruption consomme environ 100 000 cycles d'horloge. Les utilisateurs frappent en moyenne 100 mots par minute et un mot comporte en moyenne 6 caractères. La fréquence d'horloge de l'ordinateur est 1 GHz.

Estimer la fraction du temps total consommée par le traitement des interruptions. Le résultat obtenu vous paraît-il raisonnable ? (noter qu'il s'agit d'une limite supérieure largement surestimée, puisqu'on suppose que tous les utilisateurs frappent de manière continue à la cadence maximale).

2 Signaux

Un signal est un message asynchrone destiné à un processus pour l'informer d'une situation particulière. Un processus qui reçoit un signal réagit en exécutant une action spécifiée, qui dépend de la nature du signal.

Un signal est analogue à une interruption ; mais alors qu'une interruption est destinée à un processeur physique, un signal est destiné à un processus. Certains signaux traduisent d'ailleurs directement l'occurence d'une interruption matérielle.

Un signal peut être envoyé par le système d'exploitation (par exemple pour indiquer une erreur), ou bien par un processus. Lorsqu'il reçoit un signal, un processus exécute une séquence de code (un *traitant*, ou *handler* en anglais) qui a auparavant été spécifiée pour le signal en question. Les signaux les plus courants sont `SIGINT` (frappe du caractère *control-C*), `SIGSTOP` (signal de suspension d'un processus), `SIGCONT` (continuation d'un processus suspendu), `SIGKILL` (signal de terminaison), `SIGCHLD` (fin ou suspension d'un processus fils signalée à son père). Voir `man 7 signal` pour une liste complète des signaux sous Unix.

Un signal est *en attente/pendant* (*pending* en anglais) tant qu'il n'a pas été pris en compte par le processus destinataire. Il ne peut exister qu'un signal pendant d'un type donné par processus destinataire. Donc il est possible que des signaux soient perdus, par exemple si plusieurs signaux d'un certain type arrivent pendant le traitement d'un signal de ce même type.

La primitive[2] : `int kill(pid_t pid, int sig)` permet d'envoyer un signal `sig` à différents processus (si `pid` > 0, au processus `pid`, si `pid` $= 0$, aux processus du même groupe que l'appelant, si `pid` < -1 aux processus du groupe $|$`pid`$|$).

Tout signal a une action par défaut sur le processus destinataire (par exemple tuer le processus pour `SIGKILL`, suspendre le processus pour `SIGSTOP`, ne rien faire pour `SIGCHLD`, etc.). Il est néanmoins possible de spécifier un comportement particulier lors de la réception d'un signal. Cela peut se faire grâce à une primitive appelée `signal`, mais son emploi est déconseillé (car non compatible avec la norme POSIX[3]). La primitive spécifiée par POSIX (`sigaction`) est néanmoins d'un maniement compliqué. C'est pourquoi on utilisera une primitive appelée `Signal`, fournie dans `csapp.c`, qui est une enveloppe (*wrapper*) de `sigaction` et offre une interface plus simple.

```
#include <signal.h>
typedef void handler_t(int);
handler_t *Signal(int signum, handler_t *handler);
```

`Signal` associe la fonction `handler` au signal `signum`. Notons que la fonction `handler` a une forme bien spécifiée : elle prend un entier en paramètre et ne renvoie rien.

Tous les comportements par défaut associés aux signaux peuvent ainsi être changés, sauf ceux des signaux `SIGKILL` et `SIGSTOP`. Par exemple, on peut spécifier un programme qui traite la frappe du caractère *control-C* (signal `SIGINT`) :

```
#include "csapp.h"

void handler(int sig) /* SIGINT handler */
{
    printf("Caught SIGINT\n");
    exit(0);
}

int main()
{
    /* Install the SIGINT handler */
    Signal(SIGINT, handler);
    pause(); /* wait for the receipt of a signal */
    exit(0);
}
```

Question 2.1

La primitive `unsigned int sleep(unsigned int t)` suspend le processus appelant pendant `t` secondes ou jusqu'à l'arrivée d'un signal. Dans ce dernier cas, elle renvoie le nombre de secondes qui restaient à attendre.

2. Cette primitive est nommée `kill` pour des raisons historiques, mais son effet n'est pas nécessairement de tuer le processus destinataire.

3. POSIX est une norme développée sous l'impulsion de l'IEEE, visant à uniformiser l'interface de différents systèmes d'exploitation. Il est recommandé de suivre cette norme, pour améliorer la portabilité des programmes.

Écrire un programme qui suspend le processus pendant un nombre de secondes passé en paramètre, et imprime le nombre de secondes effectivement passées à attendre, le programme pouvant être interrompu par *control-C*.

Question 2.2

La primitive `unsigned int alarm(unsigned int t)` provoque l'envoi d'un signal `SIGALRM` au processus appelant au bout de `t` secondes. Contrairement à `sleep`, `alarm` ne bloque pas le processus appelant.

Écrire un programme qui ne fait rien (exécute une boucle vide) mais qui reçoit un signal `SIGALRM` toutes les secondes, et affiche alors un message "bip". À la réception du sixième signal, le programme affiche "bye" et se termine.

Question 2.3

On considère le programme suivant :

```
#include "csapp.h"
int counter = 0;
void handler(int sig)
{
    counter++;
    sleep(1);
    return;
}

int main()
{
    int i;
    Signal(SIGUSR2, handler);

    if (Fork() == 0) {  /* child */
        for (i = 0; i < 5; i++) {
            Kill(getppid(), SIGUSR2);
            printf("sent SIGUSR2 to parent\n");
        }
        exit(0);
    }

    Wait(NULL);
    printf("counter=%d\n", counter);
    exit(0);
}
```

Que fait ce programme ?
Quelle est la valeur imprimée pour la variable `counter` ? Y-a-t-il un problème potentiel ?

Question 2.4

Lorsqu'un processus crée des processus fils, il peut attendre leur fin avec la primitive `wait` ou `waitpid`. Néanmoins, il ne peut pas faire de travail utile pendant cette attente. C'est pourquoi on souhaite que le processus père traite la fin de ses fils uniquement au moment où cette fin est signalée par le signal `SIGCHLD`.

Écrire le programme d'un processus créant plusieurs fils et traitant leur fin comme il vient d'être indiqué.

Attention : tenir compte du fait que les signaux ne sont pas mémorisés (un seul signal d'un type donné peut être dans l'état pendant, cf. question précédente).

Question 2.5

Cette question est facultative et pourra être reportée à plus tard, mais elle sera utile pour des exercices ultérieurs.

Un processus peut bloquer la réception des signaux d'un certain type. Un signal bloqué parvient au processus destinataire, mais ne provoque aucun effet jusqu'à ce qu'il soit débloqué (c'est l'équivalent du masquage des interruptions matérielles).

Pour le masquage, il faut manipuler un tableau de bits qui représente le masque (un bit par signal, 1=bloqué, 0=non bloqué). Le type opaque `sigset_t` représente un tel tableau de bits pour l'ensemble des signaux. L'interface pour la manipulation de ce tableau est donnée ci-après (l'effet est indiqué en commentaire).

```
int sigemptyset(sigset_t *p_ens)            // *p_ens = ensemble vide
int sigfillset(sigset_t *p_ens)             // *p_ens = {1, ..., NSIG-1}
int sigaddset(sigset_t *p_ens, int sig)     // *p_ens = *p_ens U {sig}
int sigdelset(sigset_t *p_ens, int sig)     // *p_ens = *p_ens - {sig}
int sigismember(sigset_t *p_ens, int sig)   // sig appartient à *p_ens?
```

Le masquage proprement dit est réalisé par la primitive :
`int sigprocmask(int op, const sigset_t *p_ens, sigset_t *p_ensAncien);`
qui modifie le masque du processus en fonction de la valeur de `op`.

- `op=SIG_SETMASK` : nouveau masque = `*p_ens`
- `op=SIG_BLOCK` : nouveau masque = masque courant U `*p_ens`
- `op=SIG_UNBLOCK` : nouveau masque = masque courant - `*p_ens`

Si `*p_ensAncien` est différent de `NULL`, alors l'ancienne valeur du masque est stockée dans cette variable.

La primitive `int sigpending(sigset_t *p_ens)` écrit dans `*p_ens` la liste des signaux pendants qui sont bloqués.

Écrire un programme qui place un masque sur 2 signaux (`SIGINT` et `SIGUSR1`), s'envoie ces signaux, imprime la liste des signaux pendants masqués, puis débloque les signaux masqués.