Programmation des systèmes

Synchronisation d'activités concurrentes

Philippe MARQUET
Philippe.Marquet@lifl.fr
Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille
Université des sciences et technologies de Lille

Licence d'informatique de Lille
mars 2005

- La dernière version de ce cours est accessible à
  www.lifl.fr/~marquet/cnl/pds/
- $Id: sync.tex,v 1.9 2012/11/27 23:17:54 marquet Exp $

Références & remerciements

- *Systèmes d'exploitation*, 2e ed.
  Andrew Tanenbaum
  Prentice Hall, 2001, trad. française Pearson Education France, 2003
- *Principes des Systèmes d'Exploitation des Ordinateurs*
  Sacha Krakowiak
  Dunod Informatique, 1987

Activités concurrentes

- Multiprogrammation : plusieurs activités *simultanées*
- Activité d'exécution
  - processus (*process*), tâche (*task*), processus léger (*thread*), etc
- Activités sous le contrôle d'un ordonnanceur
  - virtualise le processeur
  - chaque activité détient le processeur tour à tour
  - ordonnanceur décide du tour à tour
- Raisonner sur des activités concurrentes
  - aucune d'hypothèse sur l'ordre relatif des exécutions
  - raisonnement vrai quelque soit l'ordonnancement
- Raisonner sur des activités concurrentes
  - prise en compte de l'exécution interne des activités
  - prise en compte des dépendances entre les activités : synchronisation

Nécessité de contrôle de la concurrence

- Toute action ne peut être faite concurremment
  - `counter++;`

```
LOAD @"COUNTER" Ri
INCR Ri
STOR Ri @"COUNTER"
```

  - deux activités, un processeur

```
counter++;                          counter++;

LOAD @"COUNTER" R1
                                    LOAD @"COUNTER" R2
                                    INCR R2
                                    STOR R2 @"COUNTER"
INCR R1
STOR R1 @"COUNTER"
```

    on a perdu une incrémentation !
- Il faut contrôler la concurrence : mécanismes ad hoc
  - (...à suivre)

Nécessité de contrôle de la concurrence *(cont'd)*

- Exécutions possibles de nos incrémentations
  -

```
LOAD @"COUNTER" R1
INCR R1
STOR R1 @"COUNTER"
                                    LOAD @"COUNTER" R2
                                    INCR R2
                                    STOR R2 @"COUNTER"
```

    ou

```
                                    LOAD @"COUNTER" R2
                                    INCR R2
                                    STOR R2 @"COUNTER"
LOAD @"COUNTER" R1
INCR R1
STOR R1 @"COUNTER"
```

- Garantir le résultat
  - assurer que l'ensemble des opérations

```
LOAD @"COUNTER" Ri
INCR Ri
STOR Ri @"COUNTER"
```

    est exécuté de manière indivisible

Section critique

- Section critique
  - section de code exécutée de manière indivisible
  - exécution *atomique*
  - exécutée en exclusion mutuelle
- Règle de la section critique
  - à tout instant, une activité, au plus, peut être dans la section critique
- Primitives d'identification de sections critiques
  - `enter_region` et `leave_region`
  - utilisation *systématique*

```
enter_region
    LOAD @"COUNTER" Ri
    INCR Ri
    STOR Ri @"COUNTER"
leave_region
```

  - garantissent l'exclusion mutuelle
  - doivent être exécutée de manière atomique !
  - plusieurs régions : `enter_region(r)` et `leave_region(r)`

Réalisation des sections critiques

- Attente active
  - l'activité boucle sur un test en entrée de section critique
  - inefficace !
    - monopolise le processeur
    - qu'une autre activité qui est en section critique ne peut utiliser...
  - parfois utilisée
    - dans le noyau
    - pour de très courtes sections critiques
    - sur des systèmes multiprocesseurs
    - évite le changement de contexte
    - *spin-lock*

Réalisation des sections critiques (cont'd)

- Fourniture par le système de primitives d'entrée et de sortie de section critique
  - primitives elles-mêmes atomiques !
  - exemples : verrous, sémaphores...
  - implantation système repose sur des mécanismes matériels ad hoc
- Réalisation bas niveau de sections critiques
  - désactivation des interruptions

```
enter_region:
    cli
```

```
leave_region:
    sti
```

  - instruction *test and set*
    - réalisation atomique de

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

    - utilisation

```
init_region(b):
    b = 0;
enter_region(b):
    while(!testset(b))
        yield();
leave_region:
    b = 0;
```


Mécanismes classiques de synchronisation

- Mécanismes fournis par les systèmes d'exploitation
  - relativement haut niveau !
- Verrou
  - réalisation de l'exclusion mutuelle
  - aussi nommé *mutex*
- Condition
  - gestion d'une file d'attente d'un état
  - exemple d'état : tampon non vide...
- Sémaphore
  - gestion de jetons (compteur)
  - associé à une file d'attente
  - exemple : accès multiples (mais bornés) à une ressource
- Moniteur
  - ensemble de procédures d'accès à des ressources partagées
  - regroupe les conditions (files d'attentes) et les ressources protégées

Synchronisation par verrous

- Entité protégée par un verrou
  - une section critique, ou
  - une donnée : exemple tous les accès à un tableau
- Notion de propriétaire d'un verrou
  - seul le propriétaire a accès à l'entité protégée par le verrou
- Primitives pour l'utilisation de verrous
  - création / initialisation / destruction
  - verrouillage `mutex_lock()`
    - devenir propriétaire
    - bloquant
  - déverrouillage `mutex_unlock()`
    - verrou devient libre

Synchronisation par conditions

- Condition est associée à un état
  - file d'attente d'activités
  - attendre que l'état soit réalisé : bloquer sur la condition
  - changer la valeur de l'état : débloquer une activité de la file d'attente
- Primitives pour l'utilisation de conditions
  - création / initialisation / destruction
  - attendre `cond_sleep()`
    - se bloquer sur la condition
  - signaler `cond_wakeup()`
    - débloquer une activité en attente sur la condition
- Pas de mémorisation des opérations « signaler »
  - en l'absence d'activité bloquée un `cond_wakeup()` est sans effet
  - les sémaphores pallient cet inconvénient

Synchronisation par sémaphores

- Sémaphores = structure de données
  - un compteur : « nombre de jetons libres »
  - une file d'activités en attente d'un jeton
- Primitives pour l'utilisation de sémaphores
  - (*Speekt U nederlands?*)
  - création / initialisation : nombre initial de jetons / destruction
  - attendre `semaphore_down()`
    - classiquement noté P (puis-je ?)
    - attribue un jeton à l'activité demandeuse s'il en reste un
    - la bloque sinon
  - poster `semaphore_up()`
    - classiquement noté V (vas-y !)
    - rend un jeton
    - débloque une activité s'il en existe une

Synchronisation par sémaphores *(cont'd)*

- Compteur associé au sémaphore
  - nombre de « jetons »
  - valeur positive = nombre d'activités pouvant acquérir librement la ressource
  - valeur négative = nombre d'activités bloquées en attente de la ressource
- Deux utilisations typiques des sémaphores
  - protection d'une ressource partagée
  - séquencement d'activités

Synchronisation par sémaphores *(cont'd)*

- Protection d'une ressource partagée par sémaphore
  - ressource partagée ?
    - une variable, une structure, une imprimante...
  - sémaphore initialisé au nombre d'activités pouvant concurremment accéder à la ressource

    `semaphore_init(s, <n>)`
  - chaque accès à la ressource est encadré d'un couple

```
semaphore_down(s);
    <accès à la ressource>
semaphore_up(s);
```

- Exemple de l'exclusion mutuelle
  - une seule activité en section critique
  - donc un seul jeton

```
struct mutex {
    semaphore_t mutex_sem;
};

mutex_init(struct mutex) {
    init_semaphore(mutex.mutex_sem, 1);
}
```

```
mutex_lock(struct mutex) {
    semaphore_down(mtex.mutex_sem);
}

mutex_unlock(struct mutex) {
    semaphore_up(mtex.mutex_sem);
}
```


Synchronisation par sémaphores *(cont'd)*

- Séquencement d'activités par sémaphore
  - une activité doit en attendre une autre pour continuer ou commencer son exécution
  - on associe un sémaphore à l'événement
  - par exemple `findupremier`
  - initialisé à 0 ; l'événement n'a pas eu lieu

```
activité 1:
    <action 1>
    semaphore_up(findupremier);
```

```
activité 2:
    semaphore_down(findupremier);
    <action 2>
```

Problème du producteur consommateur

- Deux activités
  - un producteur et un consommateur
  - relié par un tampon de taille bornée
  - (deux types d'activités : plusieurs producteurs / plusieurs consommateurs)
  - producteur ne peut pas produire si le tampon est plein
  - consommateur ne peut pas consommer si le tampon est vide
  - producteur et consommateur ne doivent pas travailler sur le même élément
- Problème classique
  - mécanismes systèmes basés sur le producteur/consommateur
    - tubes POSIX, *pipe* et *fifo*
    - queues de messages POSIX

Producteur consommateur à base de conditions

- Deux conditions
  - une condition pour le producteur
  - une condition pour le consommateur

```
#define N 100           /* nombre de places dans le tampon */
int count;              /* nombre d'objets dans le tampon */
cond_t c_cons, c_prod;  /* les conditions */
```

```
void producteur (void)
{
  objet_t objet;

  while (1) {
    produire_objet(&objet);
    /* tampon plein ? on attend */
    if (count==N)
        cond_sleep(c_prod);
    mettre_objet(objet);
    count++;
    /* le tampon était vide ? */
    if (count==1)
        cond_wakeup(c_cons);
  }
}
```

```
void consommateur (void)
{
  objet_t objet ;

  while (1) {
    /* tampon vide ? on attend */
    if (count==0)
        cond_sleep(c_cons);
    retirer_objet (&objet);
    count--;
    /* le tampon était plein ? */
    if (count==N-1)
        cond_wakeup(c_prod);
    utiliser_objet(objet);
  }
}
```


Producteur consommateur à base de conditions *(cont'd)*

- Première erreur
  - pas de protection de l'accès à `count`
  - ajout d'un verrou

```
void producteur (void)
{
  objet_t objet;

  while (1) {
    produire_objet(&objet);
    mutex_lock();
    if (count==N)
        cond_sleep(c_prod);
    mettre_objet(objet);
    count++;
    if (count==1)
        cond_wakeup(c_cons);
    mutex_unlock();
  }
}
```

```
void consommateur (void)
{
  objet_t objet ;

  while (1) {
    mutex_lock();
    if (count==0)
        cond_sleep(c_cons);
    retirer_objet (&objet);
    count--;
    if (count==N-1){
        cond_wakeup(c_prod);
    mutex_unlock();
    utiliser_objet(objet);
  }
}
```


Producteur consommateur à base de conditions *(cont'd)*

- Seconde erreur
  - ne pas garder le verrou alors que l'on est bloqué !

```
void producteur (void)
{
  objet_t objet;

  while (1) {
    produire_objet(&objet);
    mutex_lock();
    if (count==N) {
        mutex_unlock();
        cond_sleep(c_prod);
        mutex_lock();
    }
    mettre_objet(objet);
    count++;
    if (count==1)
        cond_wakeup(c_cons);
    mutex_unlock();
  }
}
```

```
void consommateur (void)
{
  objet_t objet ;

  while (1) {
    mutex_lock();
    if (count==0) {
        mutex_unlock();
        cond_sleep(c_cons);
        mutex_lock();
    }
    retirer_objet (&objet);
    count--;
    if (count==N-1)
        cond_wakeup(c_prod);
    mutex_unlock();
    utiliser_objet(objet);
  }
}
```

Producteur consommateur à base de conditions *(cont'd)*

- Troisième erreur
  - condition de concurrence pouvant mener à une erreur
  - *race condition* en anglais !
- Scénario menant à l'erreur
  - le tampon est vide
  - le consommateur lit le compteur `count` et constate qu'il est nul
  - *à cet instant précis* le producteur insère un objet dans le tampon
  - il incrémente le compteur, constate qu'il est à 1
  - il appel alors `cond_wakeup()` pour réveiller un éventuel consommateur...
  - mais le consommateur n'était pas en sommeil
  - le signal de réveil a été perdu
  - quand le consommateur va reprendre son exécution, il va se bloquer sur `cond_sleep()`
- Solution ?
  - les sémaphores...

Producteur consommateur à base de sémaphores

- Avantage sur les conditions
  - modification du compteur et blocage en une opération *atomique*
- Plusieurs sémaphores
  - un sémaphore d'exclusion mutuelle d'accès au tampon
    - initialisé à 1 : l'accès est libre
  - un sémaphore d'accès en écriture au tampon
    - initialisé à `N` : le nombre d'emplacements libres
  - un sémaphore d'accès en lecture au tampon
    - initialisé à `0` : le nombre d'emplacements occupés

```
#define N 100                           /* nombre de places dans le tampon */

semaphore_t mutex, vide, plein;

semaphore_init(&mutex, 1);              /* contrôle d'accès au tampon */
semaphore_init(&vide, N);               /* nb de places libres */
semaphore_init(&plein, 0);              /* nb de places occupées */
```


Producteur consommateur à base de sémaphores *(cont'd)*

```
void producteur (void)
{
  objet_t objet ;

  while (1) {
    produire_objet(&objet);             /* produire l'objet suivant */
    semaphore_down(&vide);              /* dec. nb places libres */
    semaphore_down(&mutex);             /* entrée en section critique */
    mettre_objet(objet);                /* mettre l'objet dans le tampon */
    semaphore_up(&mutex);               /* sortie de section critique */
    semaphore_up(&plein);               /* inc. nb place occupées */
  }
}

void consommateur (void)
{
  objet_t objet ;

  while (1) {
    semaphore_down(&plein);             /* dec. nb emplacements occupés */
    semaphore_down(&mutex);             /* entrée section critique */
    retirer_objet (&objet);             /* retire un objet du tampon */
    semaphore_up(&mutex);               /* sortie de la section critique */
    semaphore_up(&vide);                /* inc. nb emplacements libres */
    utiliser_objet(objet);              /* utiliser l'objet */
  }
}
```


Problème des lecteurs et rédacteurs

- Gestion des accès partagés à un fichier
  - par des lecteurs, et
  - par des rédacteurs
  - un autre problème classique !

```
void lecteur(void)
{
    while(1) {
        demande_de_lecture();
        lecture();
        fin_de_lecture();
    }
}
```

```
void redacteur(void)
{
    while(1) {
        demande_d_ecriture();
        ecriture();
        fin_d_ecriture();
    }
}
```

- Règles d'accès assurant la cohérence du fichier
  - accès simultanés par plusieurs lecteurs possibles
  - accès exclusif au fichier pour les rédacteurs
    - un seul rédacteur à la fois
    - aucun lecteur pendant ce temps

Lecteurs rédacteurs à base de conditions

- Mémoriser l'état de l'accès
  - nombre de lecteurs dans le fichier
    - initialisé à 0
  - y a-t-il un rédacteur dans le fichier
    - booléen initialisé à faux
- Files d'attente
  - une seule file d'attente ?
  - une file d'attente des lecteurs bloqués
  - une file d'attente des rédacteurs bloqués

```
int nb_lecteurs = 0;
bool redacteur = false;
cond_t c_lecture, c_ecriture;
```


Lecteurs rédacteurs à base de conditions *(cont'd)*

- Première proposition

```
void demande_de_lecture(void)
{
    if (redacteur)
        cond_sleep(c_lecture);
    nb_lecteurs++;
    cond_wakeup(c_lecture);
}

void fin_de_lecture(void)
{
    nb_lecteurs--;
    if (nb_lecteurs==0)
        cond_wakeup(c_ecriture);
}
```

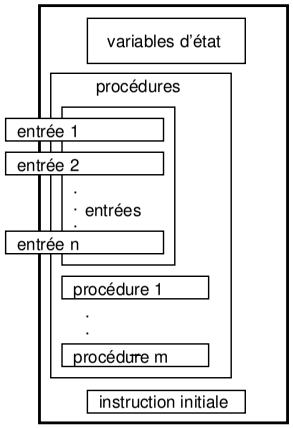
```
void demande_d_ecriture(void)
{
    if (nb_lecteurs!=0 || redacteur)
        cond_sleep(c_ecriture);
    redacteur = true;
}

void fin_d_ecriture(void)
{
    redacteur = false;
    if (!cond_empty(c_lecture))
        cond_wakeup(c_lecture);
    else
        cond_wakeup(c_ecriture);
}
```

  - un rédacteur quittant réveille un 1er lecteur qui va réveiller un 2nd lecteur...
  - on a implanté une priorité aux lecteurs !
  - priorité aux rédacteurs ? pas de priorité ?
- Suspension d'une activité au milieu d'une des 4 fonctions ?
  - peut mener à une *race condition*
  - solution : les moniteurs de Hoare

Moniteurs de Hoare

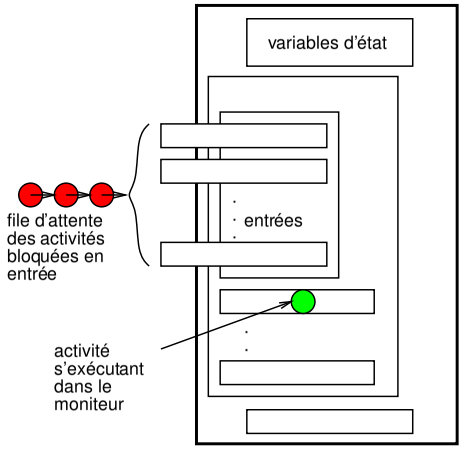
- Structure de programmation
  - un module de programme
  - contrôle les accès à des données partagées
- Variables d'état
  - partagées entre les procédures du module
  - encapsulées dans le module
- Procédures
  - locales
  - *entrées* : seules visibles depuis l'extérieur



- *Synchronisation* entre les activités concurrentes qui appellent les entrées

Mécanisme d'exécution du moniteur

- Exclusion mutuelle entre les entrées du moniteur
  - à un instant donné : une seule activité dans le moniteur
  - donc protection des variables d'état
- Si une seconde activité cherche à entrer dans le moniteur
  - bloquée jusqu'à libération du moniteur par l'activité précédente
  - *file d'attente* des activités bloquées en entrée du moniteur

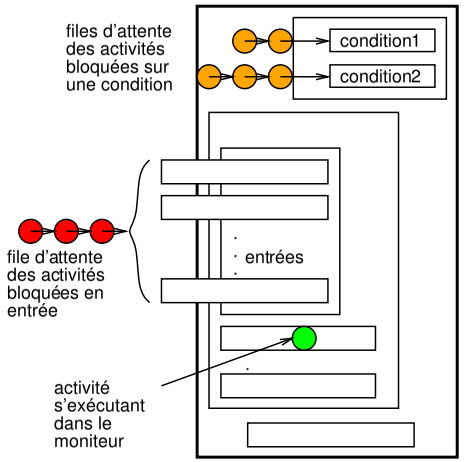


Synchronisation dans le moniteur

- L'activité s'exécutant dans le moniteur
  - peut s'apercevoir qu'elle ne peut pas continuer et vouloir s'endormir
  - peut aussi s'apercevoir qu'une activité en attente doit/peut reprendre son exécution
- Une variable de type *condition*
  - variable d'état du moniteur
    - donc accessible uniquement de l'intérieur du moniteur
  - réalise une *synchronisation*
  - manipulée par deux opérations :
    - attendre, `cond_sleep()`
    - réveiller, `cond_wakeup()`

Synchronisation dans le moniteur *(cont'd)*

- Pour une condition
  - `cond_sleep()` bloque l'activité qui exécute `cond_sleep()` et la place en queue de file d'attente
  - `cond_wakeup()` retire une activité en tête de la file d'attente (si $\neq \emptyset$) et l'active
- Les conditions sont implantées comme des files d'attente d'activités bloquées



Moniteur de Hoare pour les lecteurs rédacteurs

- Un moniteur
  - entrées
  - variables d'états
- Entrées
  - `demande_de_lecture()` `fin_de_lecture()`
  - `demande_d_ecriture()` `fin_d_ecriture()`
- Variables d'état
  - variable simples
    - `nb_lecteurs`
    - `redacteur`
  - conditions
    - `c_lecture`
    - `c_ecriture`

Moniteur de Hoare pour les lecteurs rédacteurs *(cont'd)*

- Par construction du moniteur
  - exclusion mutuelle des accès aux variables d'état
  - non préemptibilité des activités au sein du moniteur

```
void demande_de_lecture(void)
{
    if (redacteur)
        cond_sleep(c_lecture);
    nb_lecteurs++;
    cond_wakeup(c_lecture);
}

void fin_de_lecture(void)
{
    nb_lecteurs--;
    if (nb_lecteurs==0)
        cond_wakeup(c_ecriture);
}
```

```
void demande_d_ecriture(void)
{
    if (nb_lecteurs!=0 || redacteur)
        cond_sleep(c_ecriture);
    redacteur = true;
}

void fin_d_ecriture(void)
{
    redacteur = false;
    if (!cond_empty(c_lecture))
        cond_wakeup(c_lecture);
    else
        cond_wakeup(c_ecriture);
}
```

Critique des moniteurs de Hoare

- Problème du signaleur
  - suite à un `cond_wakeup()` deux activités sont potentiellement actives
  - le « signaleur » et le « signalé »
  - garantir l'exclusion mutuelle des accès au moniteur ?
  - proposition de multiples solutions
    - Hoare : suspension des signalés bloqués
    - Brinch Hansen : obliger `cond_wakeup()` à être terminal
- Moniteur = structure de programmation
  - prise en charge nécessaire dans le langage
  - ne peut être fournit sous forme d'une bibliothèque
- Utilisation des moniteurs
  - support à l'élaboration de raisonnements
  - mise au point des algorithmes
  - puis implantation à l'aide de verrous, conditions, sémaphores...