

Cinquième chapitre

Synchronisation entre processus

- Introduction : notions de base
 - Condition de compétition et exclusion mutuelle
 - Exclusion mutuelle par verrouillage de fichiers
 - Notion d'interblocage
 - Exclusion mutuelle par attente active
 - Problèmes de synchronisation (résumé)
- Sémaphores et schémas de synchronisation
 - Sémaphores
 - Exclusion mutuelle
 - Cohorte
 - Rendez-vous
 - Producteurs / Consommateurs
 - Lecteurs / Rédacteurs
- Autres outils de synchronisation
 - Moniteurs
 - Synchronisations POSIX
 - compare-and-swap
- Conclusion

Problème de l'exclusion mutuelle

Exemple : deux banques modifient un compte en même temps

Agence Nancy

1. courant = get_account(1867A)
2. nouveau = courant + 10
3. update_account (1867A, nouveau)

Agence Karlsruhe

1. aktuelles = get_account(1867A)
2. neue = aktuelles - 10
3. update_account(1867A, neue)

- ▶ variables partagées + exécutions parallèles entremêlées \Rightarrow différents résultats :
- ▶ (0 ; ? ; ?) N1(0 ; 0 ; ?) N2(0 ; 10 ; ?) N3(10 ; 10 ; ?)
K1(10 ; 10 ; 10)K2(10 ; 10 ; 0) K3(0 ; 10 ; 0) \rightarrow compte inchangé
- ▶ (0 ; ? ; ?)N1 (0 ; 0 ; ?) K1 (0 ; 0 ; 0) N2(0 ; 10 ; 0)
K2(0 ; 10 ; -10) N3(10 ; 10 ; -10) K3(-10 ; 10 ; -10) \rightarrow compte $-= 10$
- ▶ (0 ; ? ; ?)K1 (0 ; ? ; 0) N1 (0 ; 0 ; 0) K2(0 ; 0 ; -10)
N2(0 ; 10 ; -10) K3(-10 ; 10 ; -10)N3(10 ; 10 ; -10) \rightarrow compte $+= 10$

C'est une **condition de compétition** (*race condition*)

- ▶ Solution : opérations **atomiques** ; pas d'exécutions entremêlées
- ▶ Cette opération est une **section critique** à exécuter en **exclusion mutuelle**

(145/217)

Réalisation d'une section critique

Schéma général

Processus 1

```
...
entrée en section critique
section critique
sortie de section critique
...
```

Processus 2

```
...
entrée en section critique
section critique
sortie de section critique
...
```

- ▶ Exclusion mutuelle garantie par les opérations (entrée en section critique) et (sortie de section critique)

Réalisation

- ▶ Attente active : processus à l'entrée section critique boucle un test d'entrée
 - ▶ Inefficace (sur mono-processeur)
 - ▶ Parfois utilisé dans conditions particulière dans le noyau
- ▶ Primitives spéciales : fournies par le système
 - ▶ Primitives générales : sémaphores, mutex (on y revient)
 - ▶ Mécanismes spécifiques : comme verrouillage de fichiers (idem)
 - ▶ Les primitives doivent être atomiques...

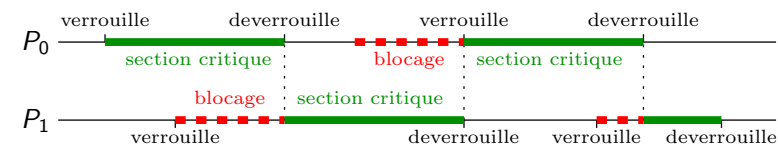
(146/217)

Exclusion mutuelle par verrouillage de fichiers

- ▶ Verrouiller une ressource garanti un accès exclusif à la ressource
- ▶ Unix permet de verrouiller les fichiers
- ▶ Appels systèmes de verrouillage/déverrouillage (*noms symboliques*) :
 - ▶ **verrouille**(fich) : verrouille fich avec accès exclusif
 - ▶ **déverrouille**(fich) : déverrouille fich
- ▶ Propriétés :
 - ▶ Opérations atomiques (assuré par l'OS)
 - ▶ Verrouillage par au plus un processus
 - ▶ Tentative de verrouillage d'un fichier verrouillé \Rightarrow blocage du processus
 - ▶ Déverrouillage \Rightarrow réveille d'un processus en attente du verrou (et un seul)

```
...
verrouille(fich);
accès à fich (section critique);
déverrouille(fich);
...
```

```
...
verrouille(fich);
accès à fich (section critique);
déverrouille(fich);
...
```



(147/217)

Verrouillage partagé

- ▶ Sémantique sur les fichiers : écritures exclusives, lectures concurrentes
- ▶ Nouvelle opération : **ver-part** (verrouillage partagé)

Déjà réalisé	Nouveau verrouille possible?	Nouveau ver-part possible?
verrouille(f)	non	non
ver-part(f)	non	oui

- ▶ Tentative de verrouillage d'un fichier verrouillé ⇒ blocage du processus
- ▶ Déverrouillage ⇒ réveille d'un processus en attente du verrou (et un seul)

(148/217)

Verrouillage de fichier sous Unix

Opérations disponibles

- ▶ Deux types de verrous : exclusifs ou partagés
- ▶ Deux modes de verrouillage :
 - ▶ Impératif (*mandatory*) : **bloque les accès** incompatibles avec verrous présents (mode décrit précédemment – pas POSIX)
 - ▶ Consultatif (*advisory*) : ne **bloque que la pose** de verrous incompatibles
 - ▶ Tous les verrous d'un fichier sont de même mode
- ▶ Deux primitives :
 - ▶ `fcntl` : générale et complexe
 - ▶ `lockf` : enveloppe plus simple, mais mode exclusif seulement (pas partagé)
- ▶ Possibilité de verrouiller fichier entier ou une partie

(149/217)

Interface du verrouillage de fichier sous Unix

```
#include <unistd.h>
int lockf(int fd, int commande, off_t taille);
```

- ▶ `fd` : descripteur du fichier à verrouiller
- ▶ `commande` : mode de verrouillage
 - ▶ `F_ULOCK` : déverrouiller
 - ▶ `F_LOCK` : verrouillage exclusif
 - ▶ `F_TLOCK` : verrouillage exclusif avec test (ne bloque jamais, retourne une erreur)
 - ▶ `F_TEST` : test seulement
- ▶ `taille` : spécifie la partie à verrouiller
 - ▶ `= 0` : fichier complet
 - ▶ `> 0` : taille octets après position courante
 - ▶ `< 0` : taille octets avant position courante
- ▶ Verrouillage consultatif et exclusif seulement
Utiliser `fcntl` pour verrouillage impératif et/ou partagé
- ▶ Retour : 0 si succès, -1 sinon (cf. `errno`)

(150/217)

Exemple de verrouillage de fichiers Unix

testlock.c

```
#include <unistd.h>
int main (void) {
    int fd;
    fd = open("toto", O_RDWR); /* doit exister */
    while (1) {
        if (lockf(fd, F_TLOCK, 0) == 0) {
            printf("%d: verrouille le fichier\n",
                getpid());
            sleep(5);
            if (lockf(fd, F_ULOCK, 0) == 0)
                printf("%d: déverrouille le fichier\n",
                    getpid());
            return;
        } else {
            printf("%d: déjà verrouillé...\n",
                getpid());
            sleep (2);
        }
    }
}
```

```
$ testlock & testlock &
15545: verrouille le fichier
[4] 15545
15546: déjà verrouillé...
[5] 15546
$ 15546: déjà verrouillé...
15546: déjà verrouillé...
15545: déverrouille le fichier
15546: verrouille le fichier
15546: déverrouille le fichier
$
```

Exercice : que se passe-t-il si on remplace `F_TLOCK` par `F_LOCK` ?

15546 bloque jusqu'à ce que 15545 déverrouille le fichier
(et n'affiche rien entre temps)

(151/217)

L'exemple des banques revisité

Rappel du problème

Agence Nancy

```
1. courant = get_account(1867A)
2. nouveau = courant + 10
3. update_account (1867A, nouveau)
```

Agence Karlsruhe

```
1. actuelles = get_account(1867A)
2. neue = actuelles - 10
3. update_account(1867A, neue)
```

Implémentation avec le verrouillage de fichier UNIX

Agence Nancy

```
int fd = open("fichier partagé", O_RDWR);
lockf(fd, T_LOCK, 0);
1. courant = get_account(1867A)
2. nouveau = courant + 10
3. update_account (1867A, nouveau)
lockf(fd, T_UNLOCK, 0);
```

Agence Karlsruhe

```
int fd = open("fichier partagé", O_RDWR);
lockf(fd, T_LOCK, 0);
1. actuelles = get_account(1867A)
2. neue = actuelles - 10
3. update_account(1867A, neue)
lockf(fd, T_UNLOCK, 0);
```

Remarques

- ▶ Fichier partagé entre deux banques difficile à réaliser
- ▶ Autres solutions techniques pour les systèmes distribués ; l'idée reste la même

(152/217)

Notion d'interblocage

Utilisation simultanée de plusieurs verrous ⇒ problème potentiel

Situation

- ▶ Deux processus verrouillent deux fichiers

Processus 1

```
...
verrouille (f1) /* 1A */
accès à f1
...
verrouille (f2) /* 1B */
accès à f1 et f2
deverrouille (f2)
deverrouille (f1)
```

Processus 2

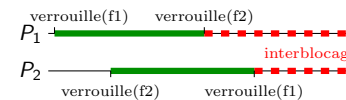
```
...
verrouille (f2) /* 2A */
accès à f2
...
verrouille (f1) /* 2B */
accès à f1 et f2
deverrouille (f2)
deverrouille (f1)
```

Déroulement

Exécution (pseudo-)parallèle

- ▶ Première possibilité : 1a; 1b; 2a; 2b
- ▶ Seconde possibilité : 2a; 2b; 1a; 1b
- ▶ Troisième possibilité : 1a; 2a; 1b; 2b

Exécution de 1a;2a;1b;2b



- ▶ P1 et P2 sont bloqués *ad vitam eternam* :
 - ▶ P1 attend le deverrouille(f2) de P2
 - ▶ P2 attend le deverrouille(f1) de P1
- ▶ C'est un **interblocage** (deadlock)

(153/217)

Situation d'interblocage

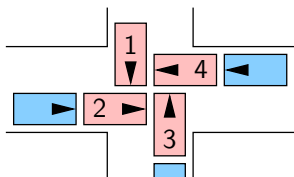
Définition

- ▶ Plusieurs processus bloqués dans l'attente d'une action de l'un des autres
- ▶ Impossible de sortir d'un interblocage sans intervention extérieure

Conditions d'apparitions

- ▶ Plusieurs processus en compétition pour les mêmes ressources
- ▶ Cycle dans la chaîne des attentes

Exemple : carrefour un vendredi à 18h



Exercice : quelles sont les ressources ?

Exercice : comment sortir de l'interblocage ?

(154/217)

Situation réelle d'interblocage



(155/217)

Comment prévenir l'interblocage ?

Solution 1 : réservation globale

- ▶ Demandes en bloc de toutes les ressources nécessaires
- ▶ Inconvénient : réduit les possibilités de parallélisme
- ▶ Analogie du carrefour : damier jaune

Solution 2 : requêtes ordonnées

- ▶ Tous les processus demandent les ressources **dans le même ordre**
- ▶ Interblocage alors impossible
- ▶ Analogie du carrefour : construire un rond-point

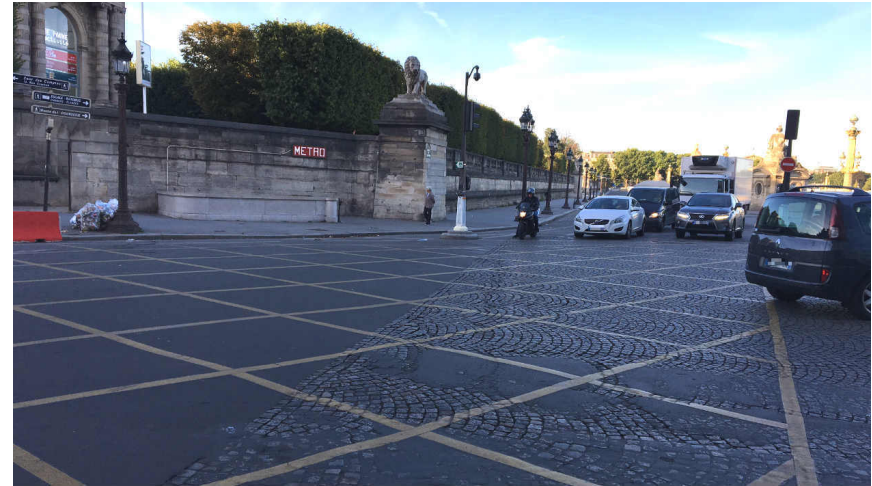
```
verrouille (f1)
verrouille (f2)
accès à f1 et f2
deverrouille (f2)
deverrouille (f1)
```

```
verrouille (f1)
verrouille (f2)
accès à f1 et f2
deverrouille (f2)
deverrouille (f1)
```

Solution 3 : modification de l'algorithme

- ▶ Modifier code utilisateur pour rendre impossible l'interblocage
- ▶ Analogie du carrefour : construire un pont au dessus du carrefour

(156/217)



(157/217)

Sortir de l'interblocage (quand on a pas su prévenir)

Impossible sans perdre quelque chose

Possibilités de guérison

- ▶ Faire revenir un processus en arrière
 - ▶ Nécessite d'avoir un **point de reprise** (*checkpoint*)
 - ▶ Travail depuis dernier point de reprise perdu
- ▶ Tuer l'un des processus pour casser le cycle

Conclusion

- ▶ Prévention et guérison sont tous les deux coûteux
 - ▶ **Prévention** : l'application doit faire attention
 - ▶ **Guérison** : détection + pertes dues au retour en arrière
- ▶ La «meilleure» solution dépend de la situation

(158/217)

Section critique par attente active

Principe (rappel)

- ▶ On demande tant qu'on a pas obtenu

Défaut

- ▶ Manque d'efficacité car gaspillage de ressources

Avantage

- ▶ Implémentable sans primitive de l'OS ni du matériel
- ⇒ utilisé dans certaines parties de l'OS, par exemple

Attention, ce n'est pas si simple à faire

(159/217)

Réalisation d'une section critique par attente active

- **Hypothèses** : atomicité d'accès et de modifications de variables
V ne change pas au milieu de $V==1$ ni de $V=1$ (raisonnable sur monoprocesseur)

Solution **FAUSSE** numéro 1

```
while (tour != MOI); /* attente active */
SC(); /* section critique */
tour = 1-MOI; /* soyons fair-play */
```

Solution **FAUSSE** numéro 2

```
while(flag[1-MOI]); /*attendre autre*/
flag[MOI] = VRAI; /*annonce entrer*/
SC();
flag[MOI] = FAUX; /*débloque autre*/
```

Solution **FAUSSE** numéro 3

```
flag[MOI]=VRAI; /*annonce entrer avant*/
while (flag[1-MOI]); /*attendre l'autre*/
SC();
flag[MOI] = FAUX; /*débloque autre*/
```

Demande alternance stricte :

Entrer deux fois de suite dans SC()
impossible (même si seul processeur)

C'est une **famine**

Pas d'exclusion mutuelle (**compétition**) :

P0 teste flag[1] et trouve faux
P1 teste flag[0] et trouve faux
Les deux entrent dans SC()

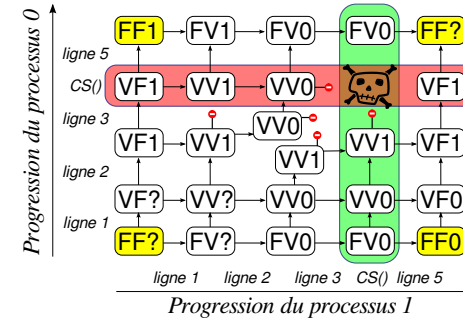
Possibilité d'**interblocage** :

P0 : flag[0] ← VRAI
P1 : flag[1] ← VRAI
Les deux entrent dans leur boucle

(160/217)

Algorithme correct d'attente active

```
1. flag[MOI] = VRAI; /* Annonce être intéressé */
2. tour = 1-MOI; /* mais on laisse la priorité à l'autre */
3. while ((flag[1-MOI]==VRAI) /* on entre si l'autre ne veut pas entrer */
    && (tour == 1-MOI)); /* ou s'il nous a laissé la priorité */
4. CS();
5. flag[MOI] = FAUX; /* release */
```



GL Peterson. *A New Solution to Lamport's Concurrent Programming Problem*. 1983. ([lire l'article](http://en.wikipedia.org/wiki/Peterson's_algorithm))
http://en.wikipedia.org/wiki/Peterson's_algorithm

- Ceci est un diagramme de transition (rarement aussi régulier)

(161/217)

Problèmes de synchronisation (résumé)

- Condition de **compétition** (*race condition*)
 - **Définition** : le résultat change avec l'ordre des instructions
 - Difficile à corriger car difficile à reproduire (ordre «aléatoire»)
 - Également type de problème de sécurité :
 - Un programme crée un fichier temporaire, le remplit puis utilise le contenu
 - L'attaquant crée le fichier avant le programme pour contrôler le contenu
- **Interblocage** (*deadlock*)
 - **Définition** : un groupe de processus bloqués en attente mutuelle
 - Évitement parfois difficile (correction de l'algorithme)
 - Détection assez simple, mais pas de guérison sans perte
- **Famine** (*starvation*)
 - **Définition** : un processus attend indéfiniment une ressource (problème d'équité)
 - Servir équitablement les processus demandeurs

(162/217)

Cinquième chapitre

Synchronisation entre processus

- Introduction : notions de base
 - Condition de compétition et exclusion mutuelle
 - Exclusion mutuelle par verrouillage de fichiers
 - Notion d'interblocage
 - Exclusion mutuelle par attente active
 - Problèmes de synchronisation (résumé)
- Sémaphores et schémas de synchronisation
 - Sémaphores
 - Exclusion mutuelle
 - Cohorte
 - Rendez-vous
 - Producteurs / Consommateurs
 - Lecteurs / Rédacteurs
- Autres outils de synchronisation
 - Moniteurs
 - Synchronisations POSIX
 - compare-and-swap
- Conclusion

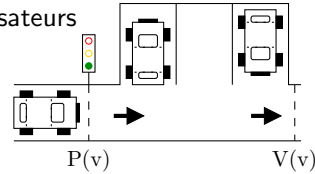
Sémaphore : outil de base pour la synchronisation

Cohorte : généralisation de l'exclusion mutuelle

- ▶ Ressource partagée par au plus N utilisateurs

▶ Exemples :

- ▶ Parking payant
- ▶ Serveur informatique



Sémaphore

- ▶ **Objet composé :**
 - ▶ D'une **variable** : valeur du sémaphore (nombre de places restantes)
 - ▶ D'une **file d'attente** : liste des processus bloqués sur le sémaphore
- ▶ **Primitives associées :**
 - ▶ **Initialisation** (avec une valeur positive ou nulle)
 - ▶ **Prise** (P, Probeer, down, wait) = demande d'autorisation («puis-je ?») Si *valeur* = 0, blocage du processus ; Si non, *valeur* = *valeur* - 1
 - ▶ **Validation** (V, Verhoog, up, signal) = fin d'utilisation («vas-y») Si *valeur* = 0 et processus bloqué, déblocage d'un processus ; Si non, *valeur* = *valeur* + 1

E.W. Dijkstra. *Solution of a Problem in Concurrent Programming Control*. 1965. ([lire l'article](#))

(164/217)

Schémas de synchronisation

Situations usuelles se retrouvant lors de coopérations inter-processus

- ▶ **Exclusion mutuelle** : ressource accessible par une seule entité à la fois
 - ▶ Compte bancaire ; Carte son
- ▶ **Problème de cohorte** : ressource partagée par au plus N utilisateurs
 - ▶ Un parking souterrain peut accueillir 500 voitures (pas une de plus)
 - ▶ Un serveur doom peut accueillir 2000 joueurs
- ▶ **Rendez-vous** : des processus collaborant doivent s'attendre mutuellement
 - ▶ Roméo et Juliette ne peuvent se prendre la main que s'ils se rencontrent
 - ▶ Le GIGN doit entrer en même temps par le toit, la porte et la fenêtre
 - ▶ Processus devant échanger des informations entre les étapes de l'algorithme
- ▶ **Producteurs/Consommateurs** : un processus doit attendre la fin d'un autre
 - ▶ Une Formule 1 ne repart que quand tous les mécaniciens ont le bras levé
 - ▶ Réception de données sur le réseau puis traitement
- ▶ **Lecteurs/Rédacteurs** : notion d'accès exclusif entre *catégories* d'utilisateurs
 - ▶ Sur une section de voie unique, tous les trains doivent rouler dans le même sens
 - ▶ Un fichier pouvant être lu par plusieurs, si personne ne le modifie
 - ▶ Tâches de maintenance (défragmentation) quand pas de tâches interactives

Comment résoudre ces problèmes avec les sémaphores ?

(165/217)

Exclusion mutuelle par sémaphore

Très simple

Initialisation

```
sem=semaphore(1)
```

Agence Nancy

```
P(sem)
courant = get_account(1867A)
nouveau = courant + 1000
update_account(1867A, nouveau)
V(sem)
```

Agence Karlsruhe

```
P(sem)
aktuelles = get_account(1867A)
neue = aktuelles - 1000
update_account(1867A, neue)
V(sem)
```

(166/217)

Cohortes et sémaphores

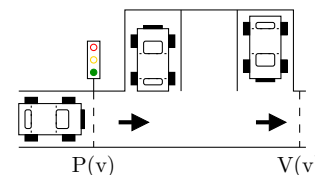
Sémaphore inventée pour cela

Initialisation

```
sem=semaphore(3) /* nombre de places */
```

Garer sa voiture

```
P(sem)
poser sa voiture au parking
aller faire les courses
Reprendre la voiture
V(sem)
partir
```



Exercice : quelle est la valeur de *sem.v* ici ?

(167/217)

Rendez-vous et sémaphores

► Envoi de signal

- Un processus indique quelque chose à un autre (disponibilité donnée)

Initialisation

```
top=semaphore(0)
```

Processus 1

```
...
calcul(info)
V(top)
...
```

Processus 2

```
...
P(top) /*Bloque en attente*/
utilisation(info)
...
```

- top = **sémaphore privée** (initialisée à 0) utilisée pour synchro avec *quelqu'un*, pas sur une ressource

► Rendez-vous entre deux processus

- Les processus s'attendent mutuellement

Initialisation

```
roméo=semaphore(0)
juliette=semaphore(0)
```

Processus romeo

```
P(romeo) /*se bloque*/
V(juliette) /*libère J*/
```

Processus juliette

```
V(romeo) /*libère R*/
P(juliette) /*bloque*/
```

► Rendez-vous entre trois processus et plus

- On parle de **barrière de synchronisation**
- La solution précédente est généralisable, mais un peu lourde
- Souvent une primitive du système

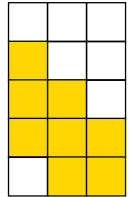
(168/217)

Producteurs et consommateurs

Contrôle de flux entre producteur(s) et consommateur(s) par tampon

Principe

- Situation initiale : tampon vide (pas de lecture possible)
- Après une production :
- Une autre production :
- Encore une production : (plus de production possible)
- Une consommation : (production de nouveau possible)



Réalisation

Initialisation

```
placeDispo=semaphore(N)
infoPrete=semaphore(0)
```

Producteur

```
répéter
calcul(info)
P(placeDispo)
déposer(info)
V(infoPrete)
```

Consommateur

```
répéter
P(infoPrete)
extraire(info)
V(placeDispo)
utiliser(info)
```

- Le tampon doit être circulaire pour traiter données dans l'ordre de production
- Attention aux compétitions entre producteurs (idem entre consommateurs)

(169/217)

Lecteurs et rédacteurs

Contrôle d'accès exclusif entre catégories d'utilisateurs

- Accès simultané de plusieurs lecteurs
- Accès exclusif d'un seul rédacteur, également exclusif de tout lecteur
- Schéma assez classique (fichier sur disque, zone mémoire, etc.)

Première solution

Initialisation

```
lecteur=semaphore(1)
rédacteur=semaphore(1)
NbLect=0
```

Lecteur

```
P(lecteur)
NbLect = NbLect + 1
si NbLect == 1 alors
  P(rédacteur)
V(lecteur)
lectures()
P(lecteur)
NbLect = NbLect - 1
si NbLect == 0 alors
  V(rédacteur)
V(lecteur)
```

Rédacteur

```
P(rédacteur)
lecturesEtEcritures()
V(rédacteur)
```

- **Problème** : famine potentielle des rédacteurs

(170/217)

Lecteurs et rédacteurs sans famine

Initialisation

```
lecteur=semaphore(1)
rédacteur=semaphore(1)
fifo=semaphore(1)
NbLect=0
```

Lecteur

```
P(fifo)
P(lecteur)
NbLect = NbLect + 1
si NbLect == 1 alors
  P(rédacteur)
V(lecteur)
V(fifo)
lectures()
P(lecteur)
NbLect = NbLect - 1
si NbLect == 0 alors
  V(rédacteur)
V(lecteur)
```

Rédacteur

```
P(fifo)
P(rédacteur)
V(fifo)
lecturesEtEcritures()
V(rédacteur)
```

Exercice : pourquoi cette nouvelle sémaphore empêche la famine des rédacteurs ?

Exercice : montrer que les lecteurs peuvent encore partager l'accès

(171/217)

Cinquième chapitre

Synchronisation entre processus

- Introduction : notions de base
 - Condition de compétition et exclusion mutuelle
 - Exclusion mutuelle par verrouillage de fichiers
 - Notion d'interblocage
 - Exclusion mutuelle par attente active
 - Problèmes de synchronisation (résumé)
- Sémaphores et schémas de synchronisation
 - Sémaphores
 - Exclusion mutuelle
 - Cohorte
 - Rendez-vous
 - Producteurs / Consommateurs
 - Lecteurs / Rédacteurs
- Autres outils de synchronisation
 - Moniteurs
 - Synchronisations POSIX
 - compare-and-swap
- Conclusion

Moniteur

Problème des sémaphores

- ▶ **Tous les processus doivent les utiliser correctement**
- ▶ Mauvais comportement d'un seul \Rightarrow problème pour l'ensemble
 - ▶ Oubli d'un P(mutex) : CS pas respectée
 - ▶ Oubli d'un V(mutex) : deadlock (Deni de Service – DoS)
- ▶ Causes possibles :
 - ▶ Erreur de programmation
 - ▶ Programme malveillant

Solution : le moniteur (synchronized en Java)

- ▶ Sorte d'objet contenant :
 - ▶ Des variables partagées (privées)
 - ▶ Un sémaphore protecteur
 - ▶ Des méthodes d'accès
- ▶ Le compilateur ajoute les appels au sémaphore pour protéger les méthodes
- ▶ Erreur impossible car usage seulement à travers l'API protégée

C.A.R. Hoare. *Monitors: An Operating System Structuring Concept*. 1974. ([lire l'article](#))

(173/217)

L'exemple des banques avec un moniteur Java

```
public class compteBanquaire {
    private int balance;
    compteBanquaire() {
        balance = 0;
    }

    void synchronized modifie(int montant) {
        balance = balance + montant;
    }
}
```

La méthode est invoquable par un thread au plus (en exclusion mutuelle)

La complexité est laissée au compilateur

(174/217)

Synchroniser conjointement des méthodes Java

```
public class compteBanquaire {
    private int balance;
    compteBanquaire() { balance = 0; }

    void synchronized ajoute(int montant)
        throws Exception {
        if (montant < 0) {
            throw new Exception("Montant négatif");
        } else {
            balance = balance + montant;
        }
    }

    void synchronized retire(int montant)
        throws Exception {
        if (montant < 0) {
            throw new Exception("Montant négatif");
        } else if (balance - montant < 0) {
            throw new Exception("Solde insuffisant");
        } else {
            balance = balance - montant;
        }
    }
}
```

Invocations sérialisées au sein de l'objet

- ▶ Entre threads
- ▶ Entre les méthodes du même objet
- ▶ Pas entre les instances
(invocations parallèles sur \neq objets)

(175/217)

Moniteurs et conditions

Moniteurs ne permettent pas d'attendre un événement

- ▶ Comparable au P() sur sémaphore à 0 (cf. place libérée sur le parking)
- ▶ Nouveau type de variable : **condition** x; (sorte de file d'attente)
- ▶ Primitives associées :
 - ▶ x.wait() : Entre dans la file d'attente associée
 - ▶ x.notify() : Libère un processus en attente (ou noop si personne n'attend)
- ▶ En Java, chaque objet a une condition implicite associée

Exemple : lecteur/écrivain

```
class Channel {
    private int contenu;
    private boolean plein;
    Channel() { plein = false; }
    synchronized void enqueue(int val) {
        while (plein) {
            try {
                wait();
            } catch (InterruptedException e) {}
        }
        contenu = val; plein = true;
        notifyAll();
    }
}
```

```
synchronized int dequeue() {
    int recu;

    while (!plein) {
        try {
            wait();
        } catch (InterruptedException e) {}
    }
    recu = contenu;
    full = false;
    notifyAll();
    return recu;
}
```

(176/217)

Synchronisations POSIX

Les sémaphores

- ▶ Font partie de System V, mais également de POSIX

Les verrous : mutex (mutual exclusion)

- ▶ Comme un sémaphore de capacité 1 (un processus prend le verrou)
- ▶ Sémantique plus simple / pauvre
- ▶ Standard = interface ; multiples implémentations (Linux : futex ; BSD : spinlock)
- ▶ **Mutex réentrants** : impossible de faire un deadlock avec soi-même

Les variables de condition

- ▶ Pour envoyer un événement aux gens qui l'attendent (ça les débloque)
- ▶ **signal()** débloque un seul processus ; **broadcast()** débloque tout le monde.
- ▶ Par rapport aux sémaphores : message perdu si personne n'est encore bloqué
- ▶ Usage assez complexe : il faut protéger chaque variable par un mutex

On y revient dans le prochain chapitre

(177/217)

compare-and-swap

Autre problème des sémaphores, moniteurs and co

- ▶ C'est bloquant : seul un algorithme peut agir en même temps
- ▶ Si on cherche non-bloquant, il faut des opérations atomiques

Compare-And-Swap (instructions binaires CAS et CAS2)

- ▶ **Opération atomique** : tentative de modification d'une variable partagée
- ▶ Si la valeur partagée est ce que je pense, je change la variable
Si non, je suis informé de la nouvelle valeur partagée

```
int CAS(int*adresse, int *ancienne_val, int nouvelle_val) {
    if (*adresse == *ancienne_val) {
        *adresse = nouvelle_val;
        return TRUE;
    } else {
        *ancienne_val = *adresse;
        return FALSE;
    }
}
```

- ▶ Brique de base pour implémenter les sémaphores dans l'OS
- ▶ **Recherche (actuelle)** : structures partagées « Lock-free » et « Wait-free »

John D. Valois. *Lock-Free Linked Lists Using Compare-and-Swap*. 1995. ([lire l'article](#))
RCU (Read-Copy-Update) dans Linux

(178/217)

Résumé du cinquième chapitre

Problèmes à éviter lors des synchronisations (et définitions)

- ▶ Interblocage : groupe de processus en attente mutuelle
- ▶ Compétition : le résultat dépend de l'ordre d'exécution
- ▶ Famine : un processus n'obtient pas la ressource car les autres l'en empêchent

Les sémaphores

- ▶ Principe : distributeur de jetons
- ▶ Opérations :
 - ▶ initialisation : mettre des jetons dans la boîte
 - ▶ P : prendre un jeton (ou bloquer s'il y en a plus)
 - ▶ V : rendre un jeton pris

Schémas de synchronisation classiques

- ▶ Exclusion mutuelle : Ressource utilisée par au plus un utilisateur
- ▶ Cohorte : Ressource partagée entre au plus N utilisateurs
- ▶ Rendez-vous : un processus attend un autre, ou attente mutuelle
- ▶ Producteurs/consommateurs : utilisation **après** création
- ▶ Lecteurs/rédacteurs : concurrence entre **catégories** d'utilisateurs

(179/217)

Résumé du cinquième chapitre (suite)

Moniteurs

- ▶ Principe : Objet auto-protégé par sémaphore
- ▶ Avantage : Pas d'erreur de manipulation possible
- ▶ Usage en Java : synchronized

Variable de condition

- ▶ Principe : Comme un sémaphore privé pour la communication entre threads
- ▶ Avantage : Permet le passage de relai entre threads
- ▶ Usage en Java : wait()/notifyAll()

CAS (Compare-And-Swap)

- ▶ Principe : Tentative de modif. si personne n'a modifié depuis dernière lecture
- ▶ Avantages : Implémenter les sémaphores ; algo lock-free

(180/217)

Conclusion générale

Il n'y a pas de magie noire dans l'ordinateur

- ▶ Même un OS est finalement assez simple, avec des idées très générales
- ▶ **Concepts** : processus, mémoire, système de fichiers, pseudo-parallélisme
- ▶ **Idées** : interposition, préemption, tout-est-fichier, bibliothèque de fonctions
- ▶ **Synchro** : compétition, interblocage, famine. Sémaphore, mutex, moniteur . . .

Indispensable pour comprendre l'ordinateur

- ▶ 1% d'entre vous vont coder dans l'OS, 5% vont coder si bas niveau
- ▶ Mais ces connaissances restent indispensables pour comprendre la machine
- ▶ Programmer efficace en Java demande de comprendre le tas et les threads
- ▶ Les problèmes de synchro restent assez similaires dans les couches hautes

Ce que nous n'avons pas vu

- ▶ Le chapitre sur les threads
- ▶ L'implémentation de l'OS (cf. RSA) et des machines virtuelles
- ▶ High Perf Computing : Message-passing, cache-aware, out-of-core, parallélisme
- ▶ Recherche en OS : Virtualisation, synchro wait-free, spec formelle

(181/217)