Conception des systèmes concurrents

2SN

ENSEEIHT
Département Sciences du Numérique

20 septembre 2022

Troisième partie

Sémaphores

Contenu de cette partie

- présentation d'un objet de synchronisation « minimal » (sémaphore)
- patrons de conception élémentaires utilisant les sémaphores
- exemple récapitulatif (schéma producteurs/consommateurs)
- schémas d'utilisation pour le contrôle fin de l'accès aux ressources partagées
- mise en œuvre des sémaphores

Plan

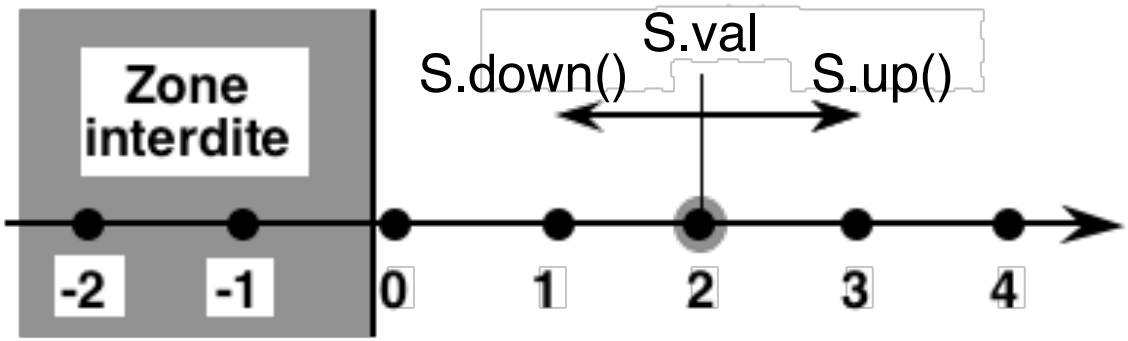
But

- Fournir un moyen *simple*, élémentaire, de contrôler les effets des interactions entre activités
  - isoler (modularité) : atomicité
  - spécifier des interactions précises : synchronisation
- Exprimer ce contrôle par des interactions sur un *objet partagé* (indépendant des activités en concurrence) plutôt que par des interactions entre activités (dont le code et le comportement seraient alors interdépendants)

Définition – Dijkstra 1968

Un sémaphore S est un objet dont

- l'état val est un attribut entier *privé* (l'état est encapsulé)
- l'ensemble des états permis est contraint par un invariant (*contrainte de synchronisation*) :
  invariant $S.val \geq 0$ (l'état doit toujours rester positif ou nul)
- l'interface fournit deux opérations principales :
  - *down* : décrémente l'état s'il est > 0, bloque si l'état est nul,
  - *up* : incrémente l'état $\rightarrow$ peut débloquer une éventuelle activité bloquée sur `down`
  - les opérations `down` et `up` sont *atomiques*



- *Autre opération* : constructeur (et/ou initialisation)
  $S = new\ Semaphore(v_0)$ (ou $S.init(v_0)$)
  (crée et) initialise l'état de S à v_0
- *Autres noms des opérations*

`P`	Probeer (essayer [de passer])	*down*	wait/attendre	acquire/prendre
`V`	Verhoog (augmenter)	*up*	signal(er)	release/libérer

Modèle intuitif

Un sémaphore peut être vu comme un tas de jetons avec deux opérations :

- Prendre un jeton, en attendant si nécessaire qu'il y en ait ;
- Déposer un jeton.

Attention

- les jetons sont anonymes et illimités : une activité peut déposer un jeton sans en avoir pris ;
- il n'y a pas de lien entre le jeton déposé et l'activité déposante ;
- lorsqu'une activité dépose un jeton et que des activités sont en attente, *une seule* d'entre eux peut prendre ce jeton.

Spécification formelle : Hoare

Définition

Un sémaphore S encapsule un entier *val* tel que

$$\begin{array}{ccc} \text{init} & \Rightarrow & S.val \geq 0 \\ \{S.val = k \wedge k > 0\} & S.down() & \{S.val = k - 1\} \\ \{S.val = k\} & S.up() & \{S.val = k + 1\} \end{array}$$

Remarques

- Si la précondition de $S.down()$ est fausse, l'activité attend.
- Si l'exécution de l'opération *up*, rend vraie la précondition de $S.down()$ et qu'il y a au moins une activité bloquée sur *down*, une telle activité est débloquée (et décrémente le compteur).
- l'invariant du sémaphore peut aussi s'exprimer à partir des nombres $\#down$ et $\#up$ d'opérations *down* et *up* effectuées : **invariant** $S.val = S.val_{\text{init}} + \#up - \#down$

Remarques

1. Lors de l'exécution d'une opération *up*, s'il existe plusieurs activités en attente, la politique de choix de l'activité à débloquer peut être :
   - par ordre chronologique d'arrivée (FIFO) : équitable
   - associée à une priorité affectée aux activités en attente
   - indéfinie.
     C'est le cas le plus courant : avec une primitive rapide mais non équitable, on peut implanter (laborieusement) une solution équitable, mais avec une primitive lente et équitable, on ne peut pas implanter une solution rapide.
2. Variante : *down* non bloquant (*tryDown*)

$$\left\{ S.val = k \right\} r \leftarrow S.tryDown() \left\{ \begin{array}{c} (k > 0 \wedge S.val = k - 1 \wedge r) \\ \vee (k = 0 \wedge S.val = k \wedge \neg r) \end{array} \right\}$$

Attention aux mauvais usages : incite à l'attente active.

Sémaphore binaire (booléen) – Verrou

Définition

Sémaphore S encapsulant un entier b tel que

$$\begin{array}{ccc} \{S.b = 1\} & S.down() & \{S.b = 0\} \\ \{true\} & S.up() & \{S.b = 1\} \end{array}$$

- Un sémaphore binaire est différent d'un sémaphore entier initialisé à 1 (plusieurs *up* consécutifs = un seul).
- Souvent nommé verrou/lock
- Opérations down/up = lock/unlock ou acquire/release

Plan

Schémas d'utilisation essentiels (0/4)

Réalisation de l'isolation : exclusion mutuelle

Algorithme

```
global mutex = new Semaphore(--); //objet partagé

// Protocole d'exclusion mutuelle
// (suivi par chacune des activités)

    section critique
```

Schémas d'utilisation essentiels (0/4)

Réalisation de l'isolation : exclusion mutuelle

Algorithme

```
global mutex = new Semaphore(1); //objet partagé

// Protocole d'exclusion mutuelle
// (suivi par chacune des activités)

mutex.down()
     section critique
mutex.up()
```

Schémas d'utilisation essentiels (1/4)

Généralisation : contrôle du degré de parallélisme

Algorithme

Pour limiter à *Max* le nombre d'accès simultanés à la ressource *R* :

- Objet partagé :

```
global accèsR = new Semaphore(Max)
```

- Protocole d'accès à la ressource *R* (pour *chaque* activité) :

```
accèsR.down()
    accès à la ressource R
accèsR.up()
```

Règle de conception

- Identifier les portions de code où le parallélisme doit être limité
- Définir un sémaphore pour contrôler le degré de parallélisme
- Encadrer ces portions de code par down/up sur ce sémaphore

Schémas d'utilisation essentiels (2/4)

Synchronisation élémentaire : attendre/signaler un événement E

- Objet partagé :

```
occurrenceE = new Semaphore(0) // initialisé à 0
```

- attendre une occurrence de E : `occurrenceE.down()`
- signaler l'occurence de l'événement E : `occurrenceE.up()`

Règle de conception

- Identifier les événements qui doivent être attendus avant chaque action
- Définir un sémaphore *semE* par événement E à attendre
  - appel à *semE.down()* avant l'action oùl'attente est nécessaire
  - appel à *semE.up()* après l'action provoquant l'occurrence de l'événement

Schémas d'utilisation essentiels (3/4)

Synchronisation élémentaire : rendez-vous entre deux activités

Problème : garantir l'exécution ≪ virtuellement ≫ simultanée d'un point donné du flot de contrôle de A et d'un point donné du flot de contrôle de B

- Objets partagés :

```
aArrivé = new Semaphore(0);
bArrivé = new Semaphore(0)  // initialisés à 0
```

- Protocole de rendez-vous :

Activité A	*Activité B*
...	...
aArrivé.up()	bArrivé.up()
bArrivé.down()	aArrivé.down()
...	...

Schémas d'utilisation essentiels (4/4)

Généralisation : rendez-vous à N activités (barrière)

Fonctionnement : pour passer la barrière, une activité doit attendre que les $N - 1$ autres activités l'aient atteinte.

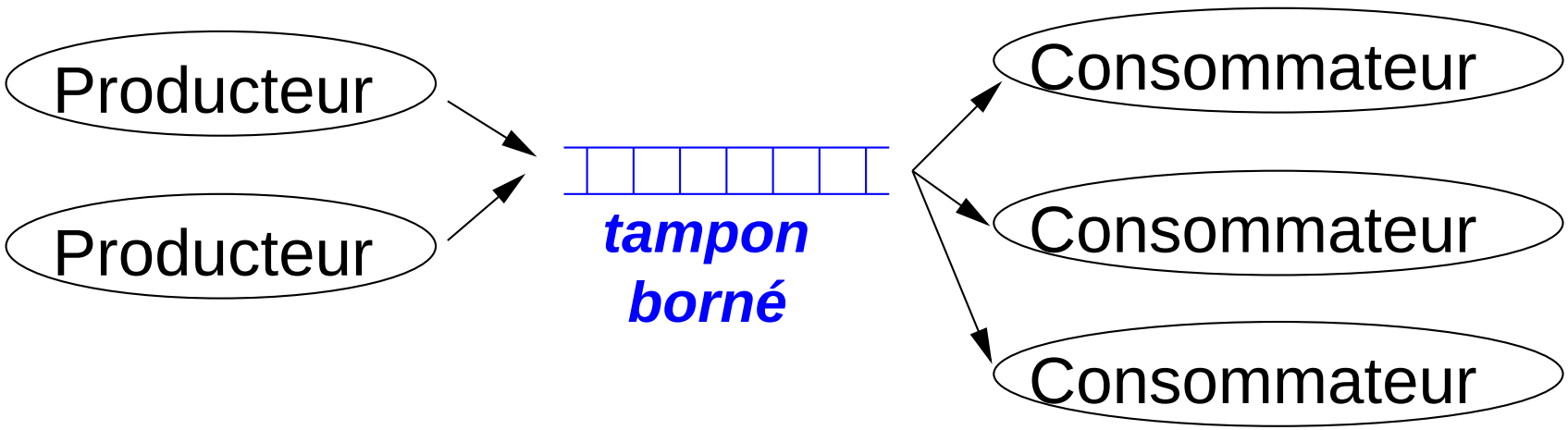
- Objet partagé :

```
barrière = tableau [0..N-1] de Semaphore;
pour i  := 0 à N-1 faire barrière[i].init(0) finpour;
```

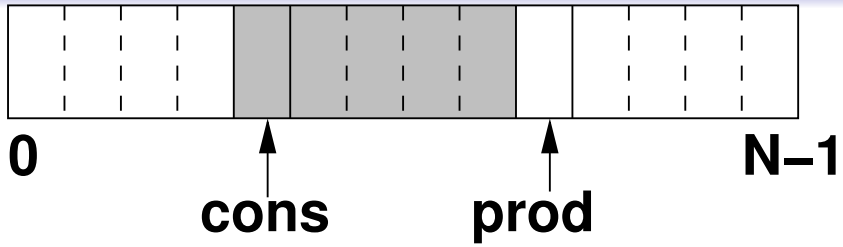
- Protocole de passage de la barrière (pour l'activité i) :

```
pour k := 0 à N-1 faire
    barrière[i].up()
finpour;
pour k := 0 à N-1 faire
    barrière[k].down()
finpour;
```

Schéma producteurs/consommateurs : tampon borné



- tampon de taille borné et fixé
- nombre indéterminé et dynamique de producteurs
- " " " " de consommateurs

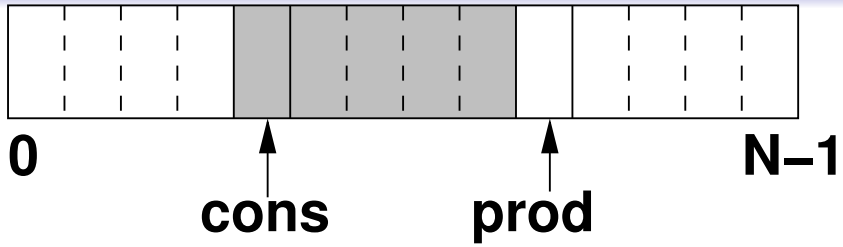


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ dépôt dans le tampon }
tampon[prod] := i
prod := prod + 1 mod N
```

consommateur

```
{ retrait du tampon }
i := tampon[cons]
cons := cons + 1 mod N

consommer(i) {i : Item}
```

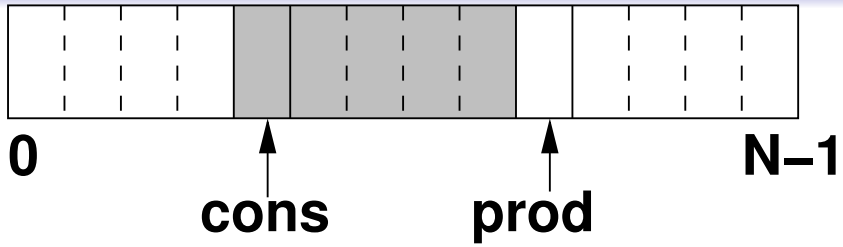


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
```

consommateur

```
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

consommer(i) {i : Item}
```

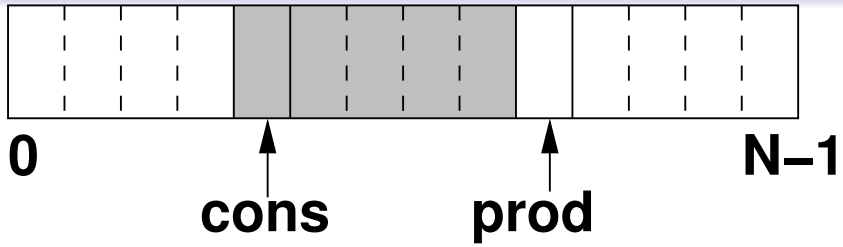


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : ∃ places libres }

{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
```

consommateur

```
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

consommer(i) {i : Item}
```

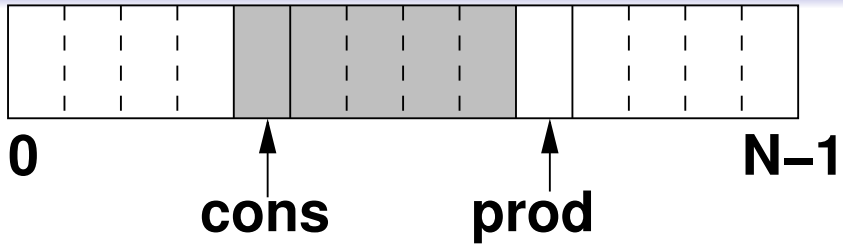


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : ∃ places libres }

{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
```

consommateur

```
{ pré : ∃ places occupées }

{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

consommer(i) {i : Item}
```

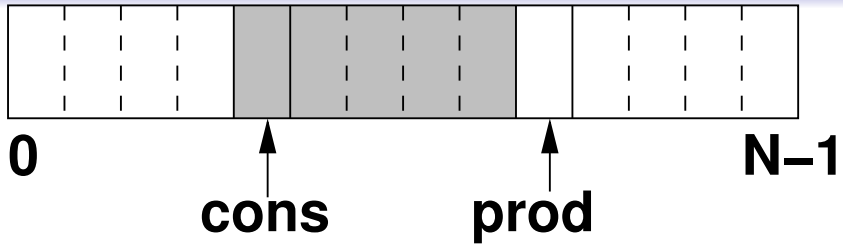


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : ∃ places libres }

{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }

{ post : ∃ places occupées }
```

consommateur

```
{ pré : ∃ places occupées }

{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

consommer(i) {i : Item}
```

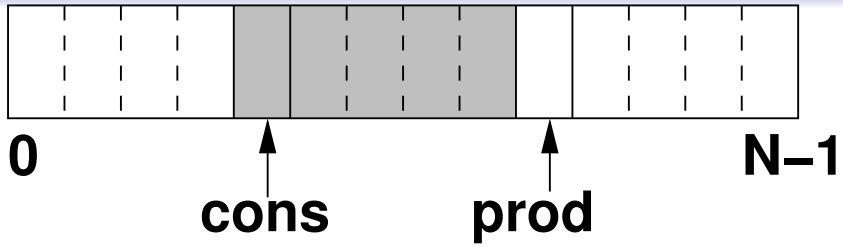


producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : ∃ places libres }

{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }

{ post : ∃ places occupées }
```

consommateur

```
{ pré : ∃ places occupées }

{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

{ post : ∃ places libres }

consommer(i) {i : Item}
```



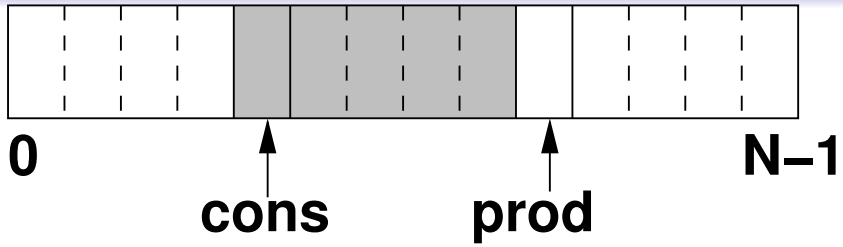
producteur

```
produire(i) {i : Item}

{ pré : ∃ places libres }
mutex.down()
{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
```

consommateur

```
{ pré : ∃ places occupées }
mutex.down()
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places libres }

consommer(i) {i : Item}
```

Sémaphores : mutex := 1



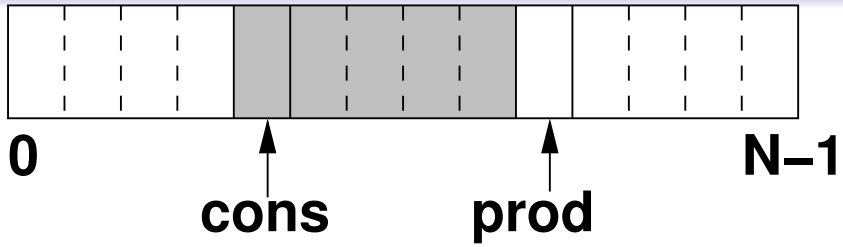
producteur

```
produire(i) {i : Item}
libre.down()
{ pré : ∃ places libres }
mutex.down()
{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
```

consommateur

```
occupé.down()
{ pré : ∃ places occupées }
mutex.down()
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places libres }

consommer(i) {i : Item}
```

Sémaphores : mutex := 1, occupé := 0, libre := 0



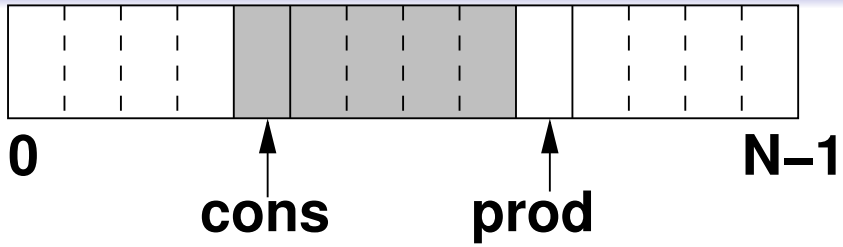
producteur

```
produire(i) {i : Item}
libre.down()
{ pré : ∃ places libres }
mutex.down()
{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
occupé.up()
```

consommateur

```
occupé.down()
{ pré : ∃ places occupées }
mutex.down()
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places libres }
libre.up()
consommer(i) {i : Item}
```

Sémaphores : mutex := 1, occupé := 0, libre := 0



producteur

```
produire(i) {i : Item}
libre.down()
{ pré : ∃ places libres }
mutex.down()
{ pré : début SC }
      { dépôt dans le tampon }
      tampon[prod] := i
      prod := prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
occupé.up()
```

consommateur

```
occupé.down()
{ pré : ∃ places occupées }
mutex.down()
{ pré : début section critique }
      { retrait du tampon }
      i := tampon[cons]
      cons := cons + 1 mod N
{ post : fin SC }
mutex.up()
{ post : ∃ places libres }
libre.up()
consommer(i) {i : Item}
```

Sémaphores : mutex := 1, occupé := 0, libre := N

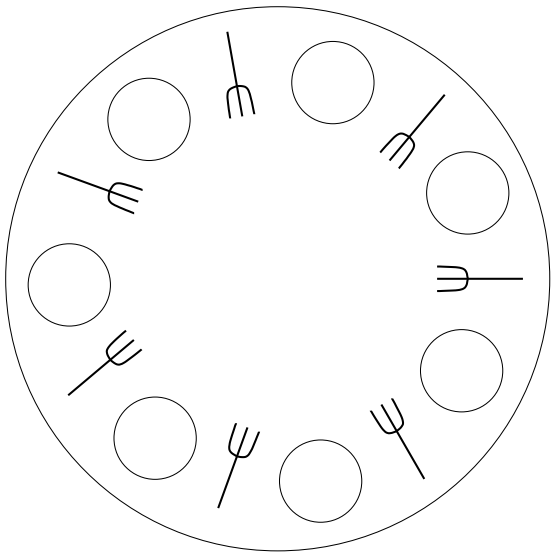
Contrôle fin du partage (1/3) : pool de ressources

- N ressources critiques, équivalentes, réutilisables
- usage exclusif des ressources
- opération `allouer` $k \leq N$ ressources
- opération `libérer` des ressources précédemment obtenues
- bon comportement :
  - pas deux demandes d'allocation consécutives sans libération intermédiaire
  - une activité ne libère pas plus que ce qu'il détient

Mise en œuvre de politiques d'allocation : FIFO, priorités...

Contrôle fin du partage (2/3) : philosophes et spaghettis

N philosophes sont autour d'une table.
Il y a une assiette par philosophe, et
une fourchette entre chaque assiette.
Pour manger, un philosophe doit
utiliser les deux fourchettes adjacentes
à son assiette (et celles-là seulement).



Un philosophe peut être :

- penseur : il n'utilise pas de fourchettes ;
- mangeur : il utilise les deux fourchettes adjacentes ; aucun de ses voisins ne peut manger ;
- demandeur : il souhaite manger mais ne dispose pas des deux fourchettes.

Allocation multiple de ressources différenciées, interblocage. . .

Contrôle fin du partage (3/3) : lecteurs/rédacteurs

Une ressource peut être utilisée :

- concurremment par plusieurs lecteurs (plusieurs lecteurs simultanément) ;
- exclusivement par un rédacteur (pas d'autre rédacteur, pas d'autre lecteur).

Souvent rencontré sous la forme de verrou lecture/écriture (read-write lock).
Permet l'isolation des modifications avec un meilleur parallélisme que l'exclusion mutuelle.

Stratégies d'allocation pour des classes distinctes de clients . . .

Plan

Implantation d'un sémaphore

Repose sur un service de gestion des processus fournissant :

- l'exclusion mutuelle (cf partie II)
- le blocage (suspension) et déblocage (reprise) des processus

Implantation

Sémaphore = ⟨ int nbjetons ;
File<Processus> bloqués ⟩

Algorithme

```
S.down() =   entrer en excl. mutuelle
               si S.nbjetons = 0 alors
                  insérer self dans S.bloqués
                  suspendre le processus courant
               sinon
                  S.nbjetons ← S.nbjetons - 1
               finsi
             sortir d'excl. mutuelle
```

```
S.up() =   entrer en excl. mutuelle
             si S.bloqués ≠ vide alors
                procRéveillé ← extraire de S.bloqués
                débloquer procRéveillé
             sinon
                S.nbjetons ← S.nbjetons + 1
             finsi
           sortir d'excl. mutuelle
```

Compléments (1/3) :

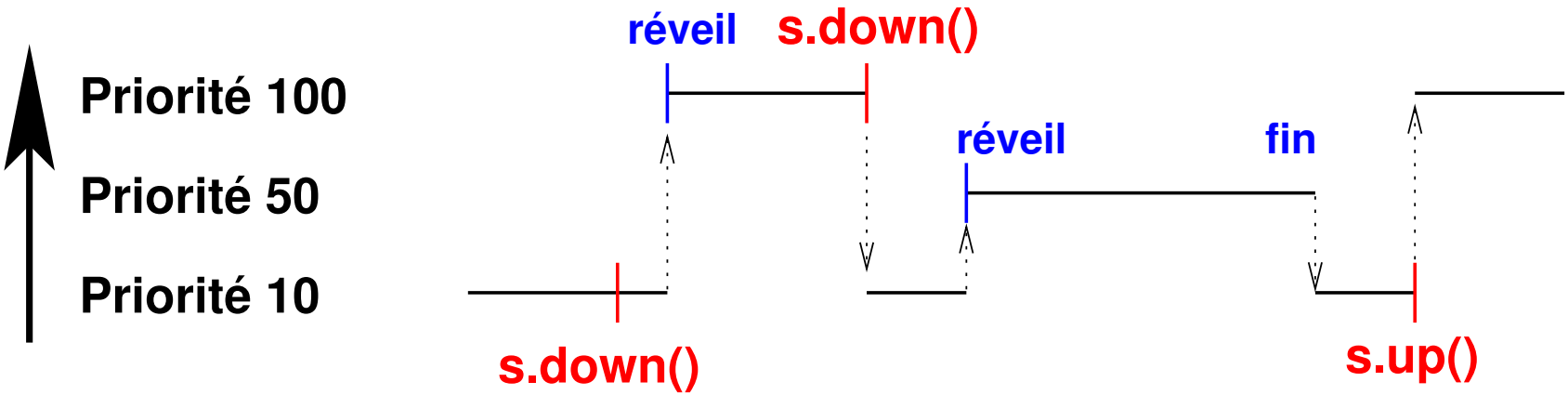
réalisation d'un sémaphore général à partir de sémaphores binaires

```
Sg = ⟨val := ?,
      mutex = new SemaphoreBinaire(1),
      accès = new SemaphoreBinaire(val>0;1;0) // verrous
      ⟩
Sg.down() =  Sg.accès.down()
             Sg.mutex.down()
             S.val ← S.val - 1
             si S.val ≥ 1 alors Sg.accès.up()
             Sg.mutex.up()
Sg.up() =  Sg.mutex.down()
           S.val ← S.val + 1
           si S.val = 1 alors Sg.accès.up()
           Sg.mutex.up()
```

→ les sémaphores binaires ont (au moins) la même puissance d'expression que les sémaphores généraux

Compléments (2/3) : sémaphores et priorités

Temps-réel ⇒ priorité ⇒ sémaphore non-FIFO.
Inversion de priorités : une activité moins prioritaire bloque/retarde indirectement une activité plus prioritaire.



Compléments (3/3) : solution à l'inversion de priorité

- Plafonnement de priorité (priority ceiling) : monter systématiquement la priorité d'une activité verrouilleuse à la priorité maximale des activités potentiellement utilisatrices de cette ressource.
  - – Nécessite de connaître a priori les demandeurs
  - – Augmente la priorité même en l'absence de conflit
  - \+ Simple et facile à implanter
  - \+ Prédictible : la priorité est associée à la ressource
- Héritage de priorité : monter dynamiquement la priorité d'une activité verrouilleuse à celle du demandeur.
  - \+ Limite les cas d'augmentation de priorité aux cas de conflit
  - – Nécessite de connaître les possesseurs d'un sémaphore
  - – Dynamique $\Rightarrow$ comportement moins prédictible

Conclusion

Les sémaphores

+ ont une sémantique, un fonctionnement simples à comprendre
+ peuvent être mis en œuvre de manière efficace
+ sont suffisants pour réaliser les schémas de synchronisation nécessaires à la coordination des applications concurrentes
− mais sont un outil de synchronisation élémentaire, aboutissant à des solutions difficiles à concevoir et à vérifier
  → schémas génériques