Systèmes concurrents

Philippe Quéinnec

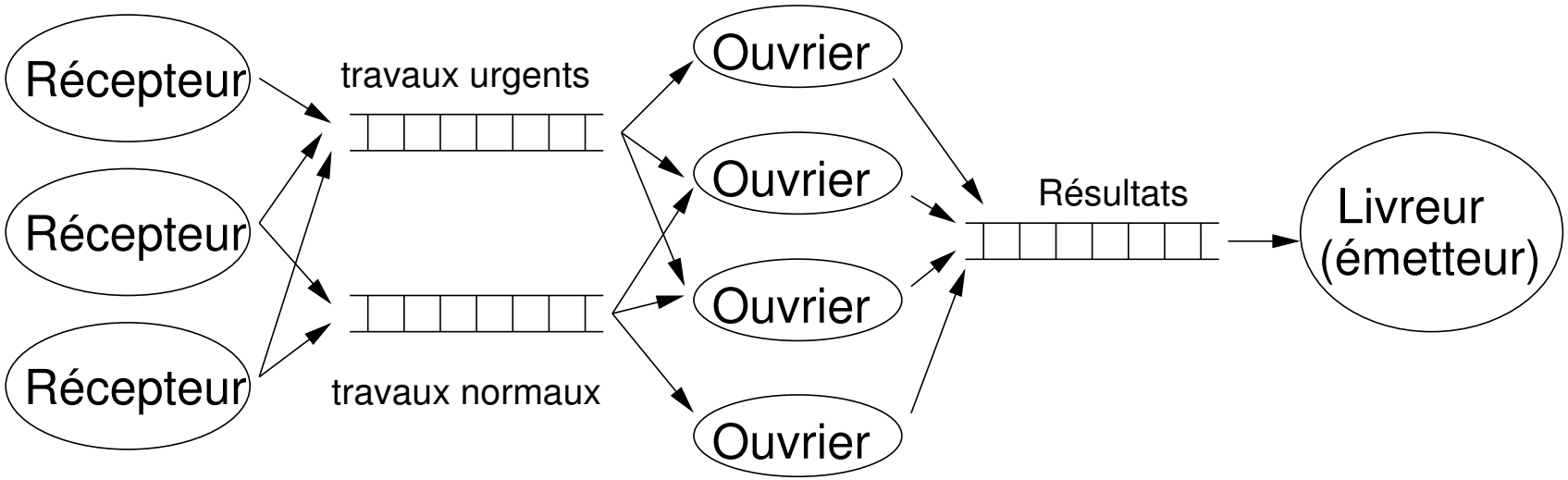
ENSEEIHT
Département Sciences du Numérique

16 septembre 2020

Troisième partie

Sémaphore

Le problème


Récepteur
Récepteur
Récepteur
travaux urgents
travaux normaux
Ouvrier
Ouvrier
Ouvrier
Ouvrier
Résultats
Livreur
(émetteur)

Contenu de cette partie

- Présentation d'un objet de synchronisation élémentaire (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

Principes directeurs :

- Abstraction de la file d'attente des activités bloquées
- Manipuler des objets de synchronisation, pas des activités

Définition

Un sémaphore encapsule un entier, avec une contrainte de positivité, et deux opérations atomiques d'incrémentation et de décrémentation.

- Contrainte de positivité : l'entier est toujours positif ou nul.
- opération `down` : décrémente le compteur s'il est strictement positif ; bloque s'il est nul en attendant de pouvoir le décrémenter.
- opération `up` : incrémente le compteur.

Spécification intuitive

Définition

Un sémaphore est un tas de cailloux avec deux opérations :

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

Attention :

- les cailloux sont anonymes et illimités : une activité peut déposer un caillou sans en avoir pris ;
- il n'y a pas de lien entre le caillou déposé et l'activité déposante ;
- lorsqu'une activité dépose un caillou et qu'il existe des activités en attente, une seule d'entre elles peut prendre un caillou.

Spécification formelle : Hoare

Définition

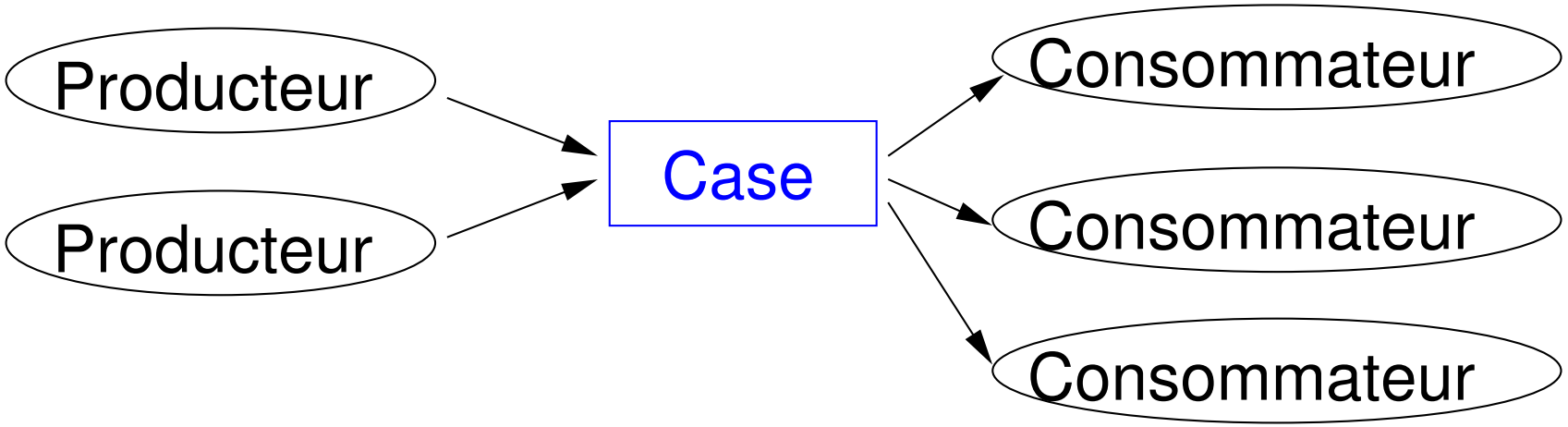
Un sémaphore S encapsule un entier cnt tel que

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

Propriétés

- Si la précondition de $S.down()$ n'est pas vérifiée, l'activité est retardée ou bloquée.
- Quand une activité, via l'opération *up*, rend vraie la précondition de $S.down()$ et qu'il existe au moins une activité bloquée sur *down*, une telle activité est débloquée (et décrémente le compteur).
- **invariant** $S.cnt = S.cnt_{\textbf{init}} + \#up - \#down$
  où $\#up$ et $\#down$ sont le nombre d'opérations *up* et *down* effectuées.

Producteurs/consommateurs simplifié



- échange des données via une unique case (zone mémoire partagée)
- nombre indéterminé et dynamique de producteurs
- " " " " de consommateurs
- objectifs : ne pas écraser une case occupée, une unique lecture consommatrice par case, attendre pour déposer si plein, attendre pour retirer si vide

Producteurs/consommateurs

```
case := nil // tampon partagé
```

déposer(item)	retirer(*item)
case ← item	*item ← case

Producteurs/consommateurs

```
case := nil // tampon partagé
```

déposer(item)	retirer(*item)
{ pré : case libre }	{ pré : case occupée }
case ← item	*item ← case
{ post : case occupée }	{ post : case libre }

(pré = précondition / post = postcondition)

Producteurs/consommateurs

```
case := nil // tampon partagé
Sémaphores : vide := 1, plein := 0
```

déposer(item)	retirer(*item)
vide.down()	plein.down()
{ pré : case libre }	{ pré : case occupée }
case ← item	*item ← case
{ post : case occupée }	{ post : case libre }
plein.up()	vide.up()

Autres noms des opérations :

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

Ordonnancement

Plusieurs stratégies de déblocage :

- First-In-First-Out = par ordre chronologique d'arrivée
- Priorité des activités demandeuses
- Indéfinie

Les implantations courantes sont en général sans stratégie définie : 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 (et inéquitable).

Variante : `down` non bloquant

opération tryDown

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

Conduit à de l'attente active.
Généralement utilisé à tort.

Plan

Schémas standards

Contrôle du degré de parallélisme

```
sémaphore accès := N

accès.down() zone(s) contrôlée(s) accès.up()
```

Événements

Attendre/signaler un événement :

- associer un sémaphore à l'événement : `occurrenceE` (généralement initialisé à 0)
- signaler la présence de l'événement : `occurrenceE.up()`
- attendre et consommer une occurrence de l'événement : `occurrenceE.down()`

Schémas moins standards

Rendez-vous entre deux activités

```
sémaphore aArrivé := 0
sémaphore bArrivé := 0


Activité A          Activité B
   ⋮                   ⋮
aArrivé.up()        bArrivé.up()
bArrivé.down()      aArrivé.down()
   ⋮                   ⋮
```

Schémas moins standards

Rendez-vous à N activités (barrière)

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

```
barrière = array 0..N-1 of Semaphore := {0,...};

-- Protocole de passage pour l'activité k
for i := 0..N-1 do barrière[k].up(); end;
for i := 0..N-1 do barrière[i].down(); end;
```

Pré/post-conditions

Précondition

Précondition de l'action qui suit =

- état qui doit être vrai pour pouvoir faire l'action,
- ou événement qui doit être survenu pour pouvoir faire l'action.

sém.down

Postcondition

Postcondition de l'action précédente

- état garanti après terminaison de l'action,
- ou événement qui survient après l'action.

sém.up

L'exclusion mutuelle

Algorithme

```
mutex : global semaphore := 1;

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

Sémaphore booléen – Verrou

Définition

Sémaphore S encapsulant un booléen b tel que

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

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

Verrou lecture/écriture

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.

Allocateur (simplifié) de ressources

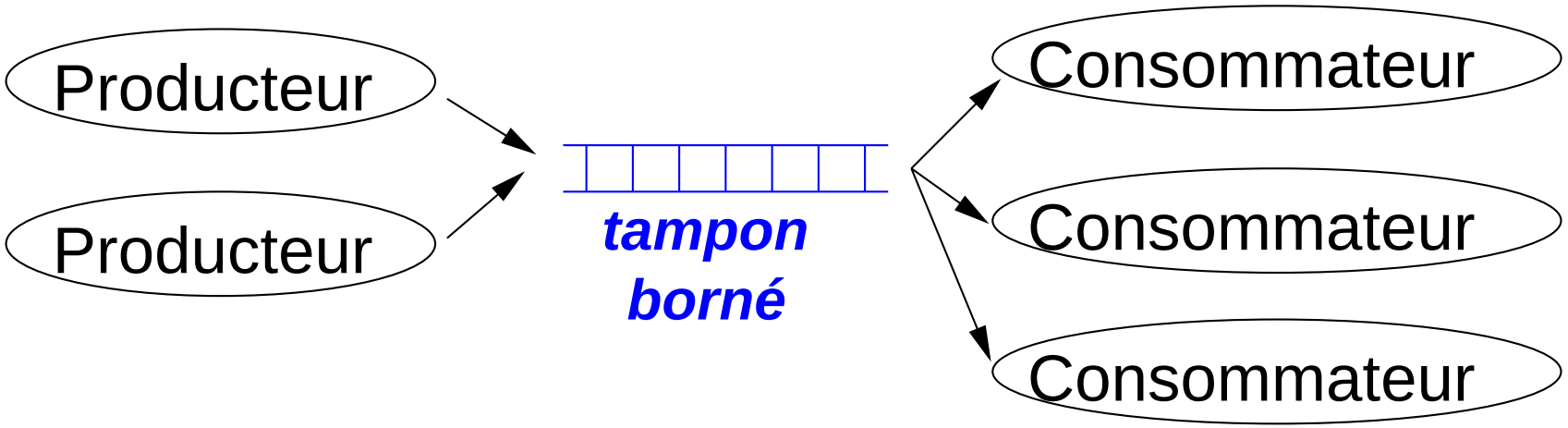
Définition

- N ressources critiques, équivalentes, réutilisables
- usage exclusif des ressources
- opération `allouer` une ressource
- opération `libérer` une ressource précédemment obtenue
- bon comportement d'une activité : pas deux demandes d'allocation consécutives sans libération intermédiaire

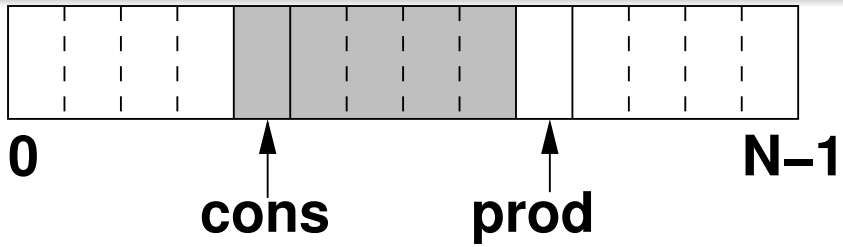
$\Rightarrow$ trivialement implanté par un sémaphore avec N jetons

Attention : le problème où `allouer` demande plusieurs ressources est plus dur ! Idem, si plusieurs allocations consécutives.

Producteurs/consommateurs



- tampon de taille borné et fixé
- nombre indéterminé et dynamique de producteurs
- " " " " de consommateurs
- objectifs : ne pas écraser une case occupée, une unique lecture consommatrice par case, attendre pour déposer si plein, attendre pour retirer si vide



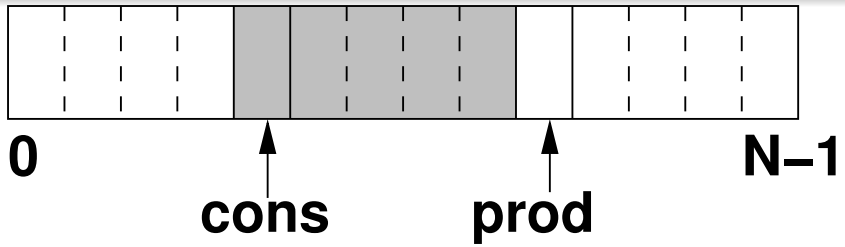
déposer(l)

```
tampon[prod] ← l
prod ← prod + 1 mod N
```

retirer(*l)

```
*l ← tampon[cons]
cons ← cons + 1 mod N
```

Sémaphores :



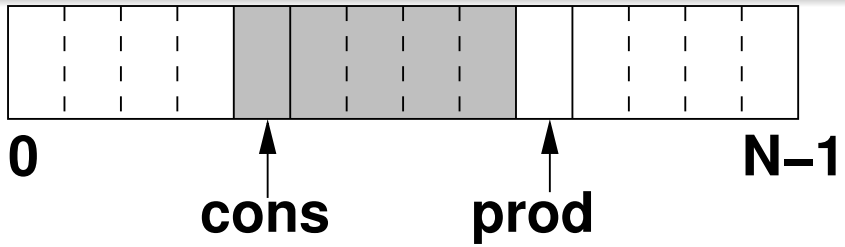
déposer(l)

```
{ pré : section critique }
  tampon[prod] ← l
  prod ← prod + 1 mod N
{ post : fin SC }
```

retirer(*l)

```
{ pré : section critique }
  *l ← tampon[cons]
  cons ← cons + 1 mod N
{ post : fin SC }
```

Sémaphores :



déposer(l)

{ pré : ∃ places libres }

{ pré : section critique }
tampon[prod] ← l
prod ← prod + 1 mod N
{ post : fin SC }

{ post : ∃ places occupées }

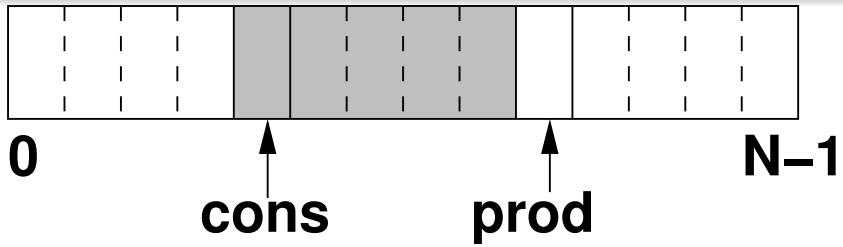
retirer(*l)

{ pré : ∃ places occupées }

{ pré : section critique }
*l ← tampon[cons]
cons ← cons + 1 mod N
{ post : fin SC }

{ post : ∃ places libres }

Sémaphores :



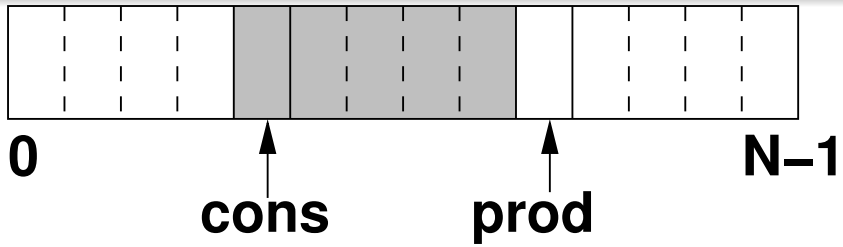
déposer(l)

```
{ pré : ∃ places libres }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     tampon[prod] ← l
     prod ← prod + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
```

retirer(*l)

```
{ pré : ∃ places occupées }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     *l ← tampon[cons]
     cons ← cons + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places libres }
```

Sémaphores : mutex := 1



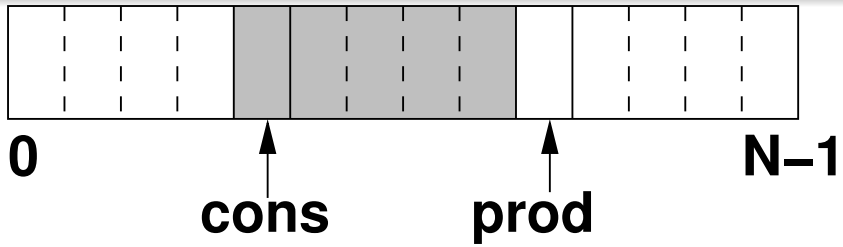
déposer(l)

```
vide.down()
{ pré : ∃ places libres }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     tampon[prod] ← l
     prod ← prod + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
```

retirer(*l)

```
{ pré : ∃ places occupées }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     *l ← tampon[cons]
     cons ← cons + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places libres }
vide.up()
```

Sémaphores : mutex := 1, vide := N



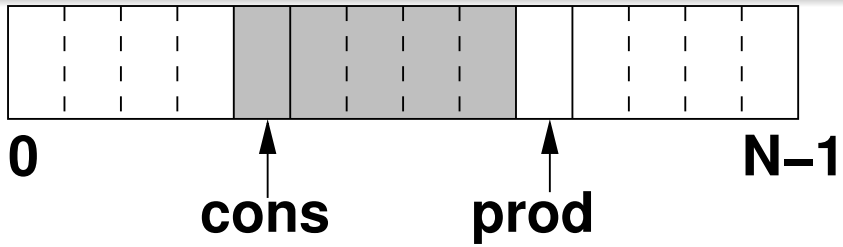
déposer(l)

```
vide.down()
{ pré : ∃ places libres }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     tampon[prod] ← l
     prod ← prod + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places occupées }
plein.up()
```

retirer(*l)

```
plein.down()
{ pré : ∃ places occupées }
   mutex.down()
   { pré : section critique }
     *l ← tampon[cons]
     cons ← cons + 1 mod N
   { post : fin SC }
   mutex.up()
{ post : ∃ places libres }
vide.up()
```

Sémaphores : mutex := 1, vide := N, plein := 0




```
        déposer(l)

vide.down()

   mutex.down()

     tampon[prod] ← l
     prod ← prod + 1 mod N

   mutex.up()

plein.up()
```

```
        retirer(*l)

plein.down()

   mutex.down()

     *l ← tampon[cons]
     cons ← cons + 1 mod N

   mutex.up()

vide.up()
```

Sémaphores : mutex := 1, vide := N, plein := 0

Plan

Sémaphore général à partir de verrous

Algorithme

```
Sg = ⟨cnt := ?,
      mutex := BinarySemaphore(true),
      accès := BinarySemaphore(cnt > 0)⟩ // verrous
Sg.down() =  Sg.accès.lock
             Sg.mutex.lock
             S.cnt ← S.cnt - 1
             si S.cnt ≥ 1 alors Sg.accès.unlock
             Sg.mutex.unlock
Sg.up() =  Sg.mutex.lock
           S.cnt ← S.cnt + 1
           si S.cnt = 1 alors Sg.accès.unlock
           Sg.mutex.unlock
```

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

Implantation d'un sémaphore

Gestion des activités fournissant :

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

Implantation

Sémaphore = ⟨ int nbjetons ;
File<Activité> bloquées ⟩

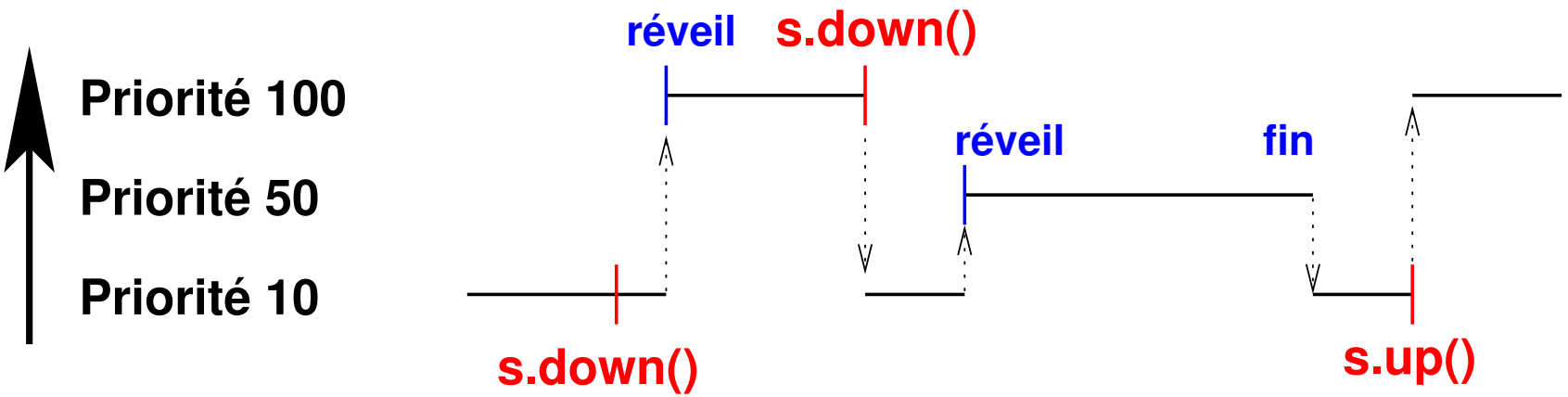
Algorithme

```
S.down() =   entrer en excl. mutuelle
             si S.nbjetons = 0 alors
                  insérer self dans S.bloquées
                  suspendre l'activité courante
             sinon
                  S.nbjetons ← S.nbjetons - 1
             finsi
             sortir d'excl. mutuelle
```

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

Sémaphores et priorités

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



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 absence de conflit
  - \+ Simple et facile à implanter
  - \+ Prédictible : la priorité est associée au sémaphore (= 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

Le concept de sémaphore est

- \+ simple
- \+ facile à comprendre
- \+ performant
- – délicat à l'usage
  → schémas génériques