

# Systèmes concurrents

Philippe Quéinnec

30 août 2019



## Neuvième partie

# Synchronisation non bloquante



# Plan

- 1 Objectifs et principes
- 2 Exemples
  - Splitter & renommage
  - Pile chaînée
  - Liste chaînée
- 3 Conclusion



## Limitation des verrous

- Interblocage : ensemble de processus se bloquant mutuellement
- Inversion de priorité : un processus de faible priorité bloque un processus plus prioritaire
- Convoi : une ensemble d'actions avance à la vitesse de la plus lente
- Interruption : quelles actions dans un gestionnaire de signal ?
- Arrêt involontaire d'un processus
- Tuer un processus ?
- Granularité des verrous → performance



# Objectifs de la synchronisation non bloquante

## Problème

Garantir la cohérence d'accès à un objet partagé **sans blocage**

- Résistance à l'arrêt (crash) d'une activité : une activité donnée n'est jamais empêchée de progresser, quel que soit le comportement des autres activités
- Vitesse de progression indépendante de celle des autres activités
- Passage à l'échelle
- Surcoût négligeable de synchronisation en absence de conflit (notion de *fast path*)
- Compatible avec la programmation événementielle (un gestionnaire d'interruption ne doit pas être bloqué par la synchronisation)



# Synchronisation non bloquante

## Non-blocking synchronization

**Obstruction-free** Si à tout point, une activité en isolation parvient à terminer en temps fini (en un nombre fini de pas).

**Lock-free** Synchronisation et protection garantissant la *progression du système* même si une activité s'arrête arbitrairement. Peut utiliser de l'attente active mais (par exemple) pas de verrous.  
Absence d'interblocage et d'inversion de priorité mais risque de famine individuelle (vivacité faible).

**Wait-free** Une sous-classe de lock-free où *toute activité* est certaine de compléter son action en temps fini, indépendamment du comportement des autres activités (arrêtées ou agressivement interférantes).  
Absence de famine individuelle (vivacité forte).

# Mécanismes matériels

## Mécanismes matériels utilisés

- Registres : protocoles permettant d'abstraire la gestion de la concurrence d'accès à la mémoire partagée (caches... ).
  - registres sûrs : toute lecture fournit une valeur écrite ou en cours d'écriture
  - registres réguliers : toute lecture fournit la dernière valeur écrite ou une valeur en cours d'écriture
  - registres atomiques : toute lecture fournit la dernière valeur écrite
- Instructions processeur atomiques combinant lecture(s) et écriture(s) (exemple : test-and-set)



# Principes généraux

## Principes

- Chaque activité travaille à partir d'une **copie locale** de l'objet partagé
- Un conflit est détecté lorsque la copie diffère de l'original
- **Boucle active** en cas de conflit d'accès non résolu  
→ limiter le plus possible la zone de conflit
- **Entraide** : si un conflit est détecté, une activité peut exécuter des opérations pour le compte d'une autre activité





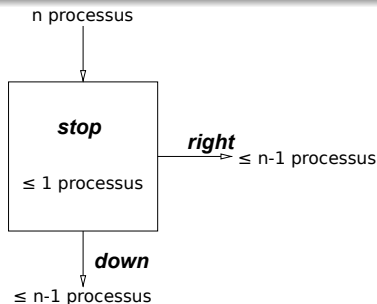
# Plan

- 1 Objectifs et principes
- 2 **Exemples**
  - Splitter & renommage
  - Pile chaînée
  - Liste chaînée
- 3 Conclusion



# Splitter

Moir, Anderson 1995



- $x$  (indéterminé) activités appellent concurremment (ou pas) le splitter
- au plus une activité termine avec *stop*
- si  $x = 1$ , l'activité termine avec *stop*
- au plus  $(x - 1)$  activités terminent avec *right*
- au plus  $(x - 1)$  activités terminent avec *down*

# Splitter

## « Registres »

- Lectures et écritures atomiques
- Pas d'interférence due aux caches en multiprocesseur

## Implantation non bloquante

Deux « registres » partagés : X (init  $\forall$ ) et Y (init faux)

Chaque activité a un identifiant unique  $id_i$  et un résultat  $dir_i$ .

**function** direction ( $id_i$ )

X :=  $id_i$ ;

**if** Y **then**  $dir_i := \text{right}$ ;

**else** Y := true;

**if** (X =  $id_i$ ) **then**  $dir_i := \text{stop}$ ;

**else**  $dir_i := \text{down}$ ;

**end if**

**end if**

**return**  $dir_i$ ;

## Schéma de preuve

**Validité** les seules valeurs retournées sont **right**, **stop** et **down**.

**Vivacité** ni boucle ni blocage

**stop** si  $x = 1$  évident (une seule activité exécute *direction()*)

au plus  $x - 1$  **right** les activités obtenant **right** trouvent  $Y$ , qui a nécessairement été positionné par une activité obtenant **down** ou **stop**

au plus  $x - 1$  **down** soit  $p_i$  la dernière activité ayant écrit  $X$ . Si  $p_i$  trouve  $Y$ , elle obtiendra **right**. Sinon son test  $X = id_i$  lui fera obtenir **stop**.

au plus 1 **stop** soit  $p_i$  la *première* activité trouvant  $X = id_i$ . Alors aucune activité n'a modifié  $X$  depuis que  $p_i$  l'a fait. Donc toutes les activités suivantes trouveront  $Y$  et obtiendront **right** (car  $p_i$  a positionné  $Y$ ), et les activités en cours qui n'ont pas trouvé  $Y$  ont vu leur écriture de  $X$  écrasée par  $p_i$  (puisqu'elle n'a pas changé jusqu'au test par  $p_i$ ). Elles ne pourront donc trouver  $X$  égal à leur identifiant et obtiendront donc **down**.

## Renommage

- Soit  $n$  activités d'identité  $id_1, \dots, id_n \in [0..N]$  où  $N \gg n$
- On souhaite renommer les activités pour qu'elles aient une identité prise dans  $[0..M]$  où  $M \ll N$
- Deux activités ne doivent pas avoir la même identité

### Solution à base de verrous

- Distributeur de numéro accédé en exclusion mutuelle
- $M = n$
- Complexité temporelle :  $O(1)$  pour un numéro,  $O(n)$  pour tous
- Une activité lente ralentit les autres

### Solution non bloquante

- Grille de splitters
- $M = \frac{n(n+1)}{2}$
- Complexité temporelle :  $O(n)$  pour un numéro,  $O(n)$  pour tous

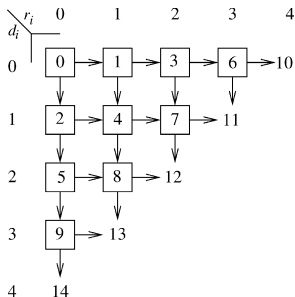
# Grille de splitters

Étiquettes uniques : un splitter renvoie **stop** à une activité au plus

Vivacité : traversée d'un nombre fini de splitters, chaque splitter est non bloquant

Toute activité obtient une étiquette :

- **stop** si  $x = 1$ ,
- un splitter ne peut orienter toutes les activités dans la même direction,
- les bords de la grille sont à distance  $n - 1$  de l'origine.



# Renommage non bloquant

```
get_name( $id_i$ )
```

```
 $d_i \leftarrow 0$ ;  $r_i \leftarrow 0$ ;  $term_i \leftarrow false$ ;
```

```
while ( $\neg term_i$ ) do
```

```
     $X[d_i, r_i] \leftarrow id_i$ ;
```

```
    if  $Y[d_i, r_i]$  then  $r_i \leftarrow r_i + 1$ ; % right
```

```
    else  $Y[d_i, r_i] \leftarrow true$ ;
```

```
        if ( $X[d_i, r_i] = id_i$ ) then  $term_i \leftarrow true$ ; % stop
```

```
        else  $d_i \leftarrow d_i + 1$ ; % down
```

```
        endif
```

```
    endif
```

```
endwhile
```

```
return  $\frac{1}{2}(r_i + d_i)(r_i + d_i + 1) + d_i$ 
```

```
    % le nom en position  $d_i, r_i$  de la grille
```

# Pile chaînée basique

## Objet avec opérations push et pop

```
class Stack<T> {  
    class Node<T> { Node<T> next; T item; }  
  
    Node<T> top;  
  
    public void push(T item) {  
        Node<T> newTop  
            = new Node<>(item);  
        Node<T> oldTop = top;  
        newTop.next = oldTop;  
        top = newTop;  
    }  
}  
  
    public T pop() {  
        Node<T> oldTop = top;  
        if (oldTop == null)  
            return null;  
        top = oldTop.next;  
        return oldTop.item;  
    }  
}
```



# Synchronisation classique

Conflit push/push, pop/pop, push/pop  $\Rightarrow$  exclusion mutuelle

```
public void push(T item) {  
    verrou.lock();  
    Node<T> newTop  
        = new Node<>(item);  
    Node<T> oldTop = top;  
    newTop.next = oldTop;  
    top = newTop;  
    verrou.unlock();  
}
```

```
public T pop() {  
    verrou.lock();  
    try {  
        Node<T> oldTop = top;  
        if (oldTop == null)  
            return null;  
        top = oldTop.next;  
        return oldTop.item;  
    } finally {  
        verrou.unlock();  
    }  
}
```

- Bloquant définitivement si une activité s'arrête en plein milieu
- Toutes les activités sont ralenties par un unique lent



# Compare-and-set

## Hypothèses

- Lectures et écritures atomiques (« registres »), sans interférence due aux caches en multiprocesseur  
→ `java.util.concurrent.atomic.AtomicReference`
- Une instruction atomique évoluée : `compareAndSet`

## `compareAndSet`

```
boolean CAS(*add, old, new) {  
    atomically {  
        if (*add == old) {  
            *add = new;  
            return true;  
        } else {  
            return false;  
        }  
    }  
}
```

# Push/pop lock free

```
class Stack<T> {  
    class Node<T> { Node<T> next; T item; }  
    AtomicReference<Node<T>> top = new AtomicReference<>();  
    public void push(T item) {  
        Node<T> oldTop, newTop = new Node<>();  
        newTop.item = item;  
        do {  
            oldTop = top.get();  
            newTop.next = oldTop;  
        } while (! top.compareAndSet(oldTop, newTop));  
    }  
    public T pop() {  
        Node<T> oldTop, newTop;  
        do {  
            oldTop = top.get();  
            if (oldTop == null)  
                return null;  
            newTop = oldTop.next;  
        } while (! top.compareAndSet(oldTop, newTop));  
        return oldTop.item;  
    }  
}
```

# File basique

```
class Node<T> { Node<T> next; T item; }

class File<T> {
  Node<T> head, queue;
  File () { // noeud bidon en tête
    head = queue = new Node<T>();
  }

  void enqueue (T item) {
    Node<T> n = new Node<T>();
    n.item = item;
    queue.next = n;
    queue = n;
  }

  T dequeue () {
    T res = null;
    if (head != queue) {
      head = head.next;
      res = head.item;
    }
    return res;
  }
}
```

# Synchronisation classique

Conflit enfiler/enfiler, retirer/retirer, enfiler/retirer  
⇒ tout en exclusion mutuelle

```
void enqueue (T item) {  
    Node<T> n = new Node<T>();  
    n.item = item;  
    verrou.lock ();  
    queue.next = n;  
    queue = n;  
    verrou.unlock ();  
}
```

```
T dequeue () {  
    T res = null;  
    verrou.lock ();  
    if (head != queue) {  
        head = head.next;  
        res = head.item;  
    }  
    verrou.unlock ();  
    return res;  
}
```

- Bloquant définitivement si une activité s'arrête en plein milieu
- Toutes les activités sont ralenties par un unique lent
- Compétition systématique enfiler/défiler

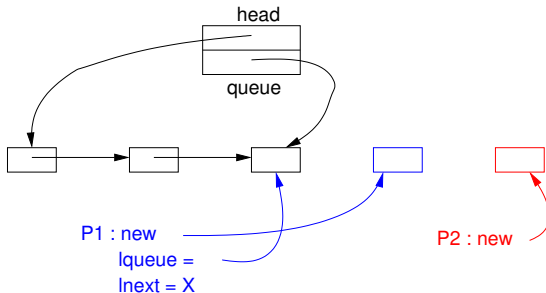


# Enfiler non bloquant

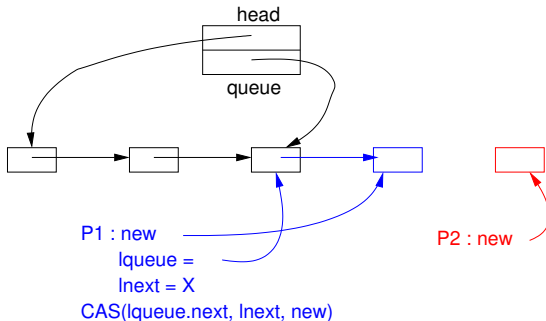
## Enfiler non bloquant

```
Node<T> n = new Node<T>;  
n.item = item;  
do {  
    Node<T> lqueue = queue;  
    Node<T> lnext = lqueue.next;  
    if (lqueue == queue) { // lqueue et lnext cohérents ?  
        if (lnext == null) { // queue vraiment dernier ?  
            if CAS(lqueue.next, lnext, n) // essai lien nouveau noeud  
                break; // succès !  
        } else { // queue n'était pas le dernier noeud  
            CAS(queue, lqueue, lnext); // essai mise à jour queue  
        }  
    }  
} while (1);  
CAS(queue, lqueue, n); // insertion réussie, essai m. à j. queue
```

## Exemple : deux enfiler concurrents

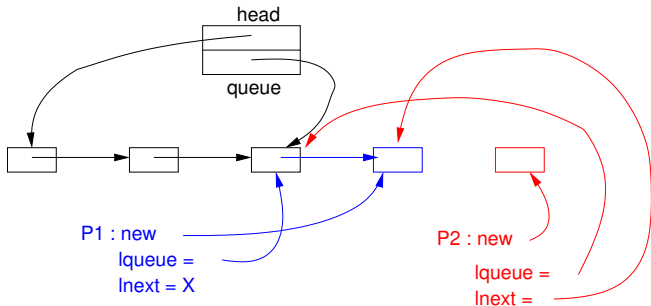


## Exemple : deux enfileur concurrents

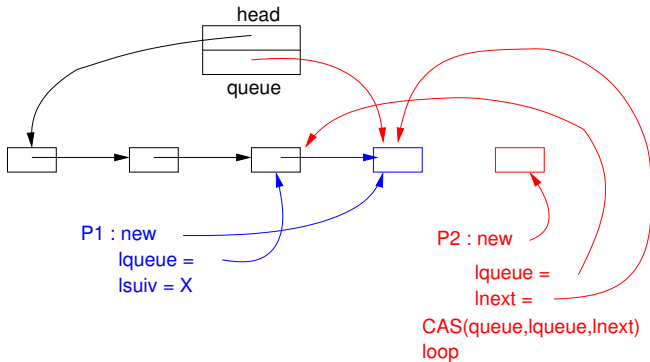




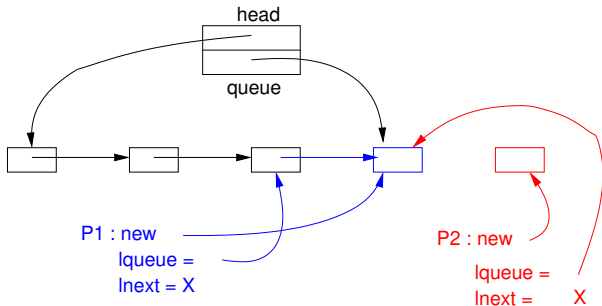
## Exemple : deux enfiler concurrents



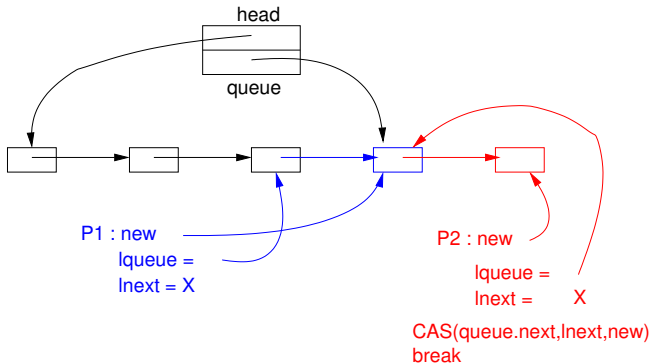
## Exemple : deux enfiler concurrents



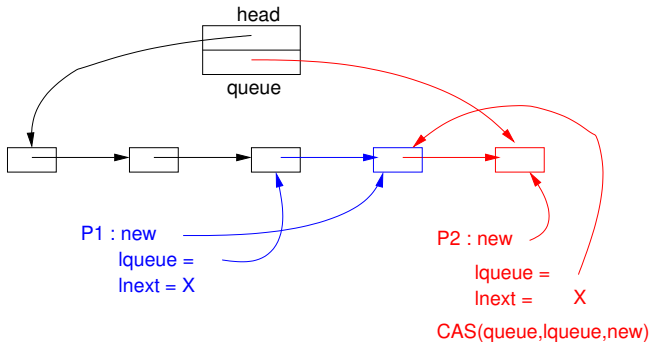
## Exemple : deux enfiler concurrents



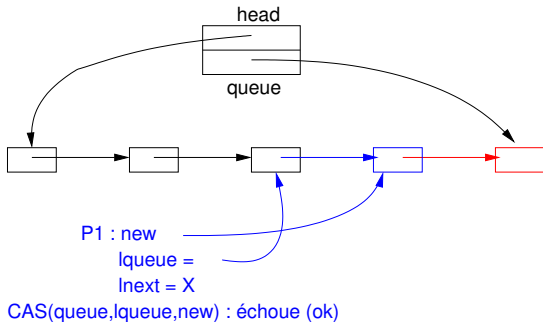
## Exemple : deux enfiler concurrents



## Exemple : deux enfileur concurrents



## Exemple : deux enfiler concurrents

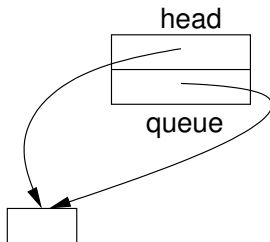


## Défiler non bloquant

```
do {  
    Node<T> lhead = head;  
    Node<T> lqueue = queue;  
    Node<T> lnext = lhead.next;  
    if (lhead == head) { // lqueue, lhead, lnext cohérents ?  
        if (lhead == lqueue) { // file vide ou queue à la traîne ?  
            if (lnext == null)  
                return null; // file vide  
            CAS(queue, lqueue, lnext); // essai mise à jour queue  
        } else { // file non vide, prenons la tête  
            res = lnext.item;  
            if CAS(head, lhead, lnext) // essai mise à jour tête  
                break; // succès !  
        }  
    }  
} while (1); // sinon (queue ou tête à la traîne) on recommence  
return res;
```

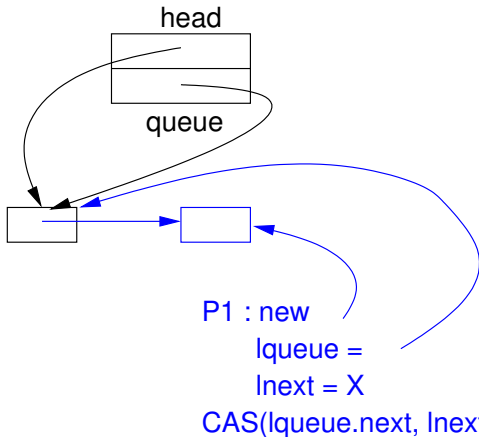
27

## Exemple : défiler et enfiler concurrents

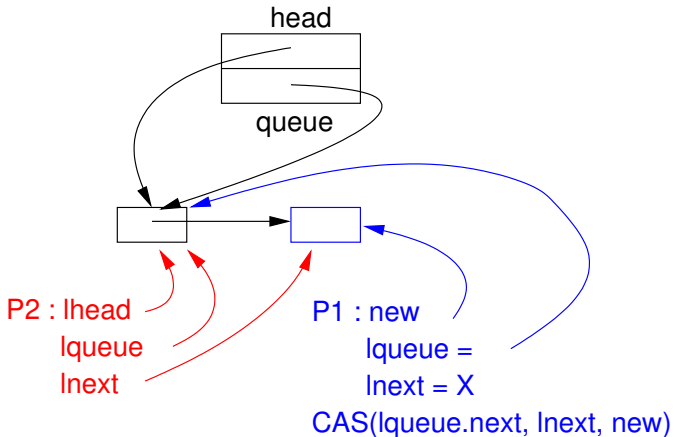




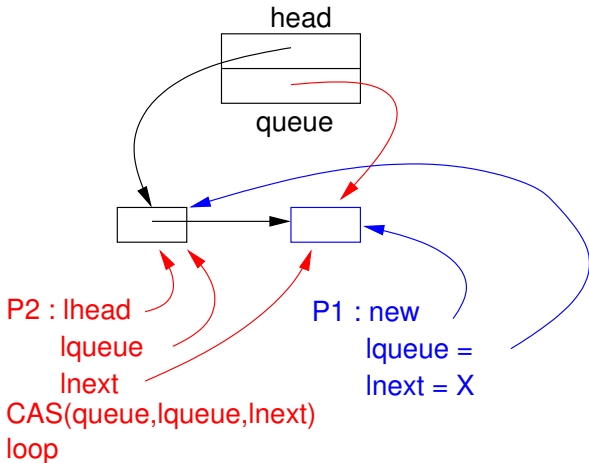
## Exemple : défiler et enfiler concurrents



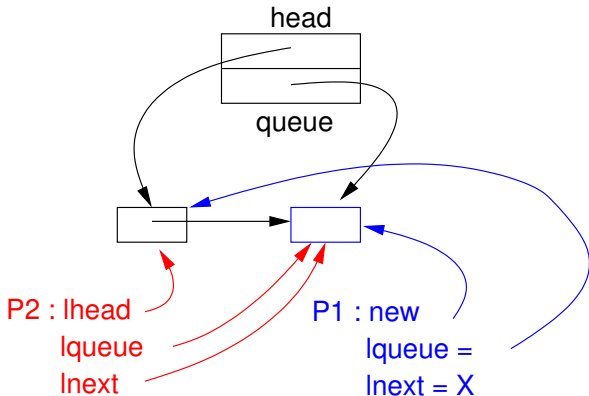
## Exemple : défiler et enfiler concurrents



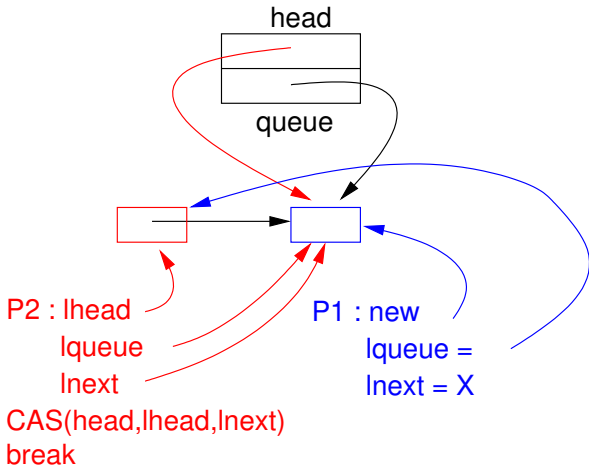
## Exemple : défiler et enfiler concurrents



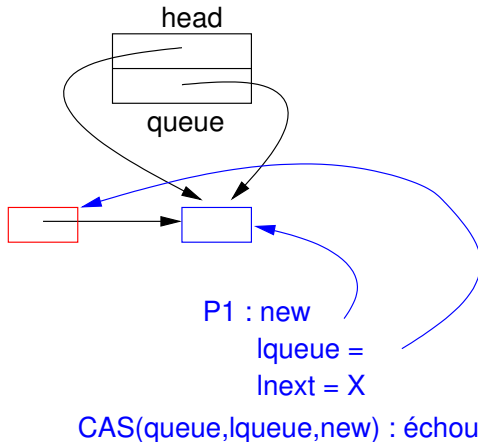
## Exemple : défiler et enfiler concurrents



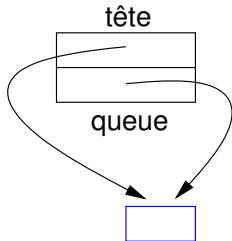
## Exemple : défiler et enfiler concurrents



## Exemple : défiler et enfiler concurrents



## Exemple : défiler et enfiler concurrents



## Problème A-B-A

- L'algorithme précédent n'est correct qu'en absence de recyclage des cellules libérées par défiler
- Problème A-B-A :
  - 1  $A_1$  lit  $x$  et obtient  $a$
  - 2  $A_2$  change  $x$  en  $b$  et libère  $a$
  - 3  $A_3$  demande un objet libre et obtient  $a$
  - 4  $A_3$  change  $x$  en  $a$
  - 5  $A_1$  effectue  $\text{CAS}(x, a, \dots)$ , qui réussit et lui laisse croire que  $x$  n'a pas changé depuis sa lecture





## Solutions au problème A-B-A

- Compteur de générations, incrémenté à chaque modification  
 $\langle a, \text{gen } i \rangle \neq \langle a, \text{gen } i + 2 \rangle$   
Nécessite un `CAS2(x, a, gen, i, ...)`  
(`java.util.concurrent.atomic.AtomicStampedReference`)
- Instructions load-link / store-conditional (LL/SC) :
  - Load-link renvoie la valeur courante d'une case mémoire
  - Store-conditional écrit une nouvelle valeur à condition que la case mémoire n'a pas été écrite depuis le dernier load-link.
  - (les implantations matérielles imposent souvent des raisons supplémentaires d'échec de SC : imbrication de LL, écriture sur la ligne de cache voire écriture quelconque...)
- Ramasse-miette découplé : retarder la réutilisation d'une cellule (*Hazard pointers*). L'allocation/libération devient alors le facteur limitant de l'algorithme.



# Plan

- 1 Objectifs et principes
- 2 Exemples
  - Splitter & renommage
  - Pile chaînée
  - Liste chaînée
- 3 Conclusion



# Conclusion

- + performant, même avec beaucoup d'activités
- + résistant
- structure de données ad-hoc
- implantation fragile, peu réutilisable, **pas extensible**
- implantation très **complexe**, à réserver aux experts
- implantation liée à une architecture matérielle
- nécessité de **prouver** la correction

+ bibliothèques spécialisées

```
java.util.concurrent.ConcurrentLinkedQueue
```

```
j.u.concurrent.atomic.AtomicReference.compareAndSet
```

```
j.u.concurrent.atomic.AtomicInteger
```

