Structures non bloquantes

Gaël Thomas
gael.thomas@lip6.fr
Basé sur le cours de Herlihy & Shavit

Université Pierre et Marie Curie
Master Informatique
M2 – Spécialité SAR

Limite à l'accélération

Limite : la loi d'Amdahl

p : pourcentage du code exécutable en parallèle
⇒ (1 – p) : pourcentage du code exécuté en séquentiel
⇒ p/n : exécution du code parallèle sur n cœurs
⇒ **a = 1/(1 – p + p/n)** : accélération maximale théorique
⇒ limite pour n → ∞ : a → 1/(1 – p)

Application numérique :
p = 0,25 ⇒ a → 1/0,75 = 4 quand n → ∞ (3,7 à 32 cœurs)
p = 0,95 ⇒ a → 1/0,95 = 20 quand n → ∞ (12,55 à 32 cœurs, 17,42 à 128 cœurs)

⇒ ça vaut le coup de se battre pour paralléliser les quelques pourcents restants!

Solution naturelle

Construire des algorithmes qui ne bloquent pas (du plus fort au plus faible) :

- ✓ **Wait-free** : toute opération se termine en un nombre fini de pas
  (i.e., pas de bloquage d'un thread, pas de famine)
- ✓ **Lock-free** : si les opérations sont appelées infiniment souvent, elles se terminent infiniment souvent
  (pas de blocage du programme, même si certains threads ne sont jamais élus)
- ✓ **Obstruction-free** : tout thread s'exécutant seul termine son opération en un nombre fini de pas
  (impliqué par lock-free, choisir de ne laisser qu'un thread tourner et appeler infiniment souvent une opération)

Algorithme à verrou : pas obstruction free (si verrou pris, bloque les autres threads)

Structures non bloquantes

Les outils : les instructions atomique

Instructions atomiques

- ✓ Atomic add : addition atomique en mémoire

```
old-value ⟵ atomic-add(variable, value)
```

- ✓ Atomic swap : écrit une valeur en mémoire et renvoie son ancienne valeur

```
old-value ⟵ atomic-swap(variable, value)
```

- ✓ Atomic compare and swap (CAS) : compare avant de faire un swap

```
old-value ⟵ atomic-CAS(variable, old, new)
```

```
if(variable == old) {
  variable = new;
  return old;
} else
  return value;
```


Les outils : les modèles mémoire

Modèle mémoire : définit les ordonnancements possible des accès mémoire

Principe commun à tous les modèles mémoire (utile!)

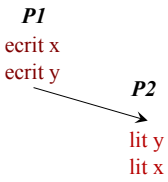
- ✓ En locale, toute lecture succédant à une écriture lit la dernière valeur écrite

```
write x, value
read x -> lit la valeur value
```

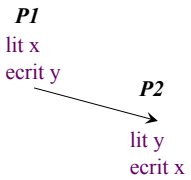

Les outils : le modèle mémoire du pentium

Le Total Store Order (TSO)

- ✓ Les lectures ne sont jamais réordonnancées entre elles
- ✓ Les écritures ne sont jamais réordonnancées entre elles
- ✓ Une écriture après une lecture n'est pas réordonnancée
- ✓ Une lecture après une écriture peut être réordonnancée si il s'agit de deux cases mémoire distinctes



Lectures non réordonnancées et écritures non réordonnancées
Lit forcément la valeur x écrite

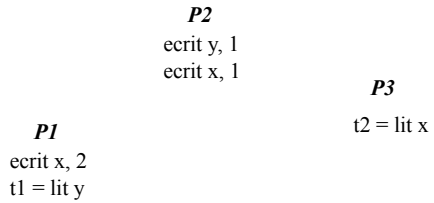


Écriture après lecture
Impossible de lire la valeur x écrite à la fin

Les outils : le modèle mémoire du pentium

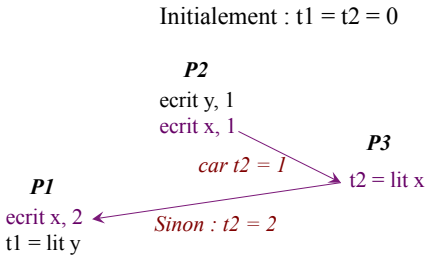
Attention à la lecture après écriture sur deux cases distinctes en TSO

Initialement : t1 = t2 = 0



Les outils : le modèle mémoire du pentium

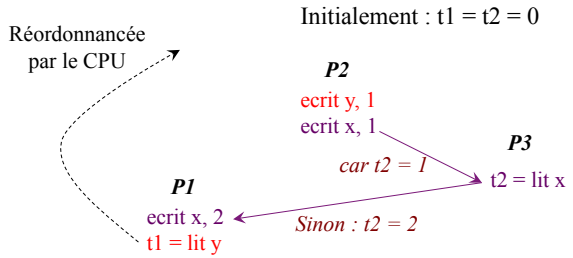
Attention à la lecture après écriture sur deux cases distinctes en TSO



Sortie autorisée : **t2 = 1**

Les outils : le modèle mémoire du pentium

Attention à la lecture après écriture sur deux cases distinctes en TSO



Sortie autorisée : **t1 = 0**, **t2 = 1**

Instructions atomiques du pentium

Instructions atomiques

- ✓ Atomic add : addition atomique en mémoire

```
old-value ⟵ atomic-add(variable, value)
assembleur : lock xadd
```

- ✓ Atomic swap : écrit une valeur en mémoire et renvoie son ancienne valeur

```
old-value ⟵ atomic-swap(variable, value)
assembleur : xchg (génère un lock assembleur)
```

- ✓ Atomic compare and swap (CAS) : compare avant de faire un swap

```
old-value ⟵ atomic-CAS(variable, old, new)
assembleur : lock cmpxchg
```


Les outils : le modèle mémoire du pentium

Deux instructions particulières

- ✓ La barrière mémoire (mfence) : toutes les lectures et écritures précédentes sont visibles

  Pour éviter un ré-ordonnancement d'une lecture après écriture, mettre un mfence

  ☞ Exécute toutes les écritures en attente

  ☞Exécute toutes les lectures attente

  ⇒ vide le buffer des écritures et des lectures en attente

- ✓ Le lock (préfixe d'instruction) : un mfence + visibilité immédiate de l'écriture de l'instruction préfixée

Les outils : le modèle mémoire du C

Pas de modèle mémoire avant C11

Instructions atomiques de gcc

- ✓ Atomic add : addition atomique en mémoire
  `old-value ⟵ atomic-add(variable, value)`
  `gcc : __sync_fetch_and_add`
- ✓ Atomic swap : écrit une valeur en mémoire et renvoie son ancienne valeur
  `old-value ⟵ atomic-swap(variable, value)`
  `gcc : __sync_lock_test_and_set` (vraiment bizarre!)
- ✓ Atomic compare and swap (CAS) : compare avant de faire un swap
  `old-value ⟵ atomic-CAS(variable, old, new)`
  `gcc : __sync_val_compare_and_swap`
- ✓ Barrière mémoire
  `__sync_synchronize()`

Le modèle mémoire Java

Modèle mémoire défini depuis Java 5

Tout réordonnancement possible sauf

- ✓ Variable volatile : barrière mémoire à chaque accès (équivalent lock)
- ✓ Entrée et sortie de section critique : barrière mémoire (équivalent lock)

Le modèle mémoire Java

Piège classique : éviter la prise de verrou lors d'une initialisation

```
if(!inited) {
  synchronize(obj) {
    if(!inited) {
      bidule = new Bidule();
      inited = true;
    }
  }
}
```

⇒ peut voir inited = true alors que bidule n'a pas été initialisé

Solution : marquer inited comme variable volatile

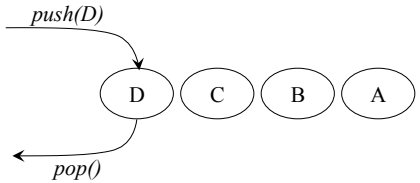
Remarque : impossible en TSO, sauf si le compilateur optimise le code…

Structures non bloquantes

Le b.a.-ba : la pile

Deux opérations en mode LIFO

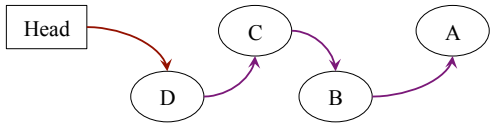
- ✓ push(Element e) : empile un élément
- ✓ Element pop() : dépile un élément



La pile avec verrou

```
Class Stack {
  Node     head;
}
```

```
Class Node {
  Node     next
  Element element;
}
```



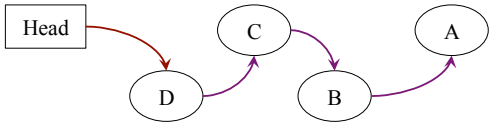
La pile avec verrou

```
Class Stack {
  Node     head;
}
```

```
Class Node {
  Node     next
  Element element;
}
```

```
sychronized void Stack.push(Element element) {
  Node n = new Node(head, element);
  head = n;
}
```

```
synchronized Element pop() {
  Node n = head;
  head = n.next;
  return n.element;
}
```

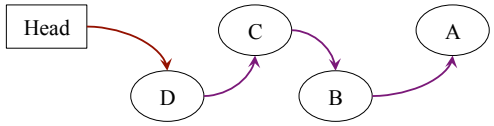


La pile sans verrou (Scott 91)

```
Class Stack {
  Node     head;
}
```

```
Class Node {
  Node     next
  Element element;
}
```

Principe : atomic-cas sur la tête

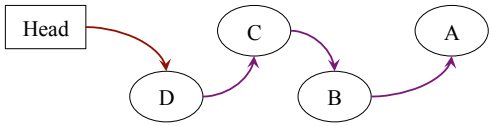


La pile sans verrou (Scott 91)

```
Class Stack {
  Node    head;
}

Class Node {
  Node    next
  Element element;
}

void Stack.push(Element element) {
  do {
    Node n = new Node(head, element);
  } while(atomic-cas(&head, n.next, n) != n.next);
}
```



La pile sans verrou (Scott 91)

```
Class Stack {
  Node    head;
}

Class Node {
  Node    next
  Element element;
}

void Stack.push(Element element) {
  do {
    Node n = new Node(head, element);
  } while(atomic-cas(&head, n.next, n) != n.next);
}

Element Stack.pop() {
  do {
    Node n = head;
  } while(atomic-cas(&head, n, n.next) != n);
  return n.element;
}
```


La pile sans verrou (Scott 91)

Obstruction-free : quelque soit l'instant, si on interrompt les threads sauf un, dans le pire cas, deux tours de boucle pour le thread qui tourne

Lock-free: si les threads appellent infiniment souvent push ou pop, elles seront exécutées infiniment souvent (preuve : il faut réussir pop ou push pour bloquer un pop ou push)

Pas wait-free : un push peut être retardé indéfiniment par d'autres push.

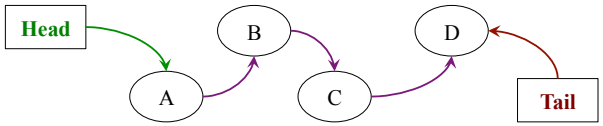
```
void Stack.push(Element element) {
  do {
    Node n = new Node(head, element);
  } while(atomic-cas(&head, n.next, n) != n);
}
Element Stack.pop() {
  do {
    Node n = head;
    if(n == null) error("No such element");
  } while(atomic-cas(&head, n, n.next) != n);
  return n.element;
}
```


Structures non bloquantes

La queue

Deux opérations :

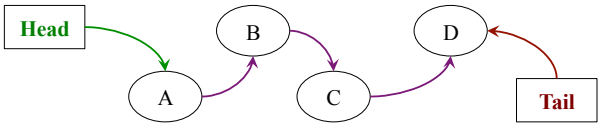
- ✓ void enqueue(Element e) : ajoute l'élément en queue
- ✓ Element dequeue() : dépile l'élément en tête



La queue avec verrou

```
Class Queue {
  Node    head = null;
  Node    tail = null;
}
```

```
Class Node {
  Node    next;
  Element element;
}
```

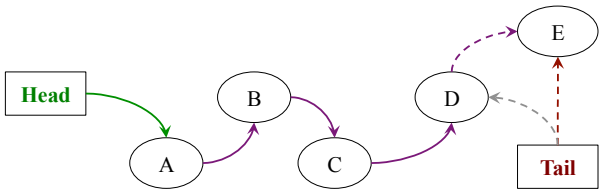


La queue avec verrou

```
Class Queue {
  Node    head = null;
  Node    tail = null;
}
```

```
Class Node {
  Node    next;
  Element element;
}
```

```
synchronized void Queue.enqueue(Element e) {
  Node n = new Node(null, e);
  if(tail != null) { tail.next = n; }
  else { head = n; }
  tail = n;
}
```

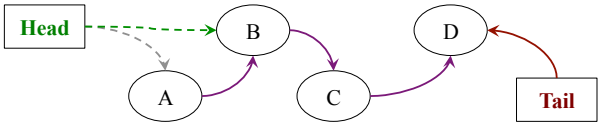


La queue avec verrou

```
Class Queue {
  Node    head = null;
  Node    tail = null;
}
```

```
Class Node {
  Node    next;
  Element element;
}
```

```
synchronized Element Queue.dequeue() {
  Node n = head;
  head = n.next;
  if(head == null) tail = null;
  return n.element;
}
```



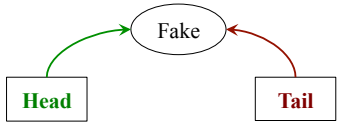
La queue sans verrou

```
Class Queue {
  Node     head = new Node(null, null);
  Node     tail = head;
}
```

```
Class Node {
  Node     next;
  Element element;
}
```

Principes :

- ✓ Un faux nœud pour gérer le cas où la liste est vide
- ✓ Tail mis à jour de façon paresseuse
- ✓ A chaque instant :
  - ☞ Le premier nœud (si il existe) est en seconde position
  - ☞ Les listes tail et head se rejoignent
  - ☞ Le dernier nœud de ces listes est le nœud en queue

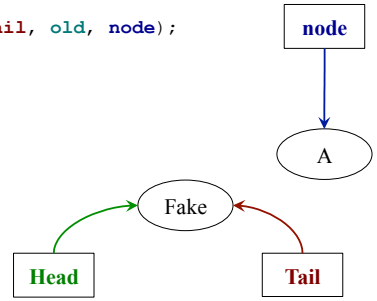


La queue sans verrou

Insertion de A en l'absence de concurrence

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

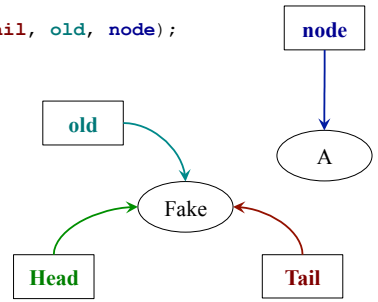


La queue sans verrou

Insertion de A en l'absence de concurrence

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

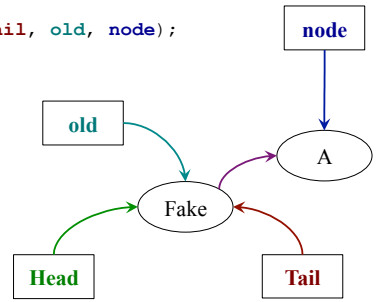


La queue sans verrou

Insertion de A en l'absence de concurrence

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

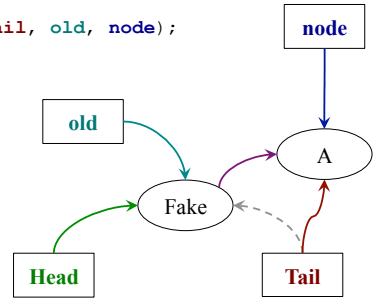


La queue sans verrou

Insertion de A en l'absence de concurrence

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

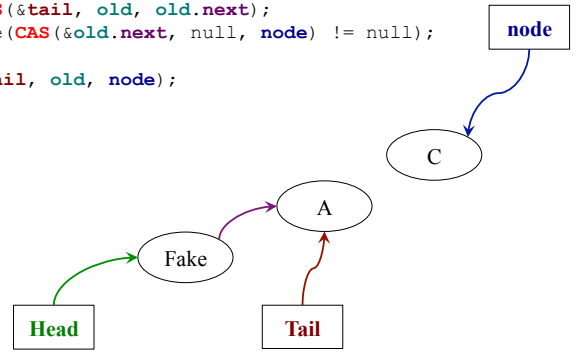


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

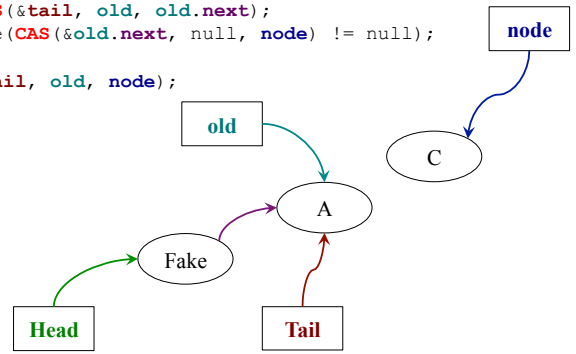


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

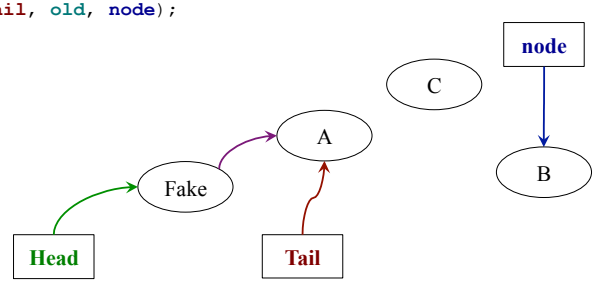


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

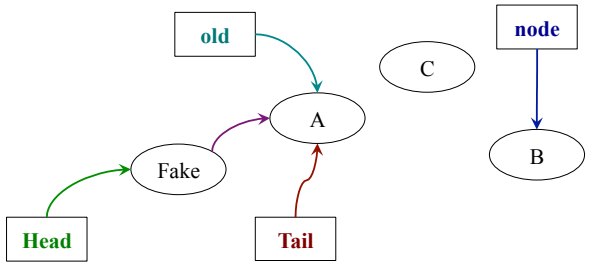


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

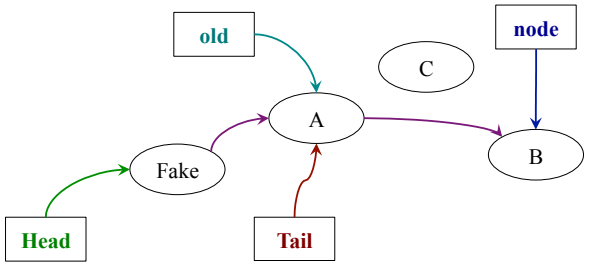


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

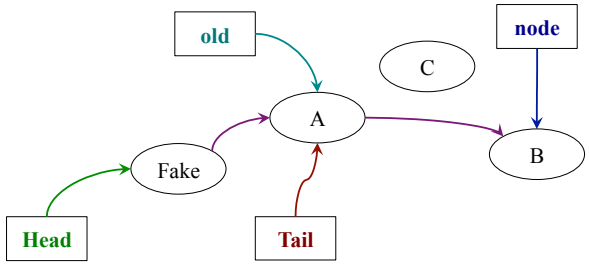


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

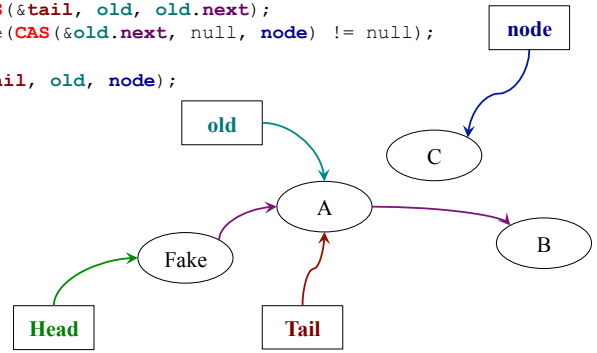


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```



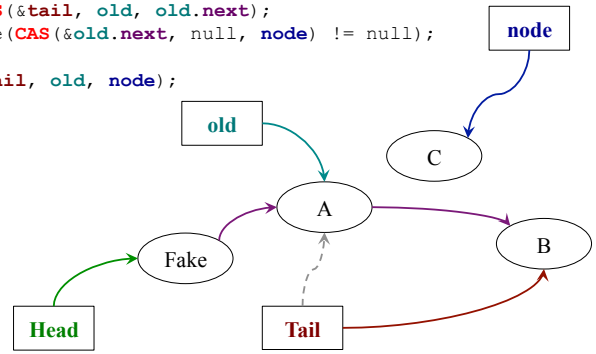
La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

C pend en charge l'avancement de tail pour B

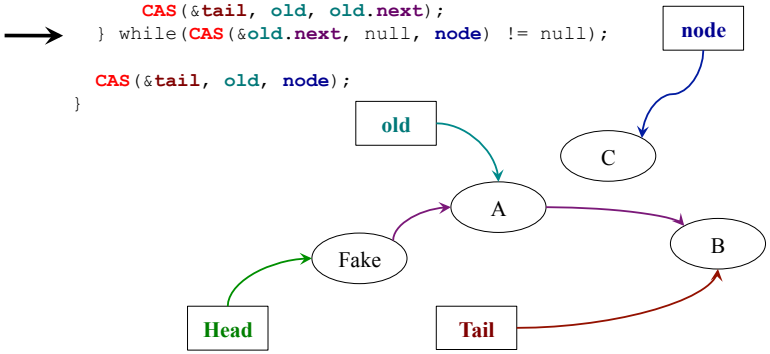


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

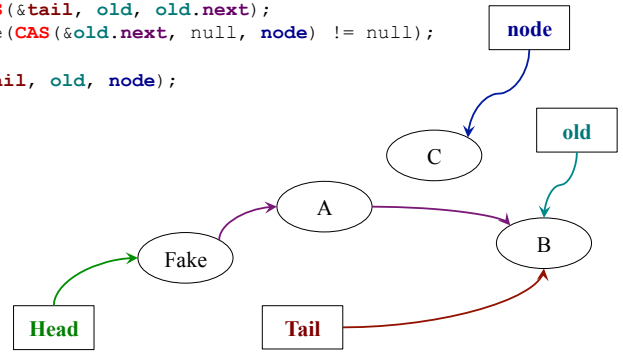


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

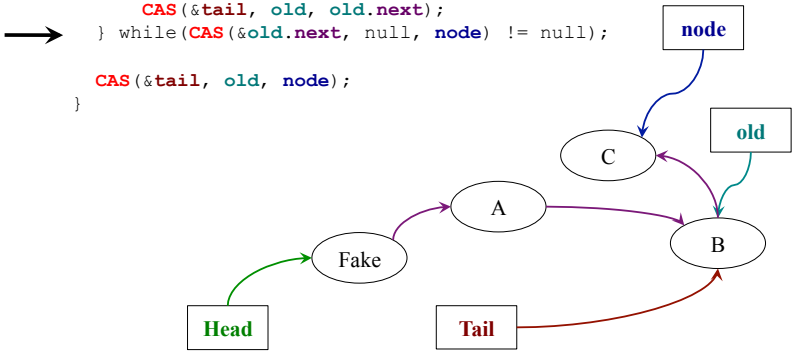


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

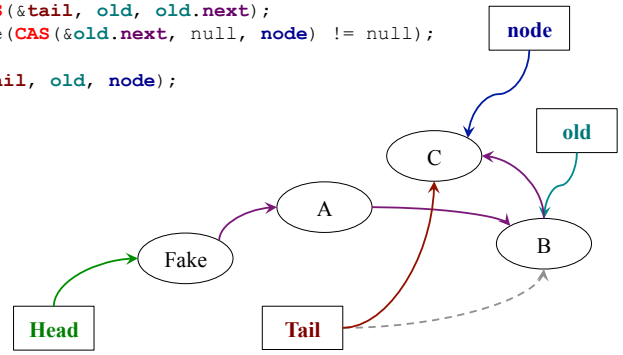


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

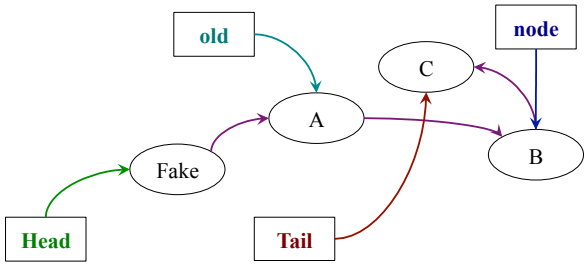


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

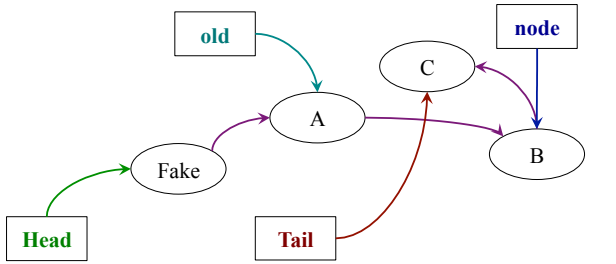


La queue sans verrou

Insertion de C avec concurrence pendant l'insertion de B

```
void Queue.enqueue(Element e) {
  Node node = new Node(null, e);
  do {
    Node old = tail;
    while(old.next != NULL)
      CAS(&tail, old, old.next);
  } while(CAS(&old.next, null, node) != null);

  CAS(&tail, old, node);
}
```

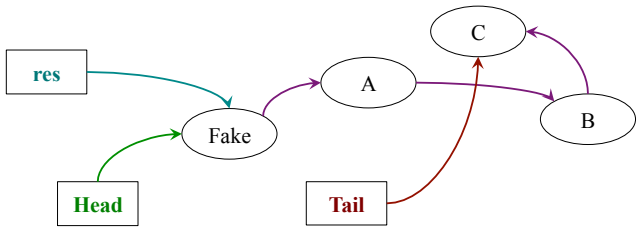


La queue sans verrou

Suppression de la tête sans concurrence

```
Element Queue.dequeue() {
  do {
    Node res = head;
    if(res.next == null) error("No such element");
  } while(CAS(&head, res, res.next) != res);

  return res.next.value;
}
```

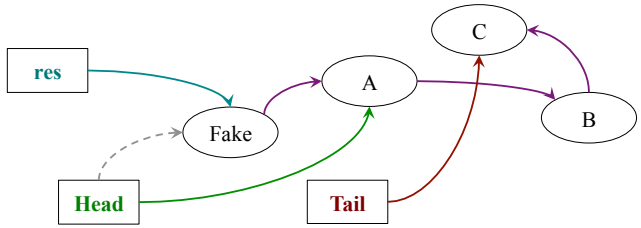


La queue sans verrou

Suppression de la tête sans concurrence

```
Element Queue.dequeue() {
  do {
    Node res = head;
    if(res.next == null) error("No such element");
  } while(CAS(&head, res, res.next) != res);

  return res.next.value;
}
```

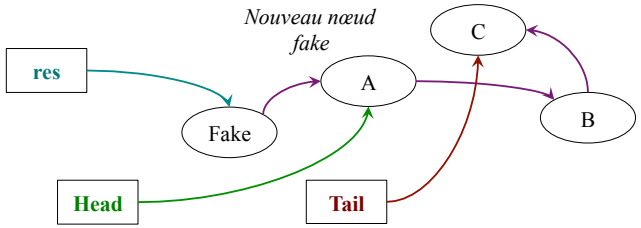


La queue sans verrou

Suppression de la tête sans concurrence

```
Element Queue.dequeue() {
  do {
    Node res = head;
    if(res.next == null) error("No such element");
  } while(CAS(&head, res, res.next) != res);

  return res.next.value;
}
```



La queue sans verrou

Obstruction-free : si un seul thread élu, finira par réussir à faire son enqueue ou dequeue

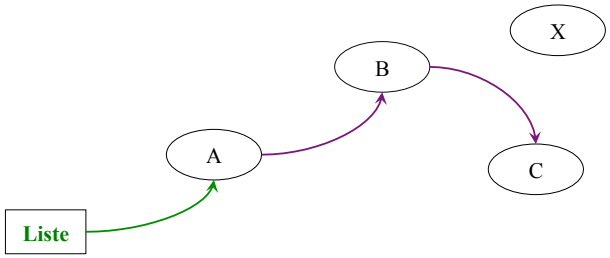
Lock-free: si les threads appellent infiniment souvent enqueue ou dequeue, au moins un passera de temps en temps (preuve : pour faire tourner un thread dans enqueue ou dequeue, il faut qu'il y ait des enqueue et dequeue qui terminent)

Pas wait-free : on peut faire tourner indéfiniment un thread dans une des boucles

Structures non bloquantes

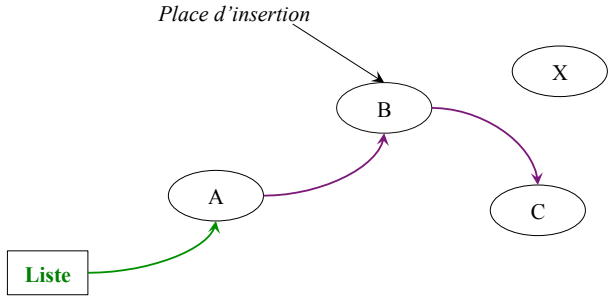
La liste chaînée

Le grand problème : insertion et suppression au même endroit



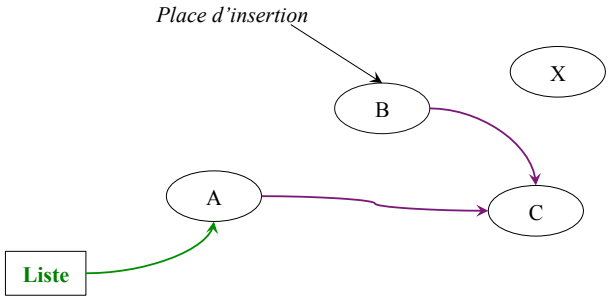
La liste chaînée

Le grand problème : insertion et suppression au même endroit



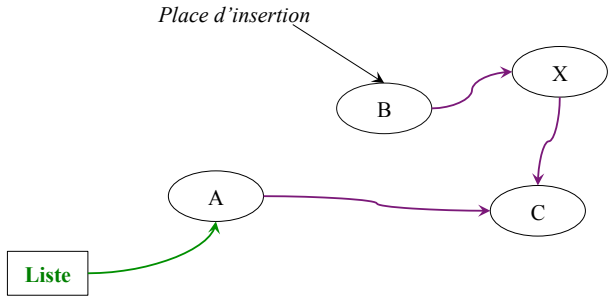
La liste chaînée

Le grand problème : insertion et suppression au même endroit



La liste chaînée

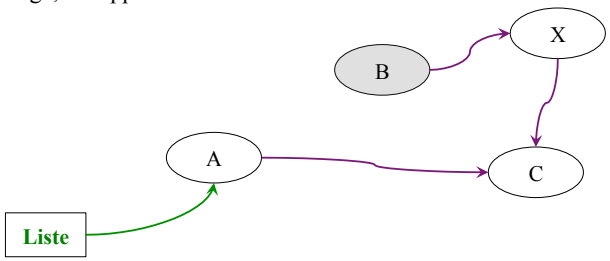
Le grand problème : insertion et suppression au même endroit



La liste chaînée

Principe de solution (Tim Harris, DISC 2001)

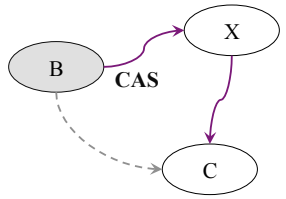
- ✓ Changer la couleur d'un nœud qui va être supprimé
- ✓ Si pendant le parcours ou pendant l'insertion la couleur du nœud d'insertion change, le supprimer et recommencer au début



La liste chaînée

Principe de solution (Tim Harris, DISC 2001)

- ✓ Changer la couleur d'un nœud qui va être supprimé
- ✓ Si pendant le parcours ou pendant l'insertion la couleur du nœud d'insertion change, le supprimer et recommencer au début



Problème :

- ✓ Lors de l'insertion, on ne peut faire qu'un CAS sur un next

Solution :

- ✓ Utiliser le bit de poids faible pour stocker la couleur dans le pointeur

La liste chaînée

```
typedef uintptr_t coloredPointer;

Node pointer(coloredPointer ptr) { return (Node)(ptr & -2); }
int mark(coloredPointer ptr) { return ptr & 1; }
```

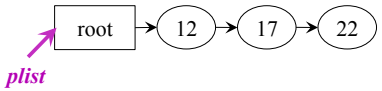
```
Class Node {
  coloredPointer next;
  Element        element;
};
```

Idée : avant de supprimer un nœud n, marquer n.next

- ✓ La liste est toujours connectée (i.e. tout nœud non supprimé est toujours dans la liste et elle est ordonné)
- ✓ Des nœuds marqués "à supprimer" peuvent être dans la liste

La liste chaînée triée d'entier : le parcours

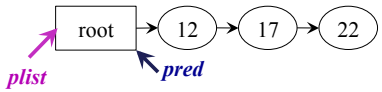
```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```




```
    pred = &cur->next;
  } }
```

La liste chaînée triée d'entier : le parcours

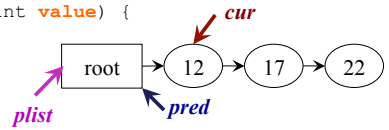
```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
➔ coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```




```
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : le parcours

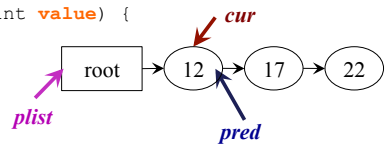
```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
➔   Node cur = pointer(*pred);
```




```
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : le parcours

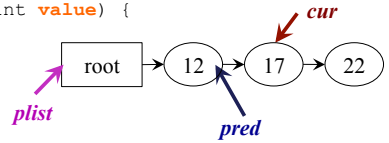
```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```




```
➔   pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : le parcours

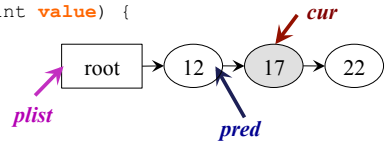
```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
➔   Node cur = pointer(*pred);
```




```
    pred = &cur->next;
  } }
```

La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```

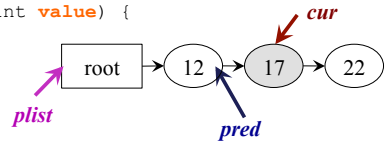


Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* pred, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```

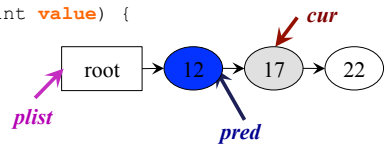


Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* pred, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```



Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

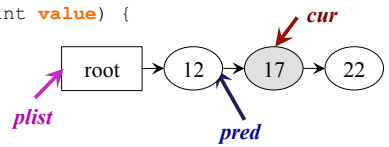
```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```

Deux raisons pour rater le CAS :
- Si pred est marqué supprimé
- Si un noeud est inséré après pred

Dans le doute, recommence le parcours

La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* pred, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```



Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

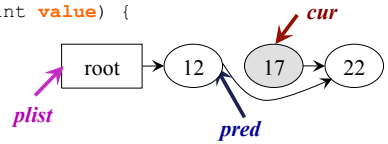
```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```

Deux raisons pour rater le CAS :
- Si pred est marqué supprimé
- Si un noeud est inséré après pred

Dans le doute, recommence le parcours

La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```

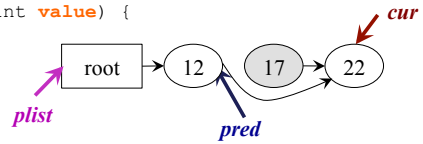


Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : compaction

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```

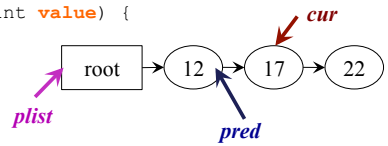


Principe : supprime les nœuds marqués, même si pas le propriétaire

```
    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```



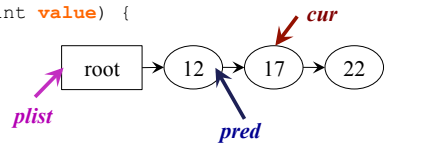
On suppose value = 17

```
    if(cur->value == value) {            /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```


La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
```



On suppose value = 17

```
    if(cur->value == value) {            /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```

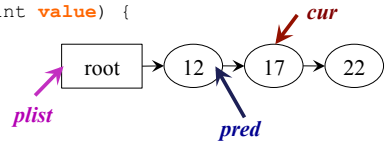
La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);

      On suppose value = 17

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



Le CAS ne peut rater que si next est modifié à cause
De la suppression du nœud 17 par un autre thread
Insertion avant 22, suppression de 22

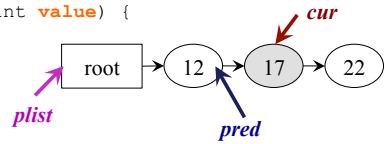
La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);

      On suppose value = 17

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



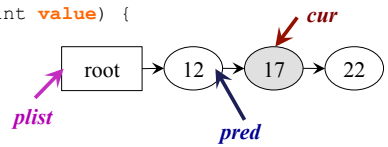
La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);

      On suppose value = 17

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



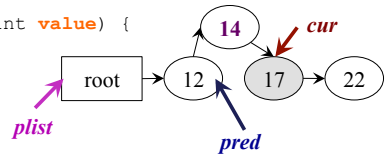
La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);

      On suppose value = 17

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



Imaginons qu'un autre thread ait inséré un noeud

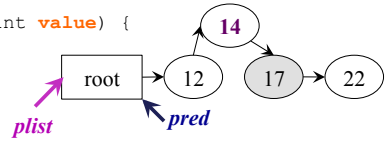
La liste chaînée triée d'entier : la suppression

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
➔ coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);

      On suppose value = 17

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



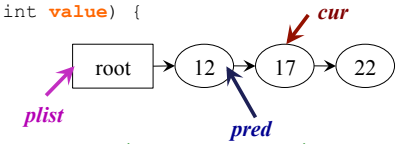
Le prochain insert ou del qui passe par le nœud 17 le supprimera pour nous (quitte car found = 1)

La liste chaînée triée d'entier : pas trouvé

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
➔   Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* pas trouvé */
      return 0;

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



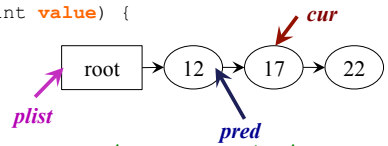
Value = 13

La liste chaînée triée d'entier : pas trouvé

```
void del(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(!found) {
    Node cur = pointer(*pred);
➔   if(cur == null || value < cur->value) /* pas trouvé */
      return 0;

    if(cur->value == value) {              /* trouvé! */
      do { n = cur->next; } while(CAS(&cur->next, n, n | 1) != n);
      found = 1; }

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }
    pred = &cur->next;
  } }
```



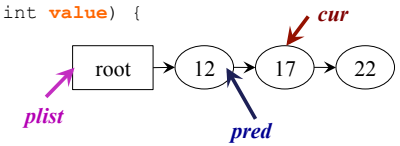
Value = 13
⇒ quitte la fonction

La liste chaînée triée d'entier

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
➔   Node cur = pointer(*pred);

    if(mark(cur->next)) {                  /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```



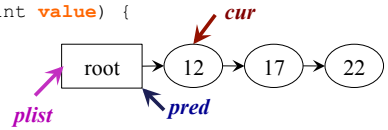
Insertion : même principe pour le parcours et la compaction

La liste chaînée triée d'entier : ajout

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
    Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* insertion */
      if(CAS(pred, cur, new Node(cur, value)) != cur) goto restart;
      else return;

    if(mark(cur->next)) {                 /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```



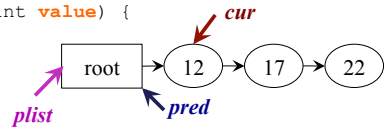
Exemple : value = 14

La liste chaînée triée d'entier : ajout

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
    Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* insertion */
      if(CAS(pred, cur, new Node(cur, value)) != cur) goto restart;
      else return;

    if(mark(cur->next)) {                 /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```



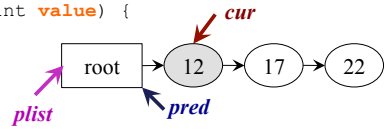
Exemple : value = 14

La liste chaînée triée d'entier : ajout

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
    Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* insertion */
      if(CAS(pred, cur, new Node(cur, value)) != cur) goto restart;
      else return;

    if(mark(cur->next)) {                 /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```



CAS peut rater pour deux raisons :
- Cur est marqué supprimé
- Un autre nœud est inséré

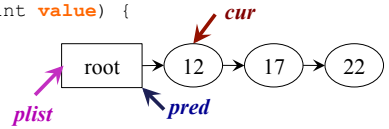
Dans le doute, recommence

La liste chaînée triée d'entier : ajout

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
    Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* insertion */
      if(CAS(pred, cur, new Node(cur, value)) != cur) goto restart;
      else return;

    if(mark(cur->next)) {                 /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```

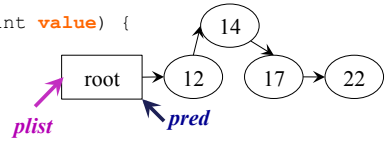


La liste chaînée triée d'entier : ajout

```
void add(coloredPointer* plist, int value) {
restart:
  coloredPointer* pred = plist;
  while(true) {
    Node cur = pointer(*pred);
    if(cur == null || value < cur->value) /* insertion */
      if(CAS(pred, cur, new Node(cur, value)) != cur) goto restart;
      else return;

    if(mark(cur->next)) {                 /* cur doit être supprimé */
      if(CAS(pred, cur, pointer(cur->next)) != cur) goto restart;
      else continue;
    }

    pred = &cur->next;
  }
}
```



Structures non bloquantes

1. Les outils
2. La pile
3. La queue
4. La liste chaînée
5. Algorithmes de verrouillage

L'algorithme CAS

```
struct lock { int locked; } /* 0 ⇒ libre */

void lock(struct lock* lock) {
  while(CAS(&lock->locked, 0, 1);
}

void unlock(struct lock* lock) {
  lock->locked = 0;
}
```

Problème : si tous les cœurs essayent d'accéder à la ligne de cache, les performances s'écroulent

L'algorithme MCS

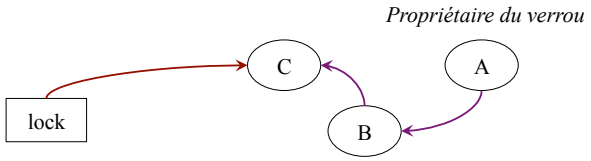
MCS = Mellor-Crummey and Scott (ASPLOS 1991)

Principe : éviter la contention sur une ligne de cache unique

- ✓ Chaque thread en attente s'ajoute dans une pile
- ✓ Spin sur son propre nœud, libéré par le précédent dans la liste

Idée : le dernier thread qui demande le verrou est stocké dans la variable partagée lock

- ✓ Si le verrou est pris, doit chaîner l'ancienne liste et attendre d'être libéré
- ✓ Sinon, le verrou est directement acquis

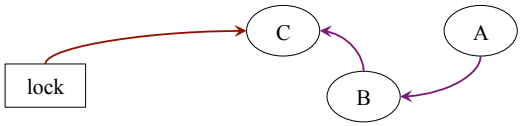


L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Propriétaire du verrou

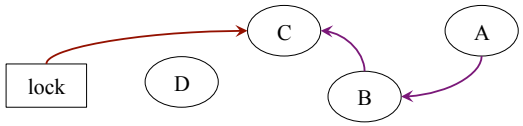


L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Propriétaire du verrou

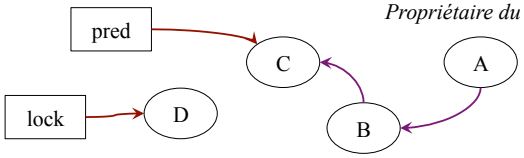


L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Propriétaire du verrou

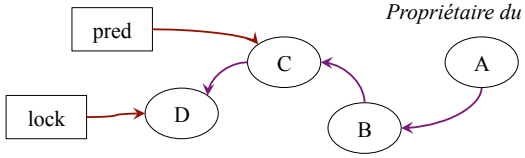


L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Propriétaire du verrou



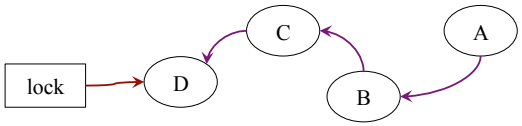
L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Exécution de A

Propriétaire du verrou



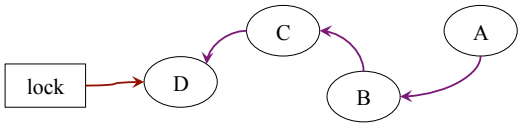
L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```

Gestion de la période intermédiaire entre le xchg et le pred->next = my_node

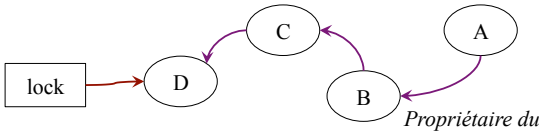
Propriétaire du verrou



L'algorithme MCS

```
void CS() {
  struct node my_node(0, 1);
  struct node* pred = xchg(&lock, node);
  if(pred) {
    pred->next = my_node;
    while(!my_node->spin);
  }
  execute_cs();
  if(CAS(&lock, my_node, 0) == 0)
    return;
  while(!my_node->next);
  my_node->next->locked = 0;
}
```

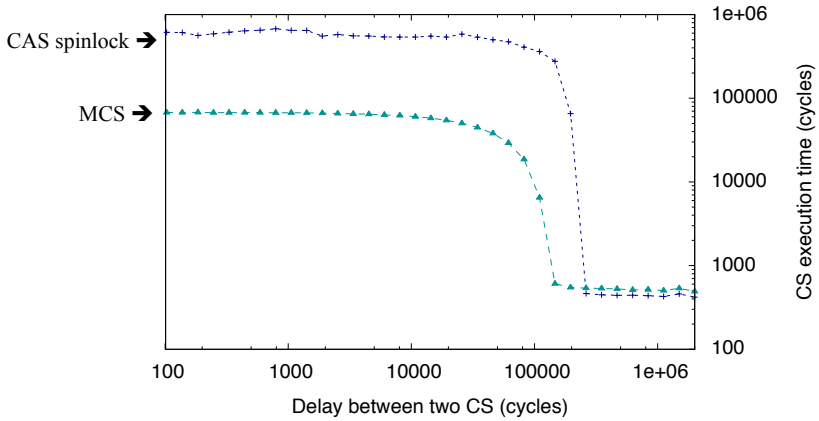
```
struct node {
  struct node* next;
  int locked;
};
struct node* lock;
```



Propriétaire du verrou

L'algorithme MCS

Évaluation sur un 48 cœurs



Conclusion

Verrou :

- ✓ Algorithmes compliqués (mais pas en M2 système)
- ✓ Non composable
- ✓ Performances moyennes si beaucoup de contention (bloquage)

Mémoires transactionnelles

- ✓ Abstraction simple
- ✓ Composable
- ✓ Performance mauvaise si beaucoup de contention (abort)

Structures lock-free

- ✓ Algorithmes très compliquée (même en M2 système)
- ✓ Pas composable
- ✓ Excellentes performances