Programmation Système Répartie et Concurrente
Master 1 Informatique – MU4IN400

Cours 4 et 5 : Thread, Atomic, Mutex, Condition

Yann Thierry-Mieg
Yann.Thierry-Mieg@lip6.fr

Plan

On a vu au cours précédent

- La lib standard : conteneurs, algorithmes

Aujourd'hui : Thread, Mutex et Atomic

- Programmation Concurrente : principes et problèmes
- Création et fin de thread
- Atomic
- Mutex
- La lib pthread

Références : cppreference.com , cplusplus.com

Cours de Edwin Carlinet (EPITA)

- https://www.lrde.epita.fr/~carlinet/cours/parallel/

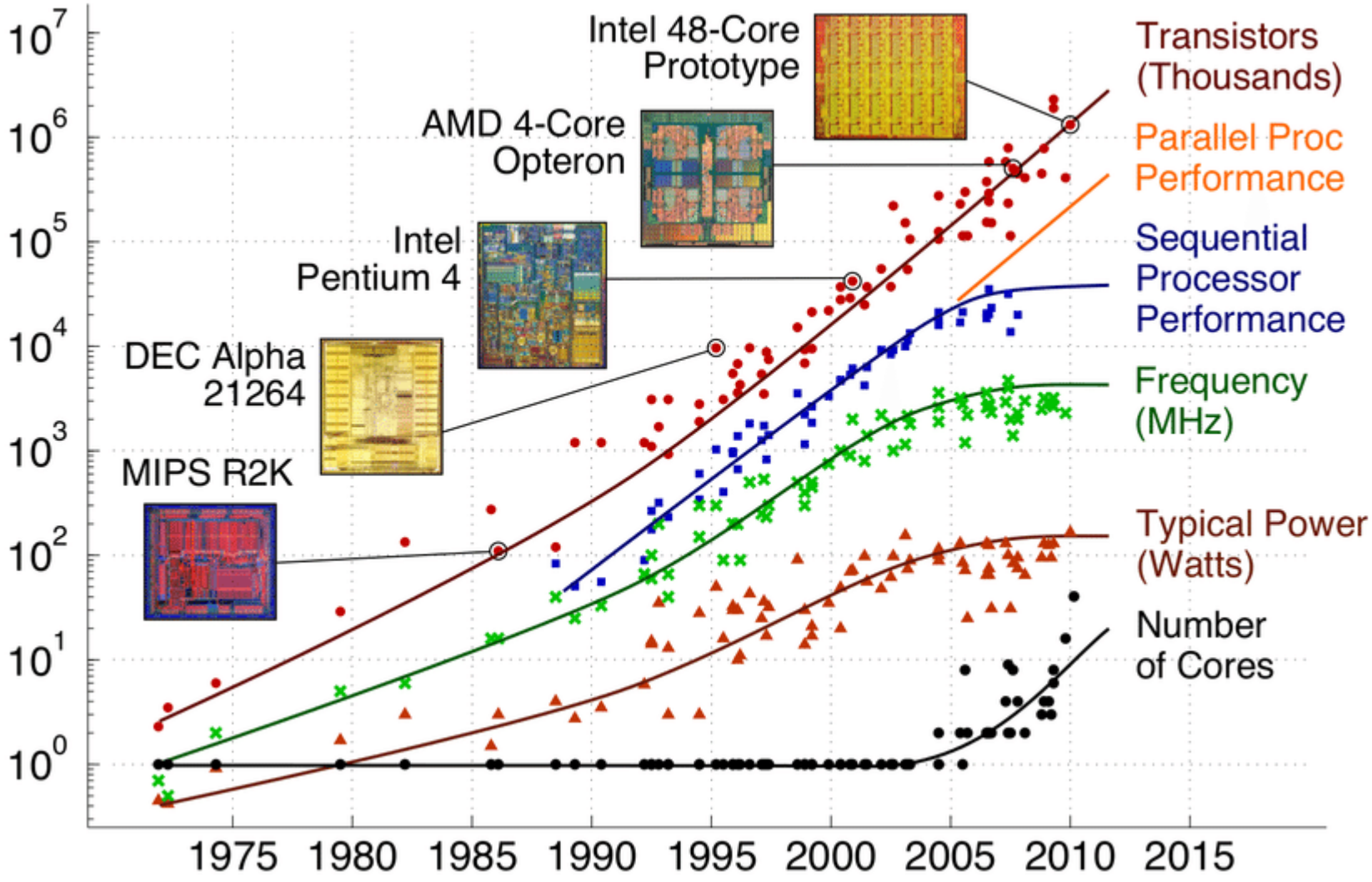
Cours de P.Sens, L.Arantes (pthread)

StackOverflow : Definitive C++ book guide

https://stackoverflow.com/questions/388242/the-definitive-c-book-guide-and-list?rq=1

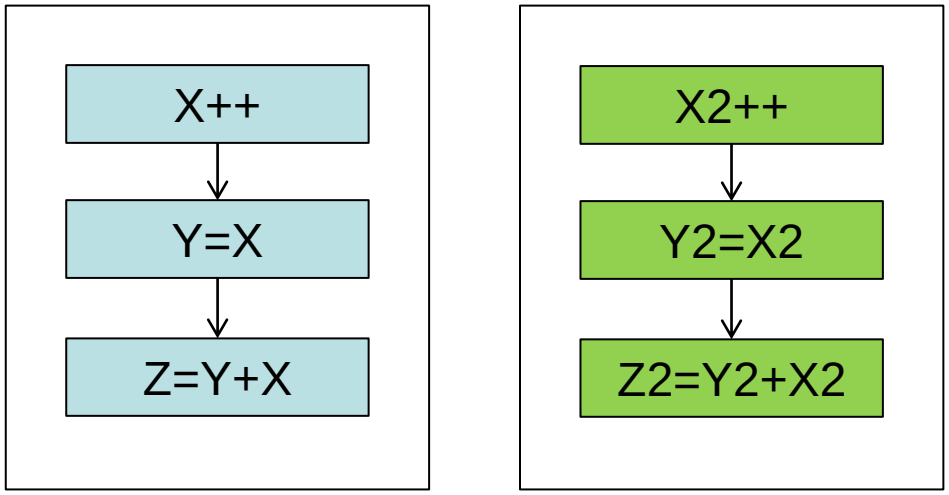
Concurrence, Principes, Problèmes

Evolutions Matérielles



Principes de la concurrence : Causalité

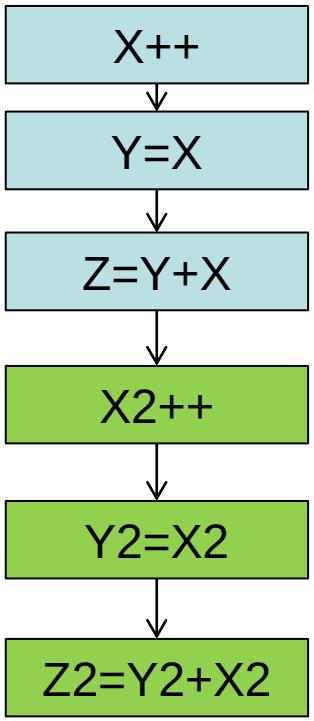
- Le traitement à réaliser est vu comme un arbre d'actions
  - Certaines actions ont des prédécesseurs
  - On parle de dépendance causale

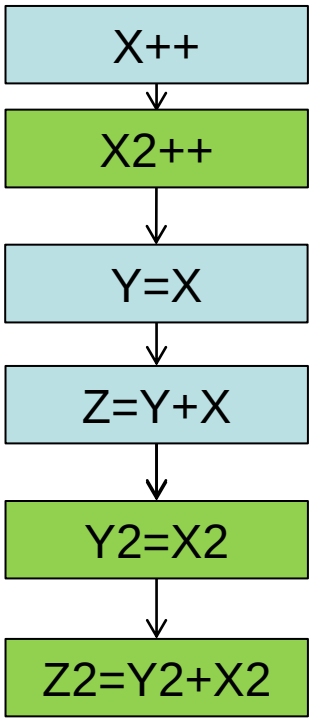


  - Les actions de T0 et T1 ne sont pas ordonnées/causalement liées les unes par rapport aux autres

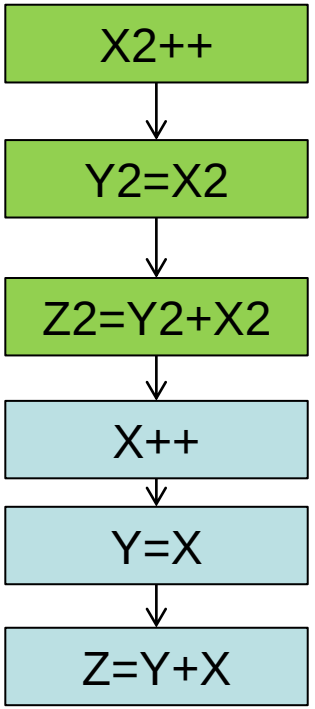
Causalité, Ordre Partiel

- Observation séquentielle d'un ordre partiel
  - Si l'on n'avait qu'un seul processeur + changement de contexte pour connecter la mémoire
  - Un run qui contient toutes les actions et respecte leurs précédences
  - Sémantique « consistence séquentielle » intuitive



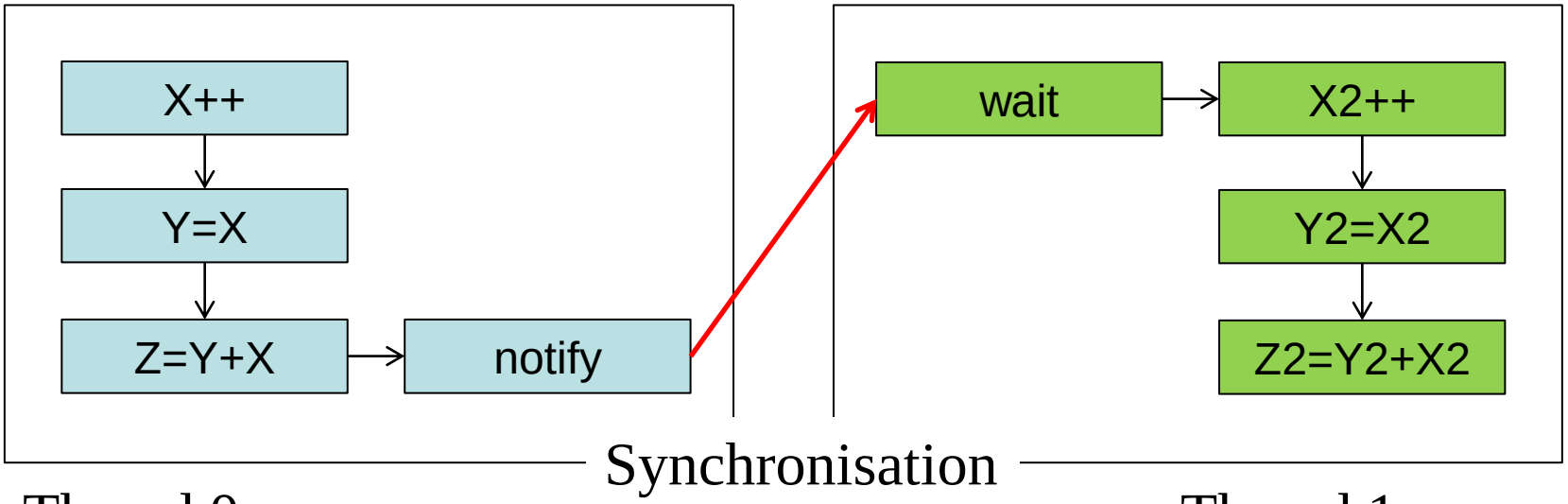


…
K étapes, N thread => K^N entrelacements

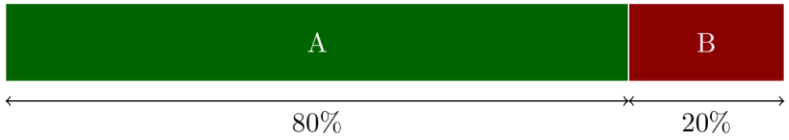


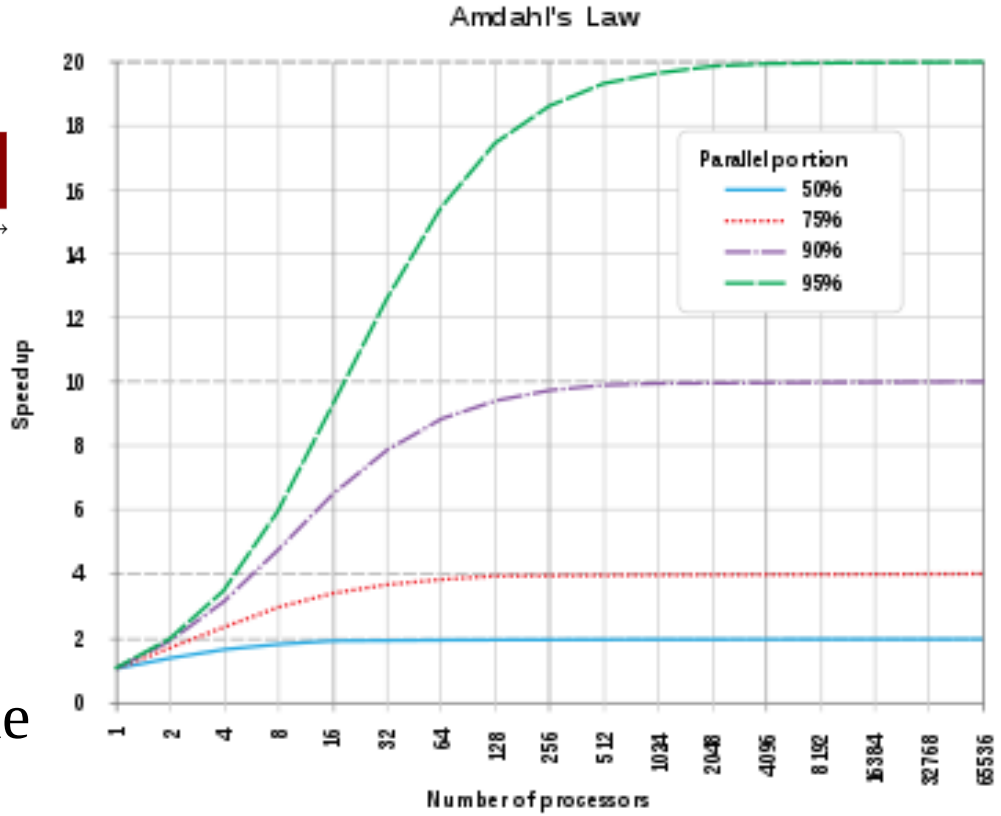
Principes de la concurrence : synchronisation

- Problème : Correctement capturer et exprimer les précédences
  - Par défaut seules les actions exécutées par un même thread sont ordonnées
    - On respecte l'ordre du programme
    - Méfiance avec Out-Of-Order execution cependant
  - C'est au programmeur de garantir les précédences essentielles **entre** threads
    - Ajout de mécanismes de **synchronisation** entre threads



Accélération Théorique Concurrente





- Mesure de loi d'Amdahl : latence
  - Une partie séquentielle
    - Pas d'accélération
  - Une partie parallélisable
    - Proportionnel au nombre de cœurs

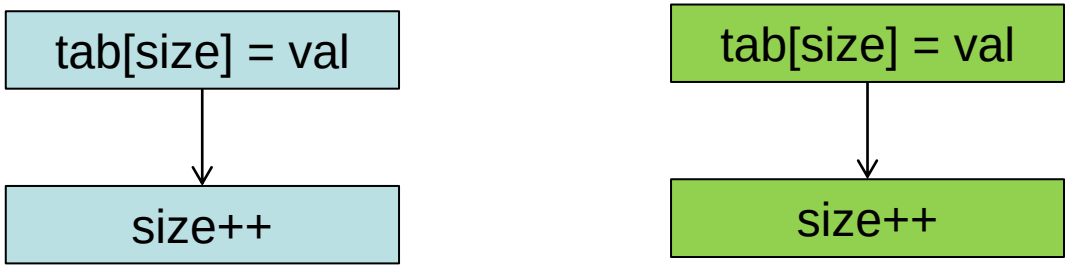
On ne peut pas tout paralléliser

La concurrence = Parallélisme Potentiel

Cf. aussi : Loi de Gustafson (débit théorique)
Mieux adaptée pour les architectures e.g vectorielles

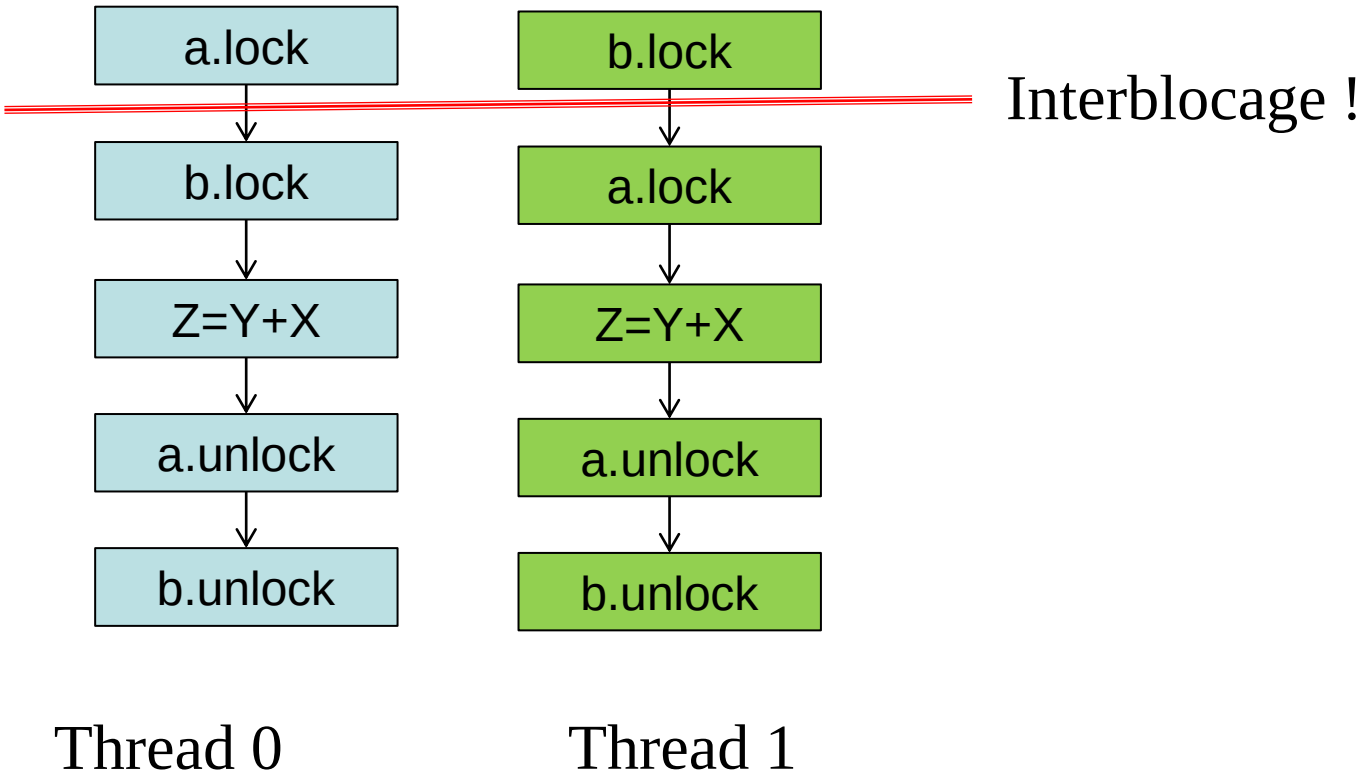
Problèmes liés à la concurrence

- Accès concurrents aux données
  - Ressources à protéger des écritures/lectures concurrentes
  - Par défaut, pas d'atomicité des instructions du C++
  - Data Race Condition
- Exemple : push_back concurrent ?



Problèmes liés à la concurrence

- Interblocages
  - Acquisition de séries de locks dans le désordre
  - Locks circulaires (dîner des philosophes)



Problèmes liés à la concurrence

- Indéterminisme (K puissance N entrelacements !)
  - Peu de contrôle sur les exécutions possibles
    - On présume que l'ordonnanceur est non déterministe
    - Pas d'a priori sur le parallélisme réel (!= concurrence)
  - Difficile de reproduire les problèmes
    - Les programme peut fonctionner (passer un test) mais être faux
    - Un test peut échouer ou pas à cause de l'ordonnancement
  - Loi de probabilité défavorable aux fautes de concurrence
    - En général, la commutation doit se passer « exactement au mauvais moment », dur à reproduire
    - Mais sur le long terme, la probabilité de faute tend vers 1

Les Thread du C++11

Processus léger ou "Thread"

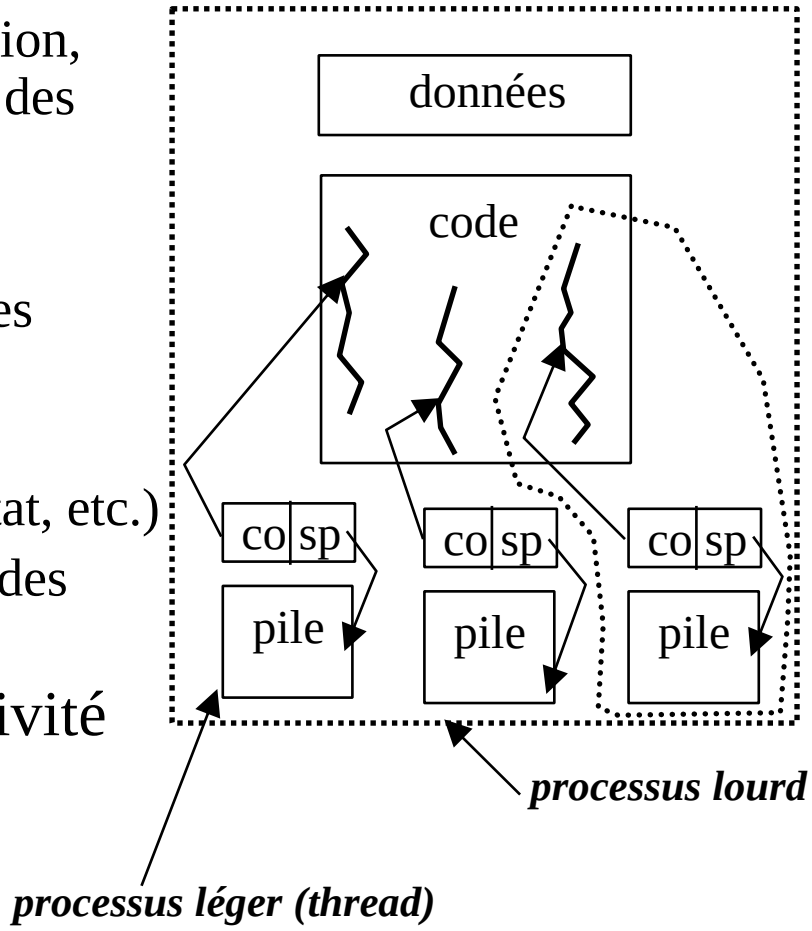
Partage les zones de code, de données, de tas + des zones du PCB (Process Control Block) :

- ✓ liste des fichiers ouverts, comptabilisation, répertoire de travail, userid et groupid, des handlers de signaux.

Chaque thread possède :

- ✓ un mini-PCB (son CO + quelques autres registres),
- ✓ sa pile,
- ✓ attributs d'ordonnancement (priorité, état, etc.)
- ✓ Quelques structures pour le traitement des signaux (masque et signaux pendants).

Un processus léger avec une seule activité = un processus lourd.



La sémantique des threads

- Modèle mémoire
  - Stack (pile d'invocation) par thread
    - Chacun sa pile d'appels, fonctionnant normalement
  - Espace d'adressage commun
    - Tous les threads voient la **même** mémoire
    - Sémantique mémoire partagée (par opposition aux processus)
  - Un seul processus système
    - Au niveau du noyau, un processus encapsule les threads
    - Les systèmes modernes (linux 2.6+, osx 10+, win 7+) ont tous des primitives et structures spécifiques aux threads

La sémantique des threads

- Ordonnancement
  - Quantum et commutation
    - Les threads sont élus et tournent sur un CPU
    - Au bout d'un **quantum**, on passe la main = commutation
  - Commutations explicites sont possibles
    - Entrées sorties, sleep, yield, … provoquent une commutation
  - Indéterminisme en pratique de l'ordonnanceur
    - Aucune hypothèse sur le quantum etc…
  - Niveau de parallélisme indépendant du nombre de Threads
    - Application multi thread sur mono cœur, e.g. GUI
    - Un thread peut réaliser plusieurs tâches (thread pool)

Concurrence et C++ moderne

- Thread
  - Briques de base
- Atomic
  - Pour les types primitif
  - Barrières mémoire fines
- Mutex
  - Exclusion mutuelle, beaucoup de variantes
- Shared
  - Locks Lecteurs/Ecrivains (C++17)
- Condition
  - Notifications et attente
- Future
  - Exécution asynchrone

Thread : Création, Terminaison et Join

- Un thread est représenté par la classe std::thread
- Création
  - L'instanciation du thread (constructeur) prend
    - une fonction à exécuter
    - les paramètres à passer à la fonction
- Terminaison
  - Le thread se termine quand il sort de la fonction
- Join
  - L'objet thread ne sera collecté que quand il aura été **join**
  - Un seul thread peut join à la fois
  - Invocation bloquante jusqu'à la terminaison du thread ciblé

Exemple Basique : creation/join

```
#include <iostream>       // std::cout
#include <thread>         // std::thread

void foo()
{  // do stuff...
}

int main()
{
  std::thread first (foo);     // spawn new thread that calls foo()
    // do something else
  first.join();                // pauses until first finishes
   std::cout << "foo completed.\n";
  return 0;
}
```

Passage de paramètres

- Nombre et typage arbitraire
  - Syntaxe confortable et bien typée
  - Fonction retournant void
  - Liste des arguments à lui passer
- Cas particulier passage de références
  - Durée de vie de la référence passée doit être garantie par le programmeur
  - std::ref(var) et std::cref(const var)
- Pas de valeur de retour => modifier des données partagées
  - Attention aux synchronisations
  - Join est basique mais constitue un mécanisme de synchronisation fiable

Exemple

```
void f1(int n, bool b);
void f2(int& n);
int main()
{
   int value=0;
  std::thread t1(f1, value + 1,true); // pass by value
  std::thread t2(f2, std::ref(value)); // pass by reference
  ... // do some stuff
  t1.join(); t2.join();
  cout << value << endl;
}
```

Yield et Sleep

- yield()
  - Demande explicite (mais pas contraignante) de commutation
  - Laisse l'occasion aux autres threads de prendre la main
  - Implémentation dépendante des plateformes

```
std::this_thread::yield();
```

- sleep_for(chrono::duration)
  - Demande au système de nous réveiller au bout d'un moment
  - Implicitement force une commutation
  - Durée du sleep imprécise >= demandé (steady_clock recommandé)
  - sleep_until variante pour attendre une date donnée

```
std::this_thread::sleep_for(2s); // C++14
std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(200));//C++11
```

Threads Détachés

- Sémantique de destruction d'un Thread
  - Invocation du destructeur de l'objet thread doit avoir lieu
    - Après join ou detach
    - Sans quoi fautes mémoires (e.g. destructeurs du stack)
- Détacher un thread => plus de join
  - Il poursuit son exécution indépendamment
  - Se terminera avec le programme (après le main) i.e. avec le thread principal qui exécute « main »
- Intérêt principal
  - Threads de background simples, créations de statistiques etc…

Exemple

```
int main()
{
    Data d;
    std::thread t(independentThread, &d);
    t.detach();
    // work with data
    int i=0;
    while (i++ < 10) {
        std::this_thread::sleep_for(
                std::chrono::milliseconds(300));
        d.update();
    }
}
```

```
void printStats(const Data * d );

void independentThread(const Data * data)
{
    while (true) {
        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));
        printStats(data);
    }
}
```

Atomic

Accès concurrents en écriture

- Deux threads exécutent i++ en concurrence, i vaut 0 initialement
  - Combien vaut i après ?
- Pas de garanties sur les accès concurrents
  - Séparation du « fetch » lire la valeur et du « store » la stocker
  - Problème accentué sur les matériels modernes (partage de ligne de cache, …)

Accès concurrents = UB

Standard C++ : section 1.10 clause 21: Data Race = UB

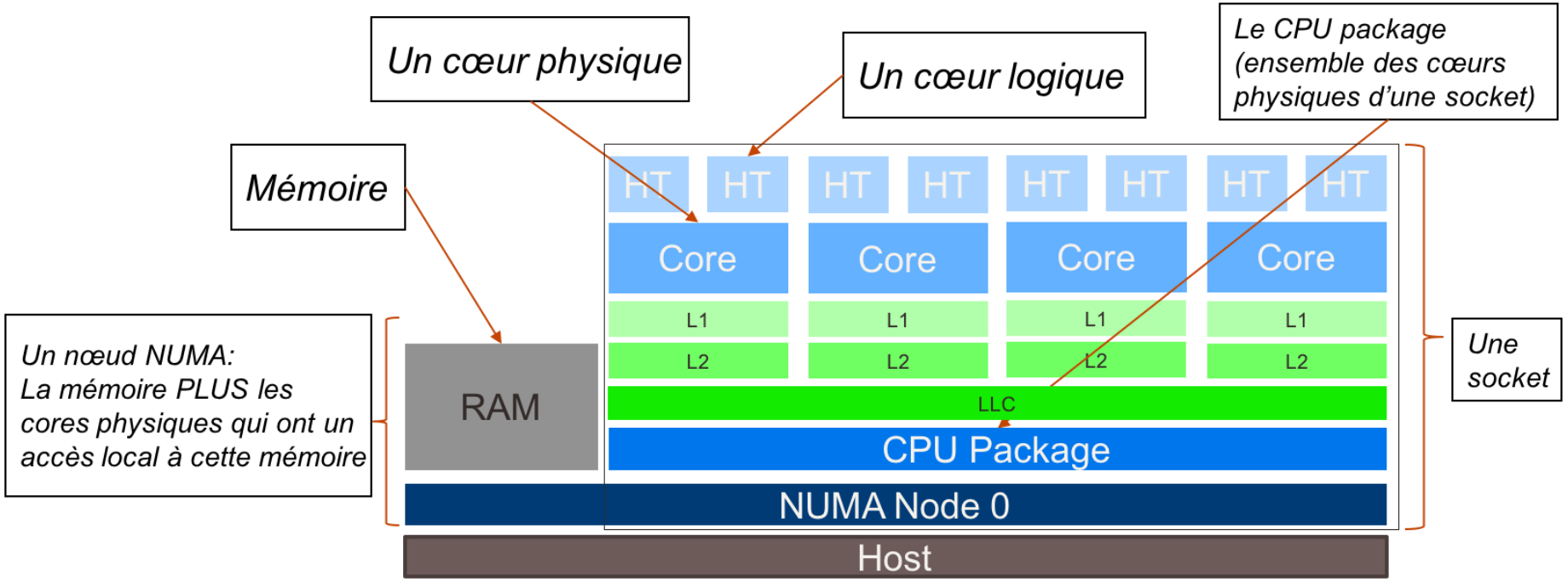
> The execution of a program contains a data race if it contains two conflicting actions in different threads, at least one of which is not atomic, and neither happens before the other. **Any** such data race results in **undefined behavior**.

Standard C++ : section 1.3.24 : UB = ????

Undefined Behavior (UB) is behavior for which this International Standard imposes no requirements... Permissible undefined behavior ranges from *ignoring the situation completely* with *unpredictable results*, to behaving during translation or program execution in a documented manner characteristic of the environment...

Lien sur le matériel

- Structure Matérielle NUMA
  - Cohérence de cache niveau matériel
    - Mécanisme relativement complexe
  - Opérations CAS et importance pratique
    - Structures de données « lock free »



Atomic en pratique

NUMA revisited

```
std::atomic<int> x = 0;
```

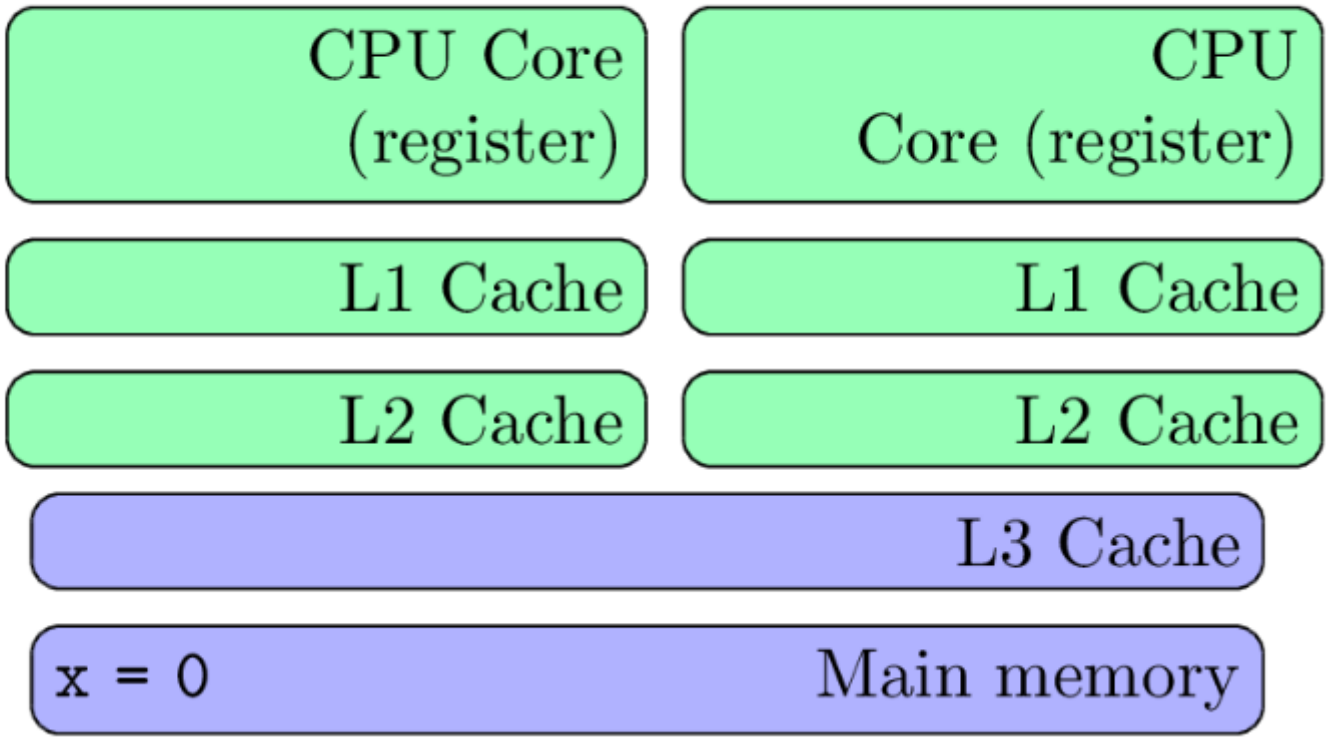
Thread 1	Thread 2
`x += 2;`	`x += 1;`

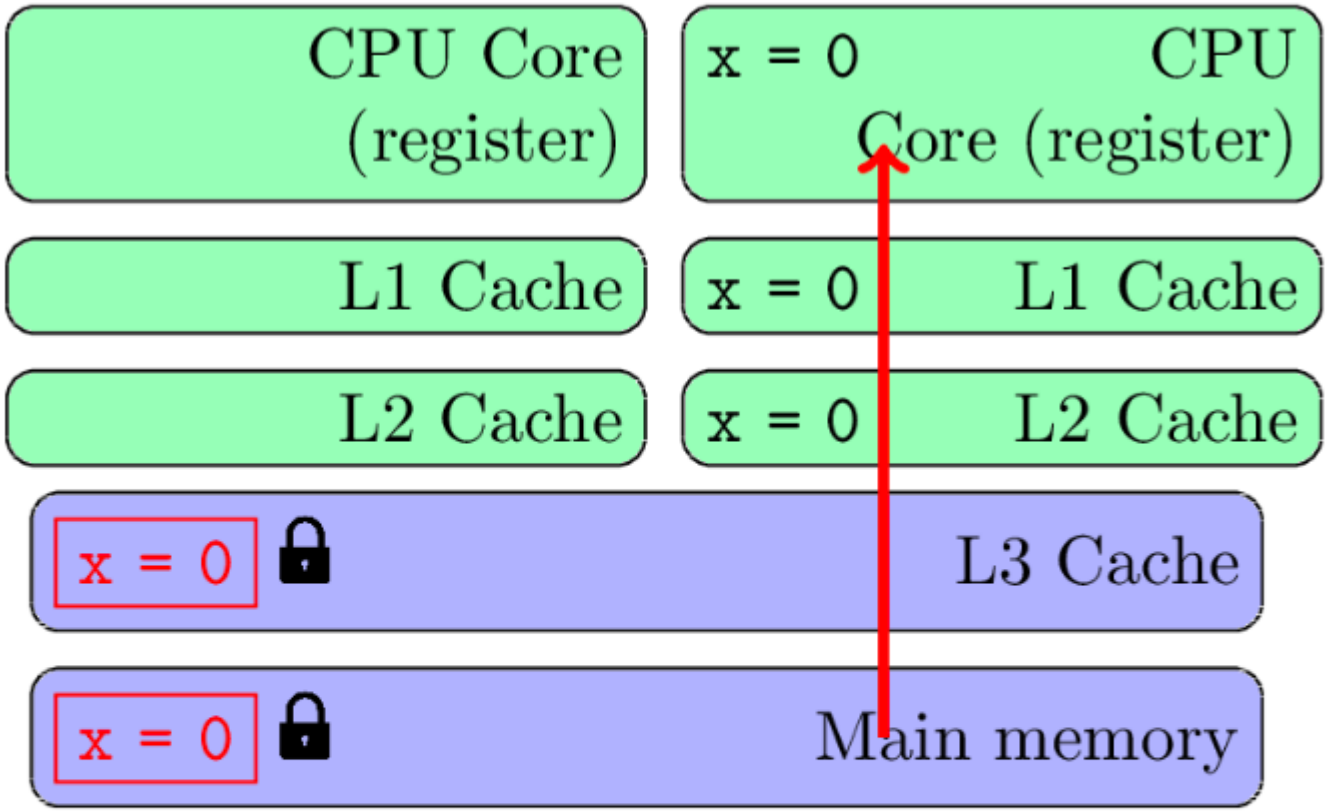
`x = ?`

- Read modify write operation:
  - Read `x` from memory
  - Add something to `x`
  - Write `x` to memory

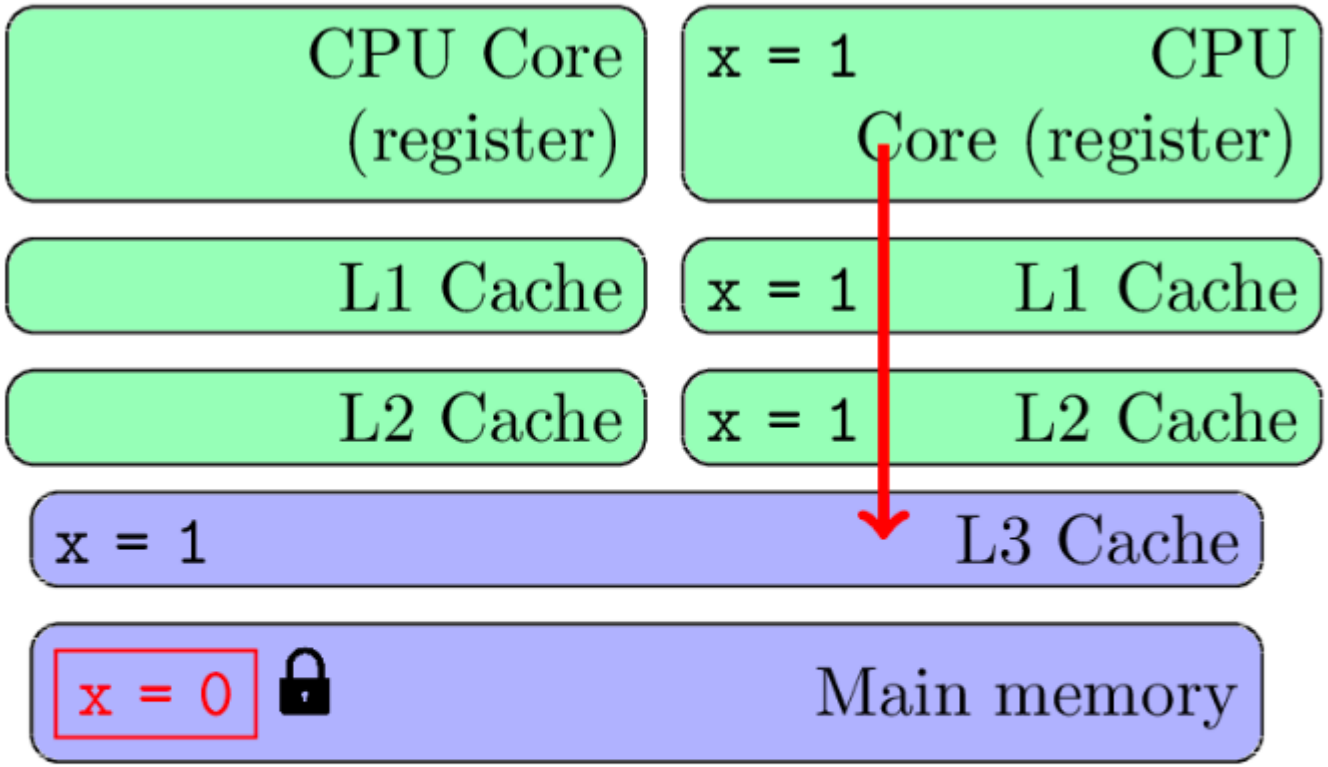
Nécessité d'une gestion matérielle

What's going on ?

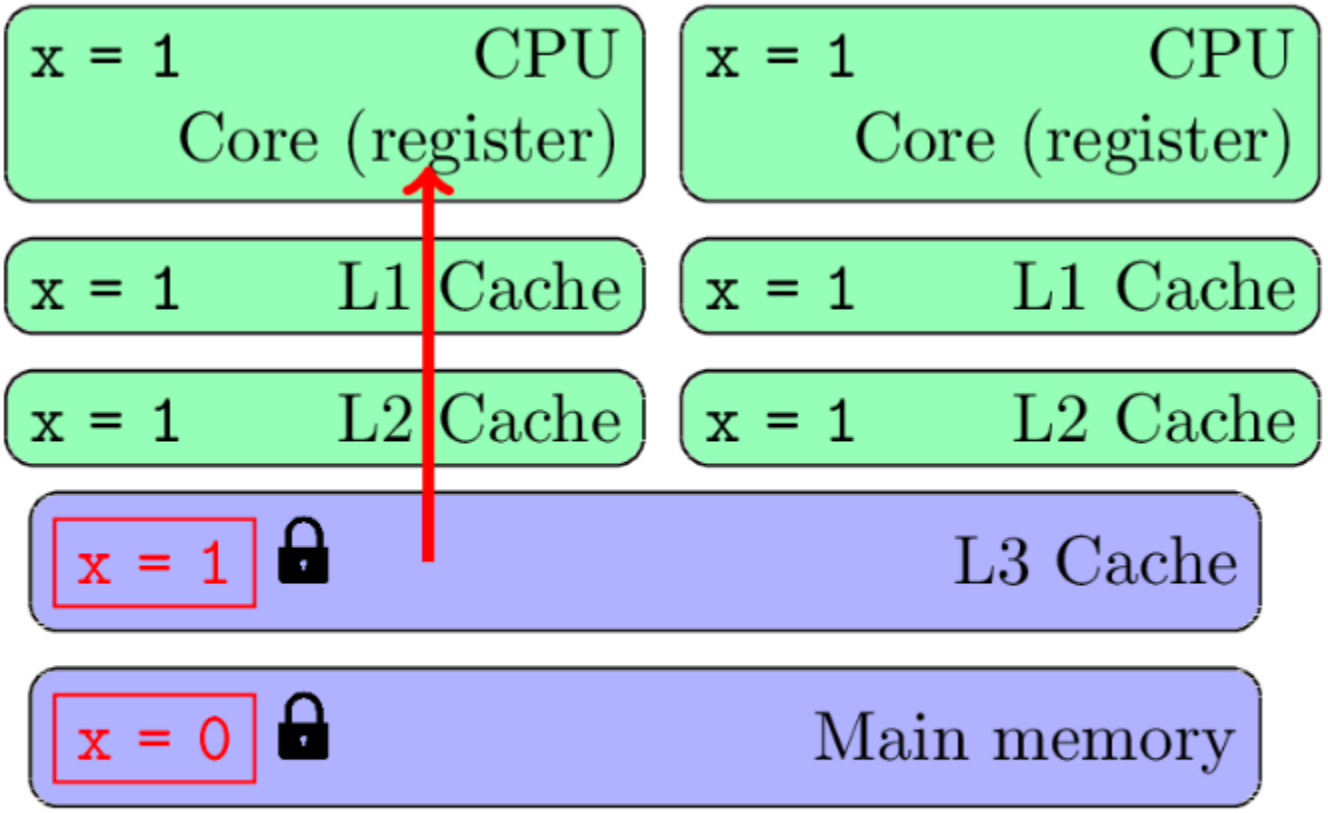




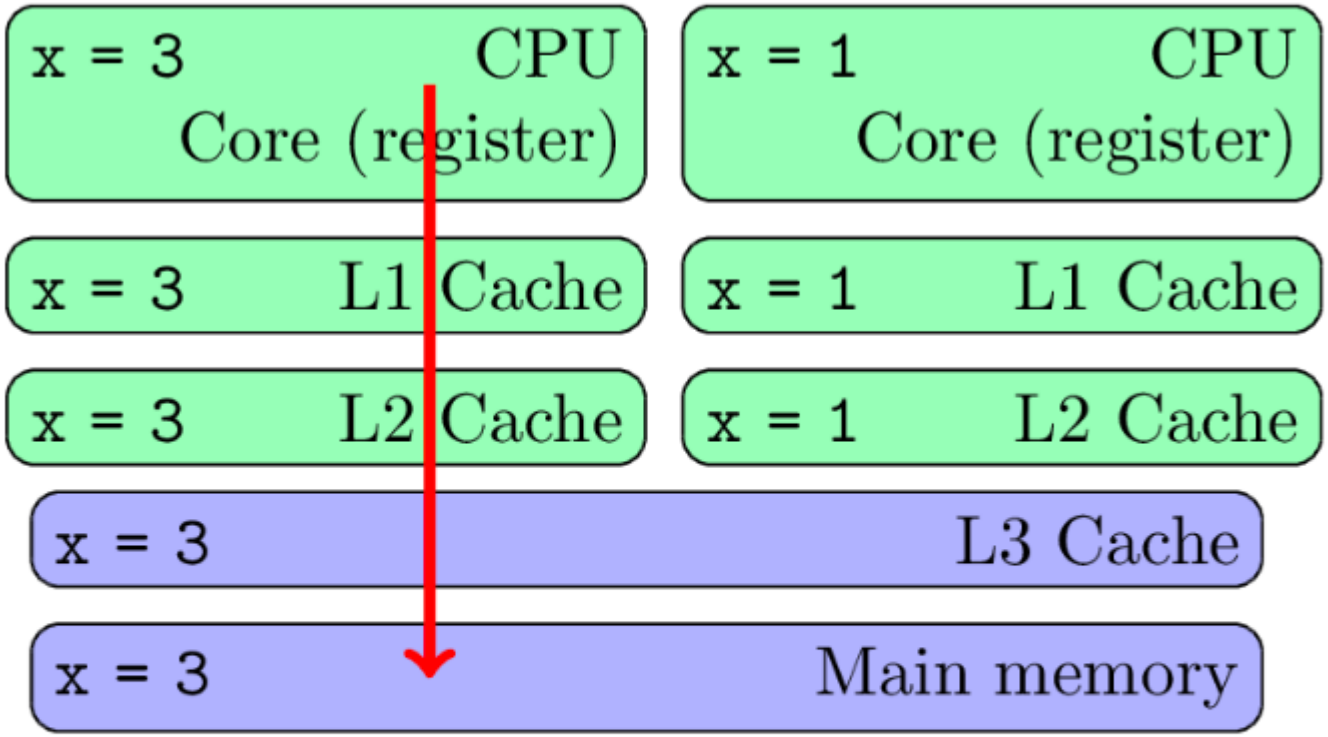
- Thread 2 executes
  - It fetches `x` from caches to main memory
  - It locks `x` address (by hardware impl.)
- Thread 1 executes
  - It try to fetch a `x` which is locked (goes to by hardware impl.)



- Thread 2 keeps executing
  - It updates `x`
  - It write back `x` to caches
  - It *unlocks* `x` address



- Thread 1 executes
  - It fetches `x`
  - It locks `x` address



- Thread 1 keeps executing
  - It updates `x`
  - It write back `x` address
  - It unlocks `x` address

La cohérence de cache assurée au niveau matériel permet au niveau logiciel de construire des synchronisations

Accès concurrents en écriture

- Il existe des solutions matérielles
  - fetch_and_add, fetch_and_sub, compare_exchange…
  - Nécessaires pour que le logiciel construise ses propres briques
    - atomic_boolean_flag est la base de toute synchronisation
  - Accessibles finement en C++
  - Dans l'UE : types atomiques primitifs seulement
    - Barrières mémoire fines, conteneurs lock-free considérés hors programme
    - Cf. l'excellent livre de A. Williams : **C++ Concurrency in Action**

Propriétés et opérateurs d'un atomic

- Offert pour les types primitifs numériques
  - Garantit l'atomicité des opérations :
  - incrément ++ ou +=,
  - décrement – ou -=,
  - opérations bit à bit &=, |=,^=
  - Cas particulier booléen : atomic_flag

Propriétés et opérateurs d'un atomic

- Utilisation « naturelle »
  - Déclaration
    - atomic<int> i =0;
  - Opérateurs Disponibles
    - i++
    - i+=5;
  - Opérations non atomiques
    - Multiplication, manipulation classique
    - i = i +5 => pas atomique.

Exemple

```
std::atomic<bool> ready (false);
std::atomic<int> counter(0);

void count1m (int id) {
  while (!ready) { std::this_thread::yield(); }      // wait for the ready signal
  for (int i=0; i<10000; ++i) { counter += 3;}
};

int main ()
{
  std::vector<std::thread> threads;
  for (int i=1; i<=10; ++i) threads.push_back(std::thread(count1m,i));
  ready = true;
  for (auto& th : threads) th.join();
  std::cout << counter << std::endl;
  return 0;
}
```

Limites des atomic

- Mécanisme bas niveau
  - Protège des données de petite taille
    - Store et Load atomic pour les structures cependant
  - Pas d'atomicité sur les séquences d'opérations
    - Contrôle puis action ? Mise à jour d'une table ?
- Base pour la réalisation de mécanismes de synchronisation

```
class SpinLock {
   std::atomic_flag locked = ATOMIC_FLAG_INIT ;
public:
   void lock() {
      while (locked.test_and_set(std::memory_order_acquire)) { ; }
   }
   void unlock() {
      locked.clear(std::memory_order_release);
   }
};
```

Mutex

Principe d'une Section Critique

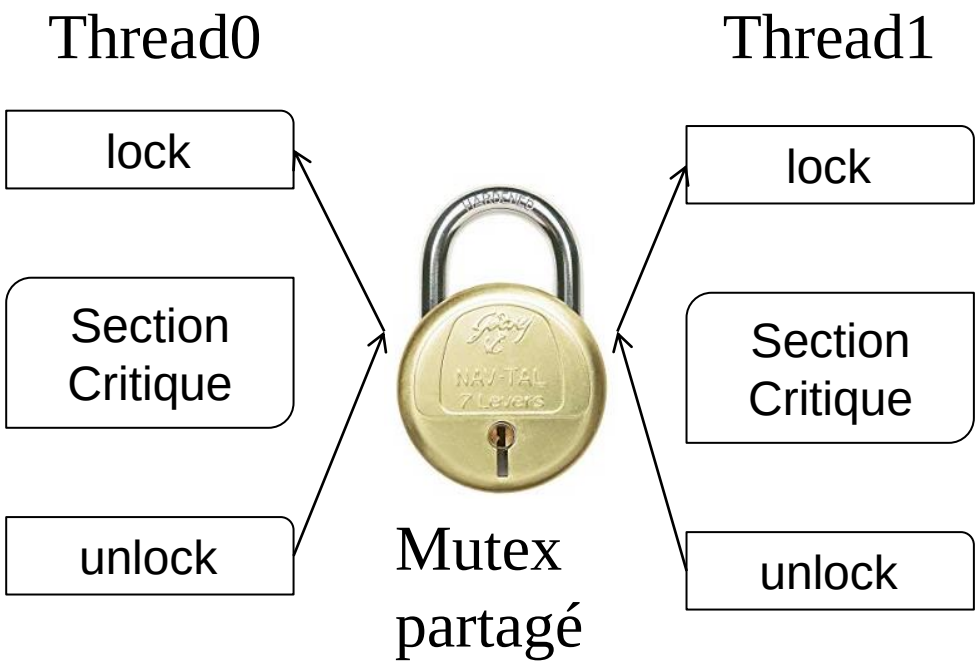
- Suites d'actions cohérentes sur des données
  - Cohérentes
    - Pas de *data race* des accès concurrents
  - Aspect Transaction
    - Tout devient visible ou rien ne l'est

Atomic ne permet pas en général de traiter ce problème.

Principe d'une Section Critique

- Un verrou (mutex) permet de garantir l'exclusion mutuelle
  - **lock** :
    - Si le mutex est disponible, l'acquiert
    - Si non disponible : bloquant, endort le thread
  - **unlock :**
    - Fait par le propriétaire/verouilleur uniquement
    - Jamais bloquant, réveille les thread bloqués en attente

Exclusion mutuelle par mutex



- Un thread en section critique peut être interrompu
  - Pas de contrôle de l'ordonnanceur
  - Mais s'il détient le lock, les autres threads ne peuvent pas lui marcher dessus
  - Un seul thread à la fois en section critique

<mutex>

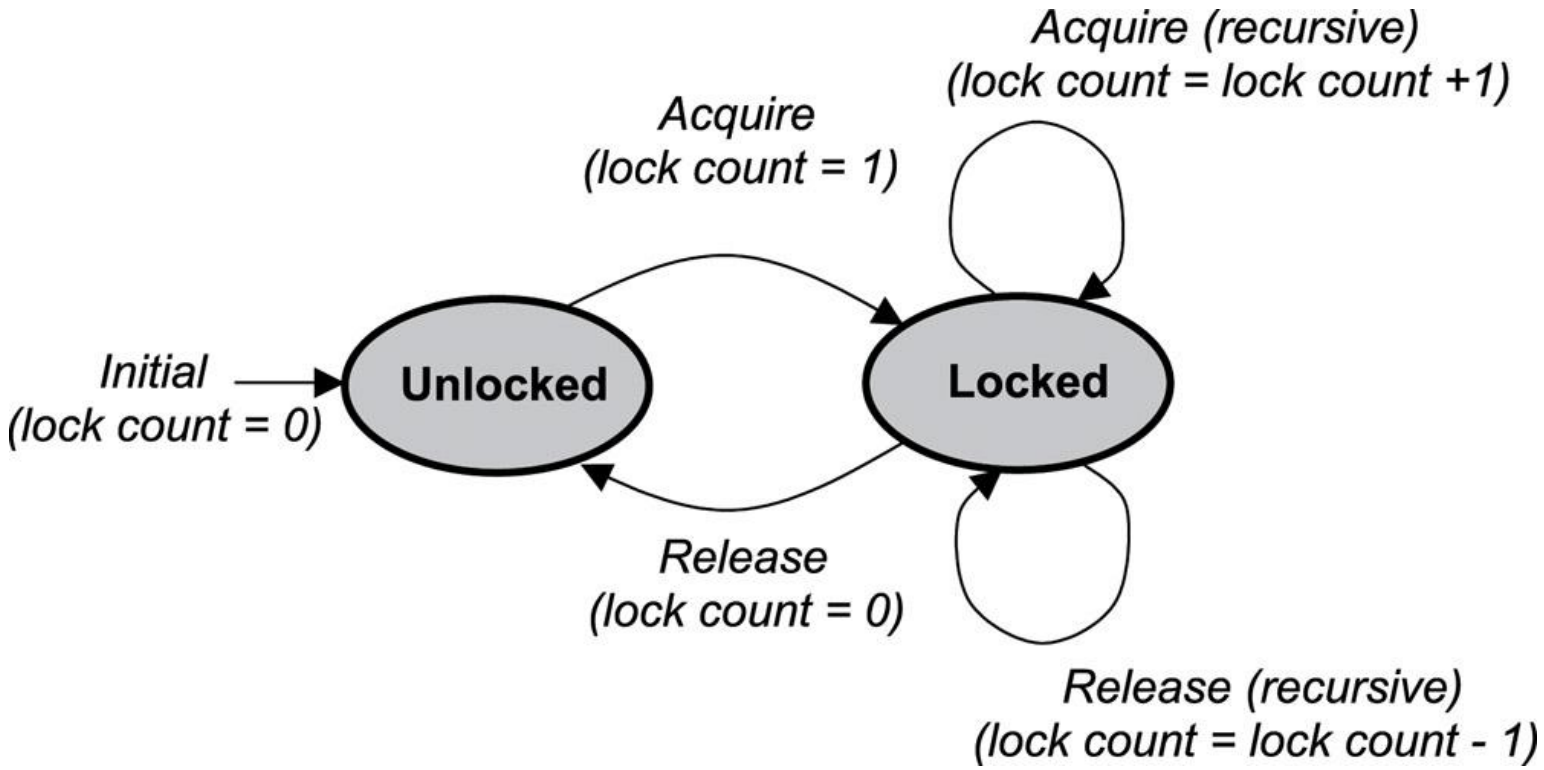
```
std::mutex mtx;           // mutex for critical section

void print_block (int n, char c) {
  // critical section (exclusive access to std::cout signaled by locking mtx):
  mtx.lock();
  for (int i=0; i<n; ++i) { std::cout << c; }
  std::cout << '\n';
  mtx.unlock();
}

int main ()
{
  std::thread th1 (print_block,50,'*');
  std::thread th2 (print_block,50,'$');
  th1.join();
  th2.join();
  return 0;
}
```

Mutex

- Le mutex possède une file d'attente des Threads qui ont fait lock alors qu'il n'était pas disponible
- Le mutex a deux états
  - recursive_mutex supporte la réacquisition par le même thread



unique_lock

- Facilité syntaxique pour un style de programmation
  - Exclusion mutuelle ayant comme portée une fonction, un bloc
  - Utilisation similaire au *synchronized* de Java
- unique_lock (RAII)
  - Mentionne un lock, acquis à la construction
  - La destruction de l'instance libère le lock (out of scope)

```
int g_i = 0;
std::mutex gi_mutex;  // protects g_i

void safe_increment()
{
   unique_lock<mutex> lock(gi_mutex);
   ++g_i;
}
```

```
int main()
{
   std::thread t1(safe_increment);
   std::thread t2(safe_increment);
   t1.join();
   t2.join();
}
```

RAII : Resource Acquisition Is Initialization

```
#include <mutex>
#include <iostream>
#include <string>
#include <fstream>
#include <stdexcept>
void write_to_file (const std::string & message) {
        // mutex to protect file access (shared across threads)
        static std::mutex mutex;
        // lock mutex before accessing file
        std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex);
        // try to open file
        std::ofstream file("example.txt");
        if (!file.is_open())
                throw std::runtime_error("unable to open file");
        // write message to file
        file << message << std::endl;
        // file will be closed 1st when leaving scope (regardless of exception)
        // mutex will be unlocked 2nd (from lock destructor) when leaving
        // scope (regardless of exception) (exemple adapté de Wikipedia)
}
```

MultiThread-Safe

- Des fonctions manipulant des données
  - Résistantes à la réentrance (attention aux static)
  - Résistantes aux accès concurrents
- Classe MT-safe
  - Encapsule son comportement
  - Utilise des mécanismes de synchronisation; certaines opérations peuvent donc être bloquantes

MultiThread-Safe

- Les méthodes d'une classe manipulent les mêmes données
  - Comment garantir un accès cohérent aux instances ?
  - Atomic ne fournit pas toutes les garanties utiles
  - Une section critique contient plusieurs actions, le grain est arbitraire
- Solution générique :
  - Un Mutex par instance, barrière commune à l'entrée, libérée en sortie pour les opérations membres (cf. moniteurs Java)

Classe MT safe exemple

```
// source M. Freiholz
class Cache
{
   mutable std::mutex _mtx;
   std::map<int, std::shared_ptr<CacheData> > _map;
public:
   std::shared_ptr<CacheData> get(int key) const
   {
      std::unique_lock<std::mutex> l(_mtx);
      std::map<int, std::shared_ptr<CacheData> >::const_iterator it;
      if ((it = _map.find(key)) != _map.end())
      {
         auto val = it->second;
         return val;
      }
      return std::shared_ptr<CacheData>();
   } // auto unlock (unique lock, RAII)
   void insert(int key, std::shared_ptr<CacheData> value)
   {
      std::unique_lock<std::mutex> l(_mtx);
      _map.insert(std::make_pair(key, value));
   } // auto unlock (unique lock, RAII)
};
```

NB: mutable pour contrer le const

MultiThread-Safe

- Solution générique :
  - Un Mutex par instance, barrière commune à l'entrée, libérée en sortie pour les opérations membres (cf. moniteurs Java)
- Le plus souvent donc :
  - Un attribut typé **mutex**
    - Si les méthodes de la classe s'invoquent les unes les autres => utiliser un recursive_mutex
    - Le plus souvent il faut le déclarer **mutable** pour les accès dans les méthodes const
  - Instanciation d'un **unique_lock** dans chaque méthode
    - Simule « synchronized » de Java

Protection de Structures de Données

- La protection d'une variable structurée partagée :
  - Protéger les accès en écriture : pas d'autre écriture, ni lecture
  - Autoriser les accès partagés en lecture
    - Structures immuables, shared_ptr
    - Utilisation de locks spécifiques : reader/writer lock
- Attention à utiliser le même lock pout tous les accès à la variable/instance de classe
  - Mais un seul lock (big fat lock) produit une forte contention

Protection de Structures de Données

- On peut utiliser plusieurs locks de grain fin,
  - e.g. un lock par bucket de la table de hash,
  - Et même simplement des atomic dans certains cas
    - Structures « lock-free »
- Des stratégies distinguant les écritures et les lectures sont utiles
    - Lecteurs concurrents = OK
    - Supporté par shared_mutex dans C++14/17
    - Aidé par les annotations « const » en C++

Interblocages

Lock multiples

- Problème grave possible : interblocage
  - Existence de la possibilité d'acquérir une autre ressource quand on en détient une
  - Existence de cycles possibles

Exemple (deadlock)

```
void task_a () {
  foo.lock();
  bar.lock();
  std::cout << "task a\n";
  foo.unlock();
  bar.unlock();
}
```

```
void task_b () {
  bar.lock();
  foo.lock();
  std::cout << "task b\n";
  bar.unlock();
  foo.unlock();
}
```

```
int main ()
{  std::thread th1 (task_a);
   std::thread th2 (task_b);

   th1.join();
   th2.join();
}
```

Lock multiples

- Solution simple et résistante
  - Ordonner les locks avec un ordre total : e.g. foo < bar
  - Les acquisitions de locks suivent toutes le même ordre
- Le système peut ordonner totalement les locks
  - Fonction **lock**() nombre de locks arbitraires
  - La demande lock mentionne tous les locks utilisés dans l'ordre du système
- Attention à ne pas mélanger ce mécanisme et d'autres acquisitions progressives de locks, selon un ordre « à la main »…

Exemple (lock multiple)

```
void task_a () {
  std::lock (foo,bar);
  std::cout << "task a\n";
  foo.unlock();
  bar.unlock();
}
```

```
void task_b () {
  std::lock (bar,foo);
  std::cout << "task b\n";
  bar.unlock();
  foo.unlock();
}
```

```
int main ()
{
  std::thread th1 (task_a);
  std::thread th2 (task_b);

  th1.join();
  th2.join();

  return 0;
}
```

Try lock, Timed lock

- Synchronisations plus faibles
  - Possibilité d'agir si le lock n'est pas disponible
  - Possibilité de timeout
- try_lock :
  - Acquiert le lock si disponible (comme lock) et rend -1, sinon
  - Rend l'indice du lock ayant échoué dans la version multiple
- timed_lock
  - Se bloque en attente, mais pour une durée limitée.
  - Rend true ou false selon que le lock a été acquis

Try_lock

```
std::mutex foo,bar;

void task_a () {
  foo.lock();
  std::cout << "task a\n";
  bar.lock();
  // ...
  foo.unlock();
  bar.unlock();
}
```

```
int main ()
{
  std::thread th1 (task_a);
  std::thread th2 (task_b);

  th1.join();
  th2.join();

  return 0;
}
```

```
void task_b () {
  int x = try_lock(bar,foo);
  if (x==-1) {
    std::cout << "task b\n";
    // ...
    bar.unlock();
    foo.unlock();
  }
  else {
    std::cout << "[task b failed: mutex " <<
(x?"foo":"bar") << " locked]\n";
  }
}
```

Unique_lock

- Unique_lock : utilisation avancée
  - De base, similaire à un **lock_guard** mécanisme RAII
    - Le unique_lock acquiert le mutex (**lock**) à la déclaration, le relâche (**unlock)** à la destruction.
  - Acquisition du lock à la déclaration
    - Sauf si mode « différé »
    - std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex, std::defer_lock);
  - MAIS on peut encore faire lock/unlock sur l'objet
  - Il sera unlock en fin de vie de l'objet
- Permet de s'approprier le mutex
  - Utile en combinaison avec les conditions

Unique_lock

(exemple artificiel exhibant la syntaxe)
(std::defer pour utiliser unique_lock
ET la version lock « ordre système »)

```
std::mutex m_a, m_b, m_c;
int a =1, b=1, c = 1;
void update()
{
   {   // protège a
      std::unique_lock<std::mutex> lk(m_a);
      a++;
   }
   { // on ne lock pas tout de suite
     std::unique_lock<std::mutex> lk_b(m_b, std::defer_lock);
     std::unique_lock<std::mutex> lk_c(m_c, std::defer_lock);
     std::lock(lk_b, lk_c); //ordre système
     int tmp = c;
     c = b+c;
     b = tmp;
   }
}
```

```
int main()
{
  std::vector<std::thread> threads;
  for (unsigned i = 0; i < 12; ++i)
    threads.emplace_back(update);

  for (auto& t: threads)
    t.join();

  std::cout << a << "'th and " << a+1 <<
"'th Fibonacci numbers: "
          << b << " and " << c << '\n';
}
```

On veut échanger b et c
Typiquement => lock de b et c

Condition, notifications, attentes

Section Critique vs Notification

- Section critique, exclusion mutuelle :
  - Éviter aux thread d'écraser le travail des autres
  - Permettre de travailler sur des données partagées
- Notifications, conditions
  - Attendre (sans CPU) qu'un autre thread ait réalisé un traitement
  - Notifier quand un travail est terminé
  - *Coopération entre les threads !*
  - Mise en place de variables partagées, indiquant la fin du traitement qu'un thread teste et l'autre met à jour
    - Pas d'attente active
- Comme il y a nécessairement des variables partagées
  - Nécessité d'utiliser aussi un mutex

Attente et notification sur une condition

- **condition.wait (mutex):**
  - Libère le mutex
  - Bloque l'appelant et l'insère dans une file d'attente associée à la condition
  - A son réveil, il réacquiert atomiquement le mutex
  - Il poursuit son exécution
- **Condition.notify_one, condtion. notify_all**
  - Réveille un ou tous les threads en attente sur la condition
  - Si plusieurs, ils se réveillent en séquence pour acquérir le mutex un par un
- Le mutex doit être un **unique_lock**
  - Il est lock/unlock par le processus du wait

<condition> : exemple

```
// global variables
std::mutex m;
std::condition_variable cv;
std::string data;
bool ready = false;
bool processed = false;

void worker_thread()
{
    std::unique_lock<std::mutex>
                lk(m);
    while (! ready)
            cv.wait(lk);
    data += " after processing";
    // Send data back to main()
    processed = true;
    lk.unlock();
    cv.notify_one();
}
```

```
int main()  {
    std::thread worker(worker_thread);
    data = "Example data";

    {
        std::unique_lock<std::mutex> lk(m);
        ready = true;
        std::cout << "main() signals data ready \n";
    }
    cv.notify_one();
    // wait for the worker
    {
        std::unique_lock<std::mutex> lk(m);
        while (!processed)
            cv.wait(lk);
    }
    std::cout << "Back in main(), data = " << data ;
    worker.join();
}
```

Si **processed**, ne pas faire wai

Attendre une Condition

- Toujours mettre le test sous protection du mutex
  - if (! ready) { unique_lock<mutex> l(m) ; cv.wait(l); }
    - Incorrect !
    - Problème : ready est testé en dehors du mutex (pas atomique)
  - { unique_lock<mutex> l(m) ;

    if (! ready) { cv.wait(l); }

    } // fin bloc déclaration du lock
    - OK, en général c'est la bonne option :
    - On attend une condition qu'un autre thread doit activer => mutex est nécessaire et logique.

Attendre une Condition (boucle)

- En général il faut tester la condition dans une boucle

```
unique_lock<mutex> l(m) ;
if (! ready) { cv.wait(l); }  //PROBLEME
doIt() ;
ready = false;
```

- Si deux threads exécutent ce code, on peut faire *doIt()* sans que **ready**
  - Si notifyAll (on se fait doubler) ou globalement, si *ready* est redevenu faux

✓ => Refaire le test à chaque réveil sur la condition = while

```
unique_lock<mutex> l(m) ;
while (! ready) { cv.wait(l); }   // OK
doIt() ;
ready = false;
```

Attendre une Condition : version lambda

- Vu qu'en général la boucle while est la bonne option
  - Offrir cette version directement aux clients
- Version lambda de wait (*wait for test to be true*):
    - cond.wait(lock, test)
    - ⇔
    - while (!test) cond.wait(lock)
  - Test est souvent une lambda : [&]()->bool{ return ready;}
  - Attention à la négation : on attend que la condition devienne vraie
- Souvent préférer cette version qui évite certaines fautes fréquentes.

<condition> : lambda

```
// global variables
std::mutex m;
std::condition_variable cv;
std::string data;
bool ready = false;
bool processed = false;

void worker_thread()
{
    std::unique_lock<std::mutex>
                lk(m);
    cv.wait(lk, [&](){return ready;});
    data += " after processing";
    // Send data back to main()
    processed = true;
    lk.unlock();
    cv.notify_one();
}
```

```
int main()  {
    std::thread worker(worker_thread);
    data = "Example data";
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lk(m);
        ready = true;
        std::cout << "main() signals data ready \n";
    }
    cv.notify_one();
    // wait for the worker
    {
        std::unique_lock<std::mutex> lk(m);
        cv.wait(lk, [&](){return processed;});
    }

    std::cout << "Back in main(), data = " << data;
    worker.join();
}
```

Garanties : wait dans une boucle, test protégé par mutex

```
// globales
queue<int> queue;
mutex m;
condition_variable cond_var;


int main()
{
  std::thread prod1(producer);
  std::thread prod2(producer);
  std::thread cons1(consumer);
  std::thread cons2(consumer);

  prod1.join();  prod2.join();
  done = true;
  cons1.join(); cons2.join();
});
```

```
void producer() {
      for (int i = 0; i < 5; ++i) {
          this_thread::sleep_for(1s);
          unique_lock<mutex> lock(m);
          cout << "producing " << i << '\n';
          queue.push(i);
          cond_var.notify_one();
      }
}
void consumer() {
   unique_lock<mutex> lock(m);
   while (!queue.empty() || !done) {
     while (queue.empty()) {
            cond_var.wait(lock);
     }
     if (!queue.empty()) {
        std::cout << "consuming " <<
            queue.front() << '\n';
        queue.pop();
     }
} }
```

Producteurs/Consommateur v1 :

Wait et la terminaison :

consommateur bloqué à la fin du programme

```
// globales
queue<int> queue;
mutex m;
condition_variable cond_var;
bool done = false;


int main()
{
  std::thread prod1(producer);
  std::thread prod2(producer);
  std::thread cons1(consumer);
  std::thread cons2(consumer);

  prod1.join();  prod2.join();
  done = true;
  cond_var.notify_all();
  cons1.join(); cons2.join();
});
```

```
void producer() {
      for (int i = 0; i < 5; ++i) {
          this_thread::sleep_for(1s);
          unique_lock<mutex> lock(m);
          cout << "producing " << i << '\n';
          queue.push(i);
          cond_var.notify_one();
      }
}
void consumer() {
   unique_lock<mutex> lock(m);
   while (!queue.empty() || !done) {
      while (queue.empty()) {
          cond_var.wait(lock);
      }
      if (!queue.empty()) {
          std::cout << "consuming " <<
              queue.front() << '\n';
          queue.pop();
} } }
```

Mais le programme ne se termine pas toujours…cons bloqué sur wait

```
// globales
queue<int> queue;
mutex m;
condition_variable cond_var;
bool done = false;


int main()
{
  std::thread prod1(producer);
  std::thread prod2(producer);
  std::thread cons1(consumer);
  std::thread cons2(consumer);

  prod1.join();  prod2.join();
  done = true;
  cond_var.notify_all();
  cons1.join(); cons2.join();
});
```

```
void producer() {
      for (int i = 0; i < 5; ++i) {
          this_thread::sleep_for(1s);
          unique_lock<mutex> lock(m);
          cout << "producing " << i << '\n';
          queue.push(i);
          cond_var.notify_one();
      }
}
void consumer() {
   unique_lock<mutex> lock(m);
   while (!queue.empty() || !done) {
      while (queue.empty() && !done) {
        // on commute ici, avant wait
        cond_var.wait(lock); // attente infinie
      }
      if (!queue.empty()) {
          std::cout << "consuming " <<
              queue.front() << '\n';
          queue.pop();
} } }
```

Attente relaxée, mais done mal protégé dans main

```
// globales
queue<int> queue;
mutex m;
condition_variable cond_var;
bool done = false;


int main()
{
  std::thread prod1(producer);
  std::thread prod2(producer);
  std::thread cons1(consumer);
  std::thread cons2(consumer);

  prod1.join();  prod2.join();
  {
  unique_lock<mutex> l(m);
  done = true; cond_var.notify_all();
  }
  cons1.join(); cons2.join();
});
```

```
void producer() {
      for (int i = 0; i < 5; ++i) {
          this_thread::sleep_for(1s);
          unique_lock<mutex> lock(m);
          cout << "producing " << i << '\n';
          queue.push(i);
          cond_var.notify_one();
      }
}
void consumer() {
   unique_lock<mutex> lock(m);
   while (!queue.empty() || !done) {
      while (queue.empty() && !done) {
            cond_var.wait(lock);
      }
      if (!queue.empty()) {
          std::cout << "consuming " <<
              queue.front() << '\n';
          queue.pop();
} } }
```

Version OK : attente relaxée

Condition : conclusion

- Des versions **wait** plus faibles avec timeout sont possibles
  - wait_for(duree max), wait_until(date)
- Des versions pour n'importe quel mutex (pas juste un unique_lock)
  - condition_variable_any
- Avec les conditions et les mutex on construit les synchronisations
  - Ce sont les briques de base
  - Atomic vient compléter à niveau plus fin, et est utilisé pour implanter les mutex et conditions
- Ne jamais faire d'attente active
  - Utiliser des conditions
  - Protéger les variables partagées avec des mutex
- Retour sur classe MT-safe
  - Opérations bloquantes implantées par des conditions

Classes de synchronisation

- Classe de synchronisation
  - MT safe : protégée par mutex et ou atomic
  - Certaines opérations vont être bloquantes !
    - On attend les autres
  - En général, présence d'un mutex et d'une condition
- Exemples :
  - Une barrière de rendez-vous :
    - les N premiers attendent, le N+1 éme débloque tout le monde
  - Une pile ou une queue partagée
    - Bloquant sur pop si vide, Bloquant sur push si plein
    - On réveille les threads bloqués quand on pop sur plein/push sur vide

Nombreux autres exemples possibles en exercice…

La lib Pthread

Positionnement, Historique

- Librairie POSIX pour les threads
  - Standardisée
  - API en C offerte par le système pour réaliser la concurrence
  - Mode « User Space » pour les systèmes sans thread natifs
  - Implantée sur beaucoup d'OS (portabilité)
- Gros impact sur le développement des API de concurrence dans les langages
  - Si ce n'est pas réalisable sur Pthread, problème. E.g. threads dans C11
  - Cf abstractions fournies dans e.g. Java, thread C+11

- La référence : le man, partir de « man 7 pthreads » et naviguer

Les Objets Pthread

Orienté objet:

- ***pthread_t*** : identifiant d'une *thread*
- ***pthread_attr_t*** : attribut d'une *thread*
- ***pthread_mutex_t*** : *mutex* (exclusion mutuelle)
- ***pthread_mutexattr_t*** : attribut d'un *mutex*
- ***pthread_cond_t*** : variable de condition
- ***pthread_condattr_t*** : attribut d'une variable de condition
- ***pthread_key_t*** : clé pour accès à une donnée globale réservée
- ***pthread_once_t*** : initialisation unique

Fonctions Pthreads

Préfixe

- ✓ Enlever le *_t* du type de l'objet auquel la fonction s'applique.

Suffixe (exemples)

- ✓ ***_init*** : initialiser un objet.
- ✓ ***_destroy***: détruire un objet.
- ✓ ***_create*** : créer un objet.
- ✓ ***_get****attr* : obtenir l'attribut *attr* des attributs d'un objet.
- ✓ ***_set****attr* : modifier l'attribut *attr* des attributs d'un objet.

Exemples :

- ✓ *pthread_create* : crée une thread (objet *pthread_t*).
- ✓ *pthread_mutex_init* : initialise un objet du type *pthread_mutex_t*.

Gestion des Threads

Une *Pthread* :

- ✓ est identifiée par un *ID* unique.
- ✓ exécute une fonction passée en paramètre lors de sa création.
- ✓ possède des attributs.
- ✓ peut se terminer (*pthread_exit*) ou être annulée par une autre thread (*pthread_cancel*).
- ✓ peut attendre la fin d'une autre thread (*pthread_join*).

Une *Pthread* possède son propre masque de signaux et signaux pendants.

La création d'un processus donne lieu à la création de la thread main.

- ✓ Retour de la fonction *main* entraîne la terminaison du processus et par conséquent de toutes les threads de celui-ci.

Création des Threads

Création d'une thread avec les attributs `attr` en exécutant `fonc` avec `arg` comme paramètre :

```
int pthread_create(pthread_t *tid, pthread_attr_t *attr,
                   void * (*fonc) (void *), void *arg);
```

- ✓ **attr :** si NULL, la thread est créée avec les attributs par défaut.
- ✓ **code de renvoi** :
  - 0 en cas de succès.
  - En cas d'erreur une valeur non nulle indiquant l'erreur:
    - EAGAIN : manque de ressource.
    - EPERM : pas la permission pour le type d'ordonnancement demandé.
    - EINVAL : attributs spécifiés par *attr* ne sont pas valables.

Création : paramètres

- Un seul argument prévu, typé « void * »
  - Créer un struct qui héberge tous les paramètres nécessaires
    - struct threadargs { int x; double z; …}
    - Passer son addresse à pthread create
    - Commencer la fonction du thread par un cast :
      - struct threadargs * argTypé = (struct threadargs *) arg;
- La valeur de retour du thread est un int
  - Comme un processus
  - En général, plutôt passer l'endroit où écrire le résultat dans les arguments

Thread principale x Threads annexes

La création d'un processus donne lieu à la création de la *thread principale (thread main)*.

- ✓ Un retour à la fonction *main* entraîne la terminaison du processus et par conséquent la terminaison de toutes ses threads.

Une thread créée par la primitive *pthread_create* dans la fonction main est appelée une *thread annexe*.

- ✓ Terminaison :
  - Retour de la fonction correspondante à la thread ou appel à la fonction *pthread_exit.*
    - aucun effet sur l'existence du processus ou des autres threads.
- ✓ L'appel à *exit* ou *_exit* par une thread annexe provoque la terminaison du processus et de toutes les autres threads.

Exclusion Mutuelle – Mutex (2)

Création/Initialisation (2 façons) :

- ✓ **Statique:**

  pthread_mutex_t m = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

- ✓ **Dynamique:**

  int pthread_mutex_init(pthread_mutex_t *m, pthread_mutex_attr *attr);

  - Attributs :
    - initialisés par un appel à :

      int pthread_mutexattr_init(pthread_mutex_attr *attr);
  - NULL : attributs par défaut.
  - **Exemple :**

    pthread_mutex_t sem;
    /* attributs par défaut */
    pthread_mutex_init(&sem, NULL);

Exclusion Mutuelle (3)

Destruction :

int pthread_mutex_destroy (pthread_mutex_t *m);

Verrouillage :

int pthread_mutex_lock (pthread_mutex_t *m);

- Bloquant si déjà verrouillé

int pthread_mutex_trylock (pthread_mutex_t *m);

- Renvoie EBUSY si déjà verrouillé

Déverrouillage:

int pthread_mutex_unlock (pthread_mutex_t *m);

Exemple 7 - exclusion mutuelle

```
#define _POSIX_SOURCE 1
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

pthread_mutex_t mutex =
PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
int cont =0;

void *sum_thread (void *arg) {
  pthread_mutex_lock (&mutex);
  cont++;
  pthread_mutex_unlock (&mutex);

  pthread_exit ((void*)0);
}
```

```
int main (int argc, char ** argv) {
  pthread_t tid;

 if  (pthread_create (&tid, NULL, sum_thread,
                              NULL) != 0) {
      printf("pthread_create"); exit (1);
    }

     pthread_mutex_lock (&mutex);
     cont++;
     pthread_mutex_unlock (&mutex);

     pthread_join (tid, NULL);
     printf ("cont : %d\n", cont);

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Les conditions : initialisation (2)

Création/Initialisation (2 façons) :

- ✓ **Statique:**

```
pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
```

- ✓ **Dynamique:**

```
int pthread_cond_init(pthread_cond_t *cond,
                      pthread_cond_attr *attr);
```

  - **Exemple :**

```
pthread_cond_t  cond_var;
/* attributs par défaut */
pthread_cond_init (&cond_var, NULL);
```

Conditions : attente (3)

```
int pthread_cond_wait(pthread_cond_t *cond,
                      pthread_mutex_t *mutex);
```

Utilisation:

```
pthread_mutex_lock(&mut_var);
pthread_cond_wait(&cond_var, &mut_var);
…..
pthread_mutex_unlock(&mut_var);
```

- ✓ Une thread ayant obtenu un *mutex* peut se mettre en attente sur une variable condition associée à ce *mutex*.
- ✓ **pthread_cond_wait:**
  - Le mutex spécifié est libéré.
  - La thread est mise en attente sur la variable de condition *cond*.
  - Lorsque la condition est signalée par une autre thread, le *mutex* est acquis de nouveau par la thread en attente qui reprend alors son exécution.

Conditions : notification (4)

Une thread peut signaler une condition par un appel aux fonctions :

```
int pthread_cond_signal(pthread_cond_t *cond);
```

- ✓ réveil d'une thread en attente sur *cond*.

```
int pthread_cond_broadcast(pthread_cond_t *cond);
```

- ✓ réveil de toutes les threads en attente sur *cond*.

Si aucune thread n'est en attente sur *cond* lors de la notification, cette notification sera perdue.

Exemple 8 - Conditions

```
#define _POSIX_SOURCE 1
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

pthread_mutex_t mutex_fin =
       PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
pthread_cond_t  cond_fin =
     PTHREAD_COND_INITIALIZER;

void *func_thread (void *arg) {
  printf ("tid: %d\n", (int)pthread_self());

  pthread_mutex_lock (&mutex_fin);
  pthread_cond_signal (&cond_fin);
  pthread_mutex_unlock (&mutex_fin);
  pthread_exit ((void *)0);
}
```

```
int main (int argc, char ** argv) {
  pthread_t tid;

  pthread_mutex_lock (&mutex_fin);
if  (pthread_create (&tid , NULL, func_thread,
     NULL) != 0) {
       printf("pthread_create erreur\n"); exit (1);
    }
    if (pthread_detach (tid) !=0 ) {
      printf ("pthread_detach erreur"); exit (1);
    }
    pthread_cond_wait(&cond_fin,&mutex_fin);
    pthread_mutex_unlock (&mutex_fin);

    printf ("Fin thread \n");

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Exemple 9 - Conditions

```
#define _POSIX_SOURCE 1
#include <pthread.h>
…
int flag=0;
pthread_mutex_t m =
       PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
pthread_cond_t  cond=
     PTHREAD_COND_INITIALIZER;

void *func_thread (void *arg) {
  pthread_mutex_lock (&m);
  while (! flag) {
     pthread_cond_wait (&cond,&m);
  }
  pthread_mutex_unlock (&m);
  pthread_exit ((void *)0);
}
```

```
int main (int argc, char ** argv) {
  pthread_t tid;

if  ((pthread_create (&tid1 , NULL, func_thread,
      NULL) != 0) | |   (pthread_create (&tid2 ,
      NULL, func_thread, NULL) != 0))  {
        printf("pthread_create erreur\n"); exit (1);
     }

   sleep(1);
    pthread_mutex_lock (&m);
     flag=1;
    pthread_cond_broadcast(&cond,&m);
    pthread_mutex_unlock (&m;

  pthread_join (tid1, NULL);
  pthread_join (tid2, NULL);

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Pthread vs thread C++11

- L’alignement n’est pas parfait
  - Identifiant du pthread,
  - valeur de retour int (comme un processus),
  - cancel de pthread …
  - Pthread donne accès à plus bas niveau avec les attributes
  - Pthread est l’archétype pour la concurrence
- Le thread c++11 est
  - Portable
  - Relativement facile d’emploi
  - Librairies étendues pour la concurrence, atomic intégré
  - Extensions rapides au fil des standards