Programmation multi-paradigmes en C++

Session #11 : Vers la programmation fonctionnelle en C++

Julien Deantoni, Thomas Soucheyre,
Stephane Janel, Ken-Patrick Lehrmann,
Ludovic Tessier, Leandro Fontoura
Cupertino, Kevin Yeung

Agenda

01 Fonctions anonymes (lambda)

02 Bibliothèque *algorithm*

03 Bibliothèque *ranges* (C++20)

1.

Fonctions anonymes (lambda)

Utilisation des algorithmes de la STL

- La plupart des algorithmes de la STL ont besoin d'objets fonction (foncteurs)


```
template< class ForwardIt, class UnaryPred >
 ForwardIt remove_if( ForwardIt first, ForwardIt last, UnaryPred p );
```

```
template< class InputIt, class UnaryPred >
 InputIt find_if( InputIt first, InputIt last, UnaryPred p );
```

Utilisation des algorithmes de la STL

- La plupart des algorithmes de la STL ont besoin d'objets fonction (foncteurs)

Catégorie d'itérateur requise a minima

```
template< class ForwardIt, class UnaryPred >
 ForwardIt remove_if( ForwardIt first, ForwardIt last, UnaryPred p );
```

```
template< class InputIt, class UnaryPred >
 InputIt find_if( InputIt first, InputIt last, UnaryPred p );
```

Prédicat unaire = fonction avec un seul paramètre et qui retourne un booléen

Utilisation des algorithmes de la STL

- La plupart des algorithmes de la STL ont besoin d'objets fonction (foncteurs)

Catégorie d'itérateur requise a minima

```
template< class ForwardIt, class UnaryPred >
 ForwardIt remove_if( ForwardIt first, ForwardIt last, UnaryPred p );
```

```
template< class InputIt, class UnaryPred >
 InputIt find_if( InputIt first, InputIt last, UnaryPred p );
```

Prédicat unaire = fonction avec un seul paramètre et qui retourne un booléen

```
template< class RandomIt, class Compare >
void sort( RandomIt first, RandomIt last, Compare comp );
```

Fonction de comparaison avec 2 paramètres et qui retourne un booléen valant « true » si le premier paramètre est mal ordonné par rapport au second paramètre

Exemple d'utilisation de *std::find_if*

_ Exemple simple

```
bool is_even(int i) {
  return i % 2 == 0;
}

bool contains_even_numbers(const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), is_even);
}
```

La fonction is_even respecte les conditions d'un prédicat unaire

Exemple d'utilisation de *std::find_if*

_ Exemple simple

```
bool is_even(int i) {
  return i % 2 == 0;
}

bool contains_even_numbers(const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), is_even);
}
```

La fonction is_even respecte les conditions d'un prédicat unaire

_ Comment généraliser ?

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), ??);
}
```

Besoin d'une fonction avec 2 paramètres, donc ce n'est plus un prédicat unaire

Foncteur

- Foncteur = struct définissant l'opérateur () qui permet d'appeler l'instance comme une fonction

```
struct DivisibleBy {
  bool operator()(int i) const {
    return _n == 0 ? false : i % _n == 0;
  }
  int _n;
};
```

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  DivisibleBy divisible_by_n{n};
  for (int i : v) {
    if (divisible_by_n(i)) {
      return true
    }
  }
  return false;
}
```

Instanciation du foncteur

Appel de l'opérateur ()

Foncteur

_ Foncteur = struct définissant l'opérateur () qui permet d'appeler l'instance comme une fonction

```
struct DivisibleBy {
  bool operator()(int i) const {
    return _n == 0 ? false : i % _n == 0;
  }
  int _n;
};
```

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  DivisibleBy divisible_by_n{n};
  for (int i : v) {
    if (divisible_by_n(i)) {
      return true
    }
  }
  return false;
}
```

Instanciation du foncteur

Appel de l'opérateur ()

Equivalent avec *std::find_if*

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), DivisibleBy{n});
}
```

Foncteur

_ Foncteur = struct définissant l'opérateur () qui permet d'appeler l'instance comme une fonction

```
struct DivisibleBy {
  bool operator()(int i) const {
    return _n == 0 ? false : i % _n == 0;
  }
  int _n;
};
```

Plutôt fastidieux à écrire, n'est-ce pas ?

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  DivisibleBy divisible_by_n{n};
  for (int i : v) {
    if (divisible_by_n(i)) {
      return true
    }
  }
  return false;
}
```

Instanciation du foncteur

Appel de l'opérateur ()

Equivalent avec *std::find_if*

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), DivisibleBy{n});
}
```

Fonction anonyme

- Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression
  - https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda
- Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`

Fonction anonyme

_ Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression

- https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda

_ Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`

_ Exemple

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), [n](int i) -> bool {
    return n == 0 ? false : i % n == 0;
  });
}
```

Fonction anonyme

- Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression
  - https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda
- Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`
- Exemple

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), [n](int i) -> bool {
    return n == 0 ? false : i % n == 0;
  });
}
```

Capture de la variable n par valeur (copie)

Fonction anonyme

_ Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression

- https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda

_ Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`

_ Exemple

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), [n](int i) -> bool {
    return n == 0 ? false : i % n == 0;
  });
}
```

Paramètre de la fonction

Capture de la variable n par valeur (copie)

Fonction anonyme

_ Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression

- https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda

_ Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`

_ Exemple

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), [n](int i) -> bool {
    return n == 0 ? false : i % n == 0;
  });
}
```

Paramètre de la fonction

Type de la valeur retournée (optionnel)

Capture de la variable n par valeur (copie)

Fonction anonyme

_ Fonction anonyme / fonction lambda / lambda expression

- https://en.cppreference.com/w/cpp/language/lambda

_ Syntaxe de base: `[captures] (paramètres) { corps de la fonction }`

_ Exemple

```
bool contains_numbers_divisible_by_n(int n, const std::vector<int> &v) {
  return std::any_of(v.begin(), v.end(), [n](int i) -> bool {
    return n == 0 ? false : i % n == 0;
  });
}
```

Paramètre de la fonction

Type de la valeur retournée (optionnel)

Capture de la variable n par valeur (copie)

_ Possibilité d'assigner l'expression à une variable

```
auto divisible_by_n = [n](int i) { return n == 0 ? false : i % n == 0; };

std::function<bool(int)> f = [n](int i) { return n == 0 ? false : i % n == 0; };
```

Fonction anonyme

_ Captures

- [] aucune capture de variable extérieure
- [n, a] capture les variables n et a par copie
- [&n] capture la variable n par référence
- [=] capture toutes les variables par copie
- [&] capture toutes les variables par référence

= et & sont appelés « capture-defaults » et doivent être situés en premier dans la liste

- [this] capture l'instance de la classe courante et tous ses membres par référence
- [*this] capture l'instance de la classe courante et tous ses membres par copie (depuis C++17)
- [=, &i] capture la variable i par référence et toutes les autres variables par valeur
  - Attention: « this » est capturé par référence
  - https://isocpp.github.io/CppCoreGuidelines/CppCoreGuidelines#f54-when-writing-a-lambda-that-captures-this-or-any-class-data-member-dont-use--default-capture
- [&, i] capture la variable i par valeur et toutes les autres variables par référence

_ Bonne pratique

- Lisibilité : pas plus de 4 lignes

2.

Bibliothèque *algorithm*

Bibliothèque *algorithm*

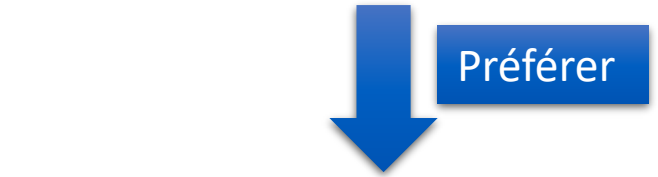
- Fournit des fonctions de base pour la plupart des algorithmes
  - Recherche
  - Tri
  - Manipulation sur des objets itérables (copie, suppression, transformation, …)
- A utiliser sans modération
  - Aide à la compréhension du code (augmente l'abstraction)
  - Evite les erreurs (par exemple, supprimer tous les nombres impairs d'un vecteur)
  - Garantie une complexité algorithmique
- Seul inconvénient : écriture peu concise à cause des itérateurs
- Documentation complète
  - https://en.cppreference.com/w/cpp/algorithm
- Les utilisations les plus courantes suivent

Algorithmes de recherche

std::find / std::find_if

_*std::find* et *std::find_if* retournent un itérateur

```
bool contains(int value, const std::vector<int> &container) {
  for (int i : container) {
    if (i == value) {
      return true;
    }
  }
  return false;
}
```

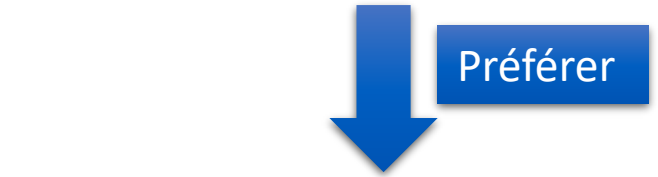



```
bool contains(int value, const std::vector<IntKeyValue> &container) {
  return std::find(container.begin(), container.end(), value) != container.end();
}
```

Algorithmes de recherche

std::all_of / std::none_of / std::any_of

```
bool are_all_positive(const std::vector<int> &v) {
  for (int i : v) {
    if (i <= 0) {
      return false;
    }
  }
  return true;
}
```




```
bool are_all_positive = std::all_of(v.begin(), v.end(), [](int i) { return i > 0; });
bool are_all_positive = std::none_of(v.begin(), v.end(), [](int i) { return i <= 0; });
bool contains_negative = std::any_of(v.begin(), v.end(), [](int i) { return i <= 0; });
```

Algorithmes de recherche

std::count / std::count_if

```
int count_even_number(const std::vector<int> &v) {
  int nb_even = 0;
  for (int i : v) {
    if (i % 2 == 0) {
      ++nb_even;
    }
  }
  return nb_even;
}
```


```
int nb_even = std::count_if(v.begin(), v.end(), [](int i) {
  return i % 2 == 0;
});
```

Algorithmes de tri et opérations associées

_ std::sort / std::stable_sort

- Quand aucune fonction de comparaison n'est fournie, utilisation de *std::less*

```
using KVPair = std::pair<int, int>;
std::vector<KVPair> container{{5, 0}, {3, 1}, {3, 2}, {1, 3}};

const auto lower_key = [](const KVPair &lhs, const KVPair &rhs) { return lhs.first < rhs.first; };
std::sort(container.begin(), container.end(), lower_key);
```

Algorithmes de tri et opérations associées

_ std::sort / std::stable_sort

- Quand aucune fonction de comparaison n'est fournie, utilisation de *std::less*

```
using KVPair = std::pair<int, int>;
std::vector<KVPair> container{{5, 0}, {3, 1}, {3, 2}, {1, 3}};

const auto lower_key = [](const KVPair &lhs, const KVPair &rhs) { return lhs.first < rhs.first; };
std::sort(container.begin(), container.end(), lower_key);
```

_ std::lower_bound / std::upper_bound / std::binary_search (recherche dichotomique)

```
std::vector<int> v{1, 2, 3, 4};

std::lower_bound(v.begin(), v.end(), 2); // == v.begin() + 1
std::lower_bound(v.begin(), v.end(), 0); // == v.begin()

std::upper_bound(v.begin(), v.end(), 2); // == v.begin() + 2
std::upper_bound(v.begin(), v.end(), 0); // == v.begin()

std::binary_search(v.begin(), v.end(), 2); // == true
std::binary_search(v.begin(), v.end(), 0); // == false
```

Recherche le premier élément x tel que x >= 2

Recherche le premier élément x tel que x > 2

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Filtrer des éléments

_*std::copy_if* pour filtrer et copier vers un nouveau conteneur

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
std::vector<int> v_even;

// copy even numbers
std::copy_if(v.begin(), v.end(), std::back_inserter(v_even), [](int i) { return i % 2 == 0; }));
```

Construit un foncteur qui appelle la fonction membre push_back

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Filtrer des éléments

_*std::copy_if* pour filtrer et copier vers un nouveau conteneur

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
std::vector<int> v_even;

// copy even numbers
std::copy_if(v.begin(), v.end(), std::back_inserter(v_even), [](int i) { return i % 2 == 0; }));
```

Construit un foncteur qui appelle la fonction membre push_back

_*std::remove_if* + *erase* pour modifier directement le conteneur

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};

// remove odd numbers
v.erase(std::remove_if(v.begin(), v.end(), [](int i) { return i % 2 != 0; }), v.end());
```

std::remove_if place tous les éléments à supprimer à la fin du conteneur et retourne un itérateur vers le premier élément à supprimer

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Transformer des éléments

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
std::vector<std::string> v_string;

std::transform(v.begin(), v.end(), std::back_inserter(v_string), [](int i) {
  return std::to_string(i);
});
```

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Accumuler des éléments (sous-bibliothèque *numeric*)

_std::accumulate

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};

int sum = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 0); // == 10

int product = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 1, std::multiplies<>{}); // == 24
```

Valeur initiale

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Accumuler des éléments (sous-bibliothèque *numeric*)

_std::accumulate

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};

int sum = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 0); // == 10

int product = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 1, std::multiplies<>{}); // == 24
```

Valeur initiale

_std::reduce

- Equivalent à *std::accumulate* à l'exception que les éléments peuvent être groupés et réarrangés de manière arbitraire
- Le résultat est **non déterministe** si l'opération n'est pas associative ou pas commutative (comme l'addition des nombres flottants)

Algorithmes de manipulation de conteneurs

std::inner_product (sous-bibliothèque *numeric*)

_ Utile pour le produit matriciel

```
std::vector<int> a{1, 4, 2, 3};
std::vector<int> b{4, 1, 2, 0};

int r = std::inner_product(a.begin(), a.end(), b.begin(), 0);
// r = 1 * 4 + 4 * 1 + 2 * 2 + 3 * 0 = 12
```

Valeur initiale

_ *std::transform_reduce* est équivalent mais a les mêmes limitations que *std::reduce*

Algorithmes de manipulation de conteneurs

Mélanger aléatoirement des éléments

```
std::vector<int> v(100);
std::iota(v.begin(), v.end(), 0);


std::random_device rd;
std::shuffle(v.begin(), v.end(), std::mt19937(rd()));
```

Crée un vecteur rempli avec des entiers de 0 à 99

3.

Bibliothèque *ranges* (C++20)

Bibliothèque *ranges*

- Extension et généralisation de la bibliothèque *algorithm*
  - Motivation première d'avoir une syntaxe plus concise
- Un « range » est un concept qui représente une séquence itérable, identifiée par un itérateur de début et une valeur spéciale de fin
- Une « view » est un objet
  - Respectant le concept de « range »
  - Qui se construit, copie, déplace, détruit en temps constant
  - Exemple
    - Une paire d'itérateurs [begin, end)
    - Un itérateur et un prédicat de fin [begin, predicate)
- La plupart des algorithmes utilisant des paires d'itérateurs ont désormais un équivalent qui accepte un objet respectant le concept de « range »
- Les adaptateurs (range adaptors) sont des « views » qui peuvent être assemblées pour former des « pipelines » évaluées au fur et à mesure qu'on itère (**lazy evaluation**)
- Documentation complète
  - https://en.cppreference.com/w/cpp/ranges

Algorithmes

Exemples

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
auto value_it = std::ranges::find(v, 2);
```

Conteneur utilisé directement en paramètre

```
bool are_all_positive = std::ranges::all_of(v, [](int i) { return i > 0; });
```

```
auto [rm_begin, rm_end] = std::ranges::remove_if(v, [](int i) { return i % 2 != 0; });
v.erase(rm_begin, rm_end);
```

remove_if retourne un « range »
Préférer *std::erase_if* pour un vecteur

```
std::vector<std::string> v_string;
std::ranges::transform(v, std::back_inserter(v_string), [](int i) {
  return std::to_string(i);
});
```

```
std::optional<std::string> s = std::ranges::fold_left_first(v_string,
  [](std::string a, const std::string &b) { return std::move(a) + '-' + b; }
);
```

std::ranges::fold_left remplace *std::accumulate* (C++23)

Adaptateurs

Pas besoin de conteneur intermédiaire comme pour *copy_if*

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
for (int i : std::views::filter(v, [](int i) { return i % 2 == 0; })) {
  std::cout << i << std::endl;
}
```

Retourne « true » pour les éléments à garder

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
for (int i : std::views::transform(v, [](int i) { return i * i; })) {
  std::cout << i << std::endl;
}
```

```
std::vector<int> v{1, 4, 2, 3};
for (const auto [index, num] : std::views::enumerate(v)) {
  std::cout << std::format("Number {} is at index {}\n", num, index);
}
```

C++23

```
std::vector<int> keys{0, 1, 2, 3};
std::vector<int> values{1, 4, 2, 3};
for (const auto [k, v] : std::views::zip(keys, values)) {
  std::cout << std::format("Key {} has value {}\n", k, v);
}
```

C++23

Pipelines d'adaptateurs

```
auto even = [](int i) { return i % 2 == 0; };
auto square = [](int i) { return i * i; };

for (int i = 0; i < 6; ++i) {
  if (even(i)) {
    std::cout << square(i) << std::endl;
  }
}
```

Equivalent, décomposition en opérations simples

```
for (int i : std::views::iota(0, 6) | std::views::filter(even) | std::views::transform(square)){
  std::cout << i << std::endl;
}
```

Pipelines d’adaptateurs

Palindrome avec la bibliothèque *ranges*

```
bool palindrome(std::string_view s) {
  const auto not_a_space = [](auto c) { return c != ' '; };
  return std::ranges::equal(
    s | std::views::filter(not_a_space),
    s | std::views::filter(not_a_space) | std::views::reverse
  );
}
```