

PARTIE V

Métaprogrammation par les génériques

Bruno Bachelet

Loïc Yon

Métaprogrammation par les génériques (1/2)

- Repose sur plusieurs mécanismes
- Généricité / patrons de composants
 - En C++: les *templates*
- Instanciation des patrons sans surcoût
 - Au plus proche d'un code dédié
 - En C++: chaque instanciation d'un générique \Rightarrow code dédié
 - En Java: mécanisme de «*type erasure*» \Rightarrow pas de code dédié
- Spécialisation «statique»
 - Possibilité de spécialisation d'un composant générique
 - Basée sur le type (ou la valeur statique) des paramètres génériques

Métaprogrammation par les génériques (2/2)

- Objectifs
 - ❑ Composants génériques (au sens large)
 - ❑ Sans ou avec peu de baisse de performance

- Le génie logiciel nous apprend que généralement
 - ❑ La généricité (au sens large) a un coût
 - ❑ Recherche d'un compromis entre généricité et efficacité

- Mais avec la programmation générique
 - ❑ Beaucoup de travail à la compilation \Rightarrow peu de pertes

Quelques utilisations possibles

- Evaluation partielle
 - ❑ Optimisation de calculs
 - ❑ Effectuer une partie d'un calcul à la compilation
- Classes de traits ou politiques
 - ❑ Fournir des informations sur les types
 - ❑ Ajout non invasif de propriétés ou fonctionnalités
- Métafonctions
 - ❑ Fonctions statiques qui produisent du code dynamique
 - ❑ Ecrire des algorithmes statiques
- Structures de types
 - ❑ Stockage de types (au lieu de données)
 - ❑ Manipuler des ensembles de types
- Patrons d'expressions
 - ❑ Représentation d'une expression sous forme d'objets
 - ❑ Définition d'un langage spécifique embarqué dans C++

- Calcul = partie statique + partie dynamique
- C++ = langage à 2 niveaux
 - Code dynamique: compilé puis exécuté
 - Code statique: interprété à la compilation
 - Basé sur les *templates* + des mécanismes statiques
 - Turing-complet \Rightarrow pas de limite théorique au niveau algorithmique
- Programmation générique \Rightarrow évaluation statique d'un calcul
 - L'évaluation statique est généralement partielle
 - On cherchera à effectuer le maximum de calcul statiquement
- Efficacité accrue à l'exécution
 - Peut être très supérieure à l'évaluation dynamique

- Exemple: factorielle $n!$

- Version dynamique

```
long factorielle(int n) {  
    long r = 1;  
    for (int i = 2; i <= n; i++) r *= i;  
    return r;  
}
```

- Tout se passe à l'exécution

- `y = factorielle(5);`

- Paramètre statique \Rightarrow possibilité de calcul à la compilation

Evaluation partielle (3/6)

- Version statique, avec fonction générique

```
template <int N> inline long factorielle(void)
{ return (N * factorielle<N-1>()); }
```

```
template <> inline long factorielle<0>(void)
{ return 1; }
```

- Développement du calcul à la compilation

- `y = factorielle<5>();` \Rightarrow `y = 120;`

- Défauts de cette solution

- Instanciation partielle interdite
- L'*inlining* peut être refusé
 - Exemple: code de la fonction trop long

Voir l'assembleur généré avec Compiler Explorer: http://godbolt.org/z/9w_0Br

Evaluation partielle (4/6)

- Version statique, avec classe générique

```
template <int N> class Factorielle {  
    public: static const long valeur  
            = N * Factorielle<N-1>::valeur;  
};
```

```
template <> class Factorielle<0> {  
    public: static const long valeur = 1;  
};
```

- Développement du calcul à la compilation

- $y = \text{Factorielle}\langle 5 \rangle::\text{valeur} \Rightarrow y = 120;$

- Avantages de cette solution

- Instanciation partielle possible
- Pas de problème d'*inlining*

- Conseil: privilégier l'utilisation d'une structure

- Membres et héritage publics par défaut \Rightarrow syntaxe allégée

- Exemple d'évaluation partielle: puissance x^n

- Version dynamique

```
double puissance(double x,int n) {  
    double r = 1;  
    for (int i = 1; i <= n; ++i) r *= x;  
    return r;  
}
```

- n est souvent une valeur statique
⇒ évaluation statique d'une partie du calcul

Evaluation partielle (6/6)

- Version partiellement statique

```
template <int N> struct Puissance {  
    static double calculer(double x)  
    { return (Puissance<N-1>::calculer(x) * x); }  
};
```

```
template <> struct Puissance<0> {  
    static double calculer(double) { return 1.0; }  
};
```

- Une partie du développement du calcul à la compilation

- `y = Puissance<5>::calculer(1.2);`
 \Rightarrow `y = puissance_5(1.2);`

- `double puissance_5(double x)`
 `{ return x*x*x*x*x; }`

Voir l'assembleur généré avec Compiler Explorer: <https://godbolt.org/z/yKleIo>

Classes de traits ou politiques (1/4)

- Ajout non invasif de propriétés ou fonctionnalités à un type
- Trait = propriété / caractéristique
 - Attribut statique ou type interne
- Politique = fonctionnalité / comportement
 - Méthode statique
- Permet de conserver une indépendance vis-à-vis d'un type
- Tout en produisant un code dédié
 - Classe de traits \Rightarrow informations spécifiques
 - Classe de politiques \Rightarrow comportements adaptés

Classes de traits ou politiques (2/4)

- Exemple: savoir si un type représente un entier

- Définition d'une classe de traits

```
template <typename T> struct EstEntier {  
    static const bool valeur = false;  
};
```

```
template <> struct EstEntier<int> {  
    static const bool valeur = true;  
};
```

```
template <> struct EstEntier<long> {  
    static const bool valeur = true;  
};
```

- Utilisation de la classe de traits

```
if (EstEntier<X>::valeur) // code 1  
else // code 2
```

Classes de traits ou politiques (3/4)

- Problématique: afficher le contenu d'un vecteur

```
template <typename T>
void afficher(const vector<T> & v) {
    for (unsigned i = 0; i < v.size(); ++i)
        cout << v[i] << " ";
}
```

- Le résultat n'est pas forcément celui attendu
 - $T = \text{int} \Rightarrow$ affichage entiers
 - $T = \text{int}^* \Rightarrow$ affichage pointeurs
- Objectif: afficher des valeurs qu'il y ait indirection ou non
 - La politique d'accès diffère suivant la nature de T
 - Proposition d'une classe de politiques

Classes de traits ou politiques (4/4)

- Définition de la classe de politiques

```
template <typename T> struct AccesLecture {  
    static const T & getValeur  (const T & v) { return v; }  
    static const T * getPointeur(const T & v) { return &v; }  
};
```

```
template <typename T> struct AccesLecture<T *> {  
    static const T & getValeur  (const T * p) { return *p; }  
    static const T * getPointeur(const T * p) { return p; }  
};
```

- Utilisation de la classe de politiques

```
template <typename T>  
void afficher(const vector<T> & v) {  
    for (unsigned i = 0; i < v.size(); ++i)  
        cout << AccesLecture<T>::getValeur(v[i]) << " ";  
}
```

- Métafonction = classe générique agissant comme une fonction
 - Permet l'exécution statique d'un algorithme
- Élément central de la métaprogrammation par génériques
 - Métaprogrammation = code qui génère du code
 - Métafonction = fonction statique qui produit du code dynamique
- Reçoit des paramètres et retourne un résultat
 - Peuvent être des nombres statiques
 - Peuvent être des types
- Nécessité de manipuler types et nombres indifféremment
 - Métadonnée = type ou nombre statique
 - Représentation unifiée par des classes génériques
 - Métadonnée embarquée dans un membre de classe

- Pour les nombres

```
template <typename T,T VAL> struct Nombre {  
    typedef T type;  
    static const T valeur = VAL;  
};
```

- Pour les types

```
template <typename T> struct Type  
{ typedef T type; };
```

- Exemple: condition «si»

```
template <typename TEST,typename ALORS,typename SINON,  
        bool = TEST::valeur> struct Si : SINON {};
```

```
template <typename TEST,typename ALORS,typename SINON>  
struct Si<TEST,ALORS,SINON,true> : ALORS {};
```


- Remarque: utilisation de l'héritage pour «retourner» le résultat

- Manipulation de nombres

```
template <typename N> struct EstNegatif  
: Nombre< bool,N::valeur<0 > > {};
```

```
template <typename N> struct ValeurAbsolue  
: Si< EstNegatif<N>,  
    Nombre<typename N::type,-N::valeur>,  
    Nombre<typename N::type,N::valeur>  
> {};
```

- Exemple d'utilisation

```
□ y = ValeurAbsolue< Nombre<int,-5> >::valeur;
```

- Manipulation de types

```
class Algo1 { ... public: static void executer(); };  
class Algo2 { ... public: static void executer(); };
```

```
template <typename T> struct MeilleurAlgo  
: Si< EstEntier<T>,  
    Type<Algo1>,  
    Type<Algo2>  
> {};
```

- Exemple d'utilisation

- `MeilleurAlgo<int>::type::executer();`

Structures de types (1/3)

- Au lieu de stocker des données, stocker des types
 - Exemple connu: les «*typelists*»

- Structure de liste chaînée statique

```
template <typename TYPE,typename SUIVANT>
struct ListeType {
    typedef TYPE element;
    typedef SUIVANT suivant;
};
```

```
struct TypeNul {};
```

- Construction d'une liste de types

```
typedef ListeType<int,
                 ListeType<long,
                         ListeType<double,TypeNul>
                         >
                 > types_nombre_t;
```

- Recherche d'un type

```
template <typename LISTE,typename TYPE>
struct Contient
: Ou< MemeType<typename LISTE::element,TYPE>,
      Contient<typename LISTE::suivant,TYPE>
  > {};
```

```
template <typename TYPE>
struct Contient<TypeNul,TYPE>
: Nombre<bool,false> {};
```

- Exemple d'utilisation

```
if (Contient<types_nombre_t,X>::valeur) // Code 1
else // Code 2
```

- Métafonctions nécessaires à l'exemple précédent

- Comparer deux types

```
template <typename T1,typename T2>  
struct MemeType : Nombre<bool,false> {};
```

```
template <typename T>  
struct MemeType<T,T> : Nombre<bool,true> {};
```

- Opérateur «ou»

```
template <typename N1,typename N2> struct Ou  
: Nombre<bool,N1::valeur || N2::valeur> {};
```

Patrons d'expressions (1/4)

- Terme anglais: *Expression templates*
- A partir de la surcharge d'opérateurs
⇒ arbre syntaxique d'une expression
- Objectifs
 - Définir d'un langage spécifique embarqué dans C++
 - EDSL (*Embedded Domain-Specific Language*)
 - Optimiser l'évaluation d'une expression
 - L'idée est de différer un calcul (e.g. $a*b$)
 - En vue d'optimiser l'expression complète (e.g. $a*b*c$)
- Exemple: calcul matriciel

Patrons d'expressions (2/4)

- Surcharge \Rightarrow objet retourné au lieu du résultat attendu
 - Exemple: $a+b$
 - Retourne un objet: $\text{Addition}\langle A, B \rangle$
- De cette manière, on peut représenter une expression complète
 - Exemple: $a+b*c$
 - Retourne un objet: $\text{Addition}\langle A, \text{Multiplication}\langle B, C \rangle \rangle$
 - On obtient un arbre syntaxique
- Le calcul peut être optimisé
 - Exemple: $x = a+b*c$
 - Surcharge de l'opérateur d'affectation
 - \Rightarrow appel méthode « evaluer » optimisée de l'expression complète
- Un aperçu (ultra light !)...

Patrons d'expressions (3/4)

- Représentation des opérations

```
template <typename E1,typename E2> class Addition {  
    protected: E1 e1;  
    protected: E2 e2;  
  
    public: Addition(const E1 & a,const E2 & b)  
        : e1(a),e2(b) {}  
  
    public: double evaluer(void) const  
        { return (e1.evaluer() + e2.evaluer()); }  
};
```

- Calcul différé

```
class Resultat {  
    protected: double v;  
  
    public: template <typename E>  
        Resultat & operator = (const E & e)  
        { v = e.evaluer(); return (*this); }  
};
```


Patrons d'expressions (4/4)

- Représentation des opérandes

```
class Operande {  
    protected: double v;  
  
    public: Operande(const double & a) : v(a) {}  
  
    public: const double & evaluer(void) const { return v; }  
};
```

- Surcharge des opérateurs

```
template <typename E1,typename E2>  
Addition<E1,E2> operator + (const E1 & a,const E2 & b)  
{ return Addition<E1,E2>(a,b); }
```

- Exemple d'utilisation

```
Resultat r;  
r = Operande(3) + Operande(17.2) + Operande(12.7);
```