Université de Lyon – Université Claude Bernard Lyon 1
Master d'Informatique

Programmation Avancée
Les différents mécanismes des langages et de C++ pour la généricité

Norme ISO

Raphaëlle Chaine
raphaelle.chaine@liris.cnrs.fr
2020-2021

1

Meta-programmation avec les template

- Mécanisme des template :
  Génération de code par interprétation à la compilation
- Lorsque le compilateur rencontre du code correspondant à une instantiation d'un template :
  - génération de la spécialisation associée aux paramètres fournis.
- Réflexivité offerte par le langage C++ à la compilation

2

2

Spécialisation d'une classe template

```
template <typename T1, typename T2>
class maTemplate{
    T1 a;
    T2 b;
};
```

- Pour donner une définition différente de certaines instantiations de maTemplate :

```
template< >
class maTemplate<int,double>{
    int a;
    double b[3];
};
```

3

3

Spécialisation d'une classe template

- La spécialisation (d'une classe uniquement!) peut n'être que partielle :

```
template<typename T2>
class maTemplate<char,T2>{
  int a[6];
  T2 b;
};
```

- La spécialisation peut avoir plus de paramètres template que la définition initiale

```
template <typename T1, typename T2, typename T3>
class maTemplate<T1, std::map<T2,T3> > {
    T1 a;
    std::map<T2,T3> b;
};
```

Puis

```
maTemplate<double,double> a1;
maTemplate<int,double> a2;
maTemplate<char,double> a3;
std::map<double, int> a4;
```

4

4

- La métaprogrammation consiste à pousser plus loin les possibilités offertes par le compilateur, de manière à générer du code encore plus performant… au prix d'une compilation plus longue!
- Un métaprogramme génère et manipule du code correspondant à des programmes pendant leur compilation
- Sens littéral : « Un programme sur les programmes »

5

5

- Domaine récent :
  Naissance de nouvelles astuces template de métaprogrammation provoquant l'effervescence des experts
- Quelles en sont leurs applications?
- Comment acquérir les connaissances de base permettant de les utiliser avec discipline?

6

6

- Template à base numérique
  - Optimisation des performances requises par des calculs mathématiques
  - Exponentielle, sinus, factorielle, calculs matriciels
- Template à base de types
  - Typelists (liste de types)
  - Implantation de design patterns (fabrique, visiteurs, …) en conservant un typage fort
  - Analyseurs syntaxiques …

7

7

Compilateur C++ : un système Turing complet?

- Intuition confirmée par le programme d'Erwin Unruh qui calcule les nombres premiers à la compilation, et les affiche à travers les messages d'erreur du compilateur (1994)
- Rappel :
  - Un nombre premier n'est divisible que par 1 et par lui même
  - p est premier s'il est « premier avec les entiers de 2 à p-1 » (ie. pas divisible par)

8

8

```
template <int i> struct D {
     D(void*);
     operator int();
   };
template <int p, int i>
struct is_prime {
    enum { prim = (p==2) ||
                  (p%i)&& is_prime<(i>2?p:0),i-1>::prim
    };
  };
template<> struct is_prime<0,0> { enum {prim=1}; };
template<> struct is_prime<0,1> { enum {prim=1}; };

template <int i>
struct Prime_print {
    Prime_print<i-1> a;
    enum { prim = is_prime<i,i-1>::prim };
    void f() { D<i> d = prim ? 1 : 0; a.f();}
  };
template<> struct Prime_print<1> {
    enum {prim=0};
    void f() { D<1> d = prim ? 1 : 0; };
  };
#ifndef LAST
#define LAST 18
#endif
main() {
    Prime_print<LAST> a;
    a.f();
  }
```

Permet d'afficher un entier i dans un message d'errreur

Métafonction calculant récursivement si p est premier avec les entiers inférieurs à i

La fonction membre f affiche i s'il est premier + appel récursif sur i-1 via a

9

9

- Rappel : Les énumérations permettent de donner des noms à des valeurs
  enum Jour { lundi=0, mardi=1, mercredi =2 };
  int var=lundi;
- On utilise les énumérations pour nommer les valeurs qui seront « le retour de métafonctions »
- Principe :
  - utiliser des noms paramétrés par des valeurs numériques (pour obtenir une syntaxe du style META_FONCTION<N>)
  - mais on ne peut pas directement paramétrer une énumération par un paramètre template …
  - En revanche on peut l'encapsuler dans une classe template!
    META_FONCTION<N>::MonEnum désigne alors la valeur de la métafonction appliquée à N

10

10

Autre exemple :
calcul à la compilation de la factorielle d'un nombre entier.

```
template <unsigned int N> struct Factorielle
{
  enum {valeur = N * Factorielle<N-1>::valeur};
};
```

- Cette construction récursive trouve un cas d'arrêt dans une spécialisation du template.

```
template <> struct Factorielle<0>
{
  enum {valeur =1};
}

unsigned int x =Factorielle<3>::valeur;
```

- Dès la compilation `Factorielle<3>::valeur` vaudra 6 (économie du calcul à l'exécution)

11

11

Que penser de :

```
unsigned int i=4;
unsigned int x
=Factorielle<i>::valeur;
```

12

12

- La valeur doit être connue dès la compilation :
```
const unsigned int i=4;
unsigned int x
=Factorielle<i>::valeur;
```
- Depuis C++11 :
`constexpr` permet de spécifier que ce qui suit est évaluable à la compilation

```
constexpr unsigned int i=4;
unsigned int x
=Factorielle<i>::valeur;
```

13

13

- Certaines fonctions peuvent désormais être constexpr

```
constexpr int factorial(int n) {
 return n<=1?1:(n*factorial(n-1));
}
```

- Avec constexpr la « métaprogrammation » ressemble parfois à de la « programmation » C++!!!!
- ATTENTION :
  - IL FAUT QUE LA FONCTION SOIT EVALUABLE A LA COMPILATION!!
  - constexpr n'est pas utilisable dans tous les contextes de métaprogrammation

14

14

- Autre exemple classique :
  Au lieu d'utiliser des énumérations, on peut aussi utiliser des données membres statiques constantes

```
template <unsigned int N>
struct Binaire
{
  static const unsigned int valeur
     =Binaire<N/10>::valeur *2 + N%10;
};
// avec N séquence de 0 et de 1
```

- Spécialisation :

```
template <>
struct Binaire<0>
{
  static const unsigned int valeur = 0;
}
```

15

15

- Utilisation :

```
const unsigned int
i=binaire<1001>::valeur;
```

La valeur 9 de i est calculée à la compilation

- Attention :
`binaire<54>::valeur` n'a pas de sens!
Mais il existe des techniques pour s'assurer que le paramètre d'instanciation est bien composé de 0 et de 1 (Abrahams, Gurtovoy)

16

16

- Dans un méta programme, une classe template peut être considérée comme une fonction dans sa forme la plus simple : **prenant des paramètres numériques et retournant une (ou plusieurs!) valeurs**
- Attention les paramètres template ne peuvent être des flottants!
(mais `3.0f/4.0f` calculé à la compilation ☺)
- Metaprogramme fabriquant un flottant :

```
template <int N> inline double Factorielle()
{return N*Factorielle<N-1>();}
template <> inline double Factorielle<0>()
{return 1.0;}
```

17

17

- Sont évalués à la compilation, les calculs impliquant
  - des valeurs entières ou flottantes
  - des variables entières constantes (ex : const int i=5) (mais pas des doubles)
  - des `constexpr` depuis C++11

```
constexpr double d=5.0;
constexpr double e=d/10.0;
```

  - L'avènement du qualificatif `constexpr` améliore les possibilités de métaprogrammation :
    - Possibilité de faire des fonctions `constexpr`, en utilisant la récursion (C++11)

```
constexpr double factorial(int n)
  { return n <= 1? 1 : (n * factorial(n - 1)); }
```

    - Possibilité de faire des fonctions `constexpr` utilisant les itérations (C++14)

18

18

Récapitulatif sur l'exemple de la factorielle

- Comment mettre en oeuvre une métafonction Factorielle(N)?

```
template <unsigned int N> struct Factorielle
{ enum {valeur = N * Factorielle<N-1>::valeur};};
template <> struct Factorielle<0>
{ enum {valeur =1}; };
```

```
template <int N> inline double Factorielle()
{return N*Factorielle<N-1>();}
template <> inline double Factorielle<0>()
{return 1.0;}
```

```
constexpr double factorielle(int n) //C++11
{ return n <= 1? 1 : (n * factorielle(n - 1)); }
```

19

19

- Structure de contrôle dans un meta programme:
  - Quel équivalent du `if/else` dans un metaprogramme?

20

20

- Utilisation d'une classe templatée par des booléens et dont les 2 instanciations correspondent à des comportements différents

```
template <bool Condition>
struct Test;
```

- Spécialisations :

```
template <> struct Test<true>
  {
     static void traitement()
        { traitement1();//si possible inline}
  };
template <> struct Test<false>
  {
     static void traitement()
        {traitement2(); //si possible inline}
  };
```

21

21

- Des instructions du type

```
if (Condition)
   traitement1();
else
   traitement2();
```

- Pourront ainsi être remplacées par :

```
Test<Condition>::traitement();
```

- A condition que `Condition` soit évaluable à la compilation!!!

22

22

- L'opérateur conditionnel ternaire peut être évalué à la compilation
  - Exemple d'utilisation :

```
template <unsigned int I> struct NumTest
{
 enum
 {
    Pair = (I%2? false : true),
    Zero = (I==0 ? true : false)
  };
};
```

  - On peut ensuite utiliser les valeurs booléenne `NumTest<I>::Pair` et `NumTest<I>::Zero` (si I évaluable à la compilation!)

23

23

- Boucles dans un meta programme:
  - Quel équivalent du `for` dans un metaprogramme?

24

24

- Utilisation d'une construction récursive utilisant une classe templatée par une valeur numérique marquant le démarrage et une valeur numérique marquant la fin de la boucle

```
template <unsigned int Debut, unsigned int Fin>
struct Boucle
{
  static void traitement()
  { MonTraitement();
    Boucle<Debut+1,Fin>::traitement();
  }
};
```

- Spécialisation partielle

```
template < unsigned int N>
struct Boucle<N,N>
{
  static void traitement() {}
};
```

25

25

Des instructions du type

```
for (int i=0;i<10;i++)
  MonTraitement();
```

Pourront ainsi être remplacées par :

```
Boucle<0,10>::traitement();
```

Danger si `Debut>Fin`
(peut être vérifié à la compilation)

26

26

- Le compilateur permet de réaliser des traitements fonctionnels, mais également de stocker des résultats dans des pseudo-variables temporaires ☺

```
template <int X, int Y, int Z>
struct MetaProg
  {
     enum
     {
       v1 = NumTest<Z>::Pair;
       v2= X*v1+Y;
       v3 = NumTest<v2>::Zero ? X : 2*Y;
       valeur = v1*v3;
      };
  };
```

27

27

Utilisation

- Réécriture optimisée de fonctions mathématiques :
- Fonction puissance :

```
template  <unsigned int N>
inline double Puissance(double x)
  {return x*Puissance<N-1>(x);}
template <>
inline double Puissance<0>(double x)
{return 1.0;}
```

- Ici, seul N est un paramètre template, mais pas x (qui peut donc être non évaluable à la compilation)

```
double x, y;
  …
Y=puissance<7>(x);
```

28

28

- Réécriture optimisée de fonctions mathématiques qui s'approximent à partir de leur développement en série entière
  - Si on tronque la série entière à partir d'un degré N, on obtient un polynome de degré N (N=précision numérique)
  - Ex : exponentielle, cos, sin, atan, etc…
- Réécriture de calculs vectoriels et matriciels en utilisant des expressions template (cf. boost::uBlas)
  - Idée : éviter la construction d'objets temporaires
  - Construction arborescente de template
  - Paramètres template = iterateurs sur les vecteurs

29

29

Les typelists

- Listes de types (présentes dans `boost`)
- Utilisées pour la génération automatique de code

```
template < typename T1, typename TL>
struct TypeList
{
 typedef T1 Head; //premier type
 typedef TL Tail; //liste des types restants
};
struct NullType {};
```

- Aucune donnée dans une `TypeList`

30

30

- A partir de cette structure template, on peut fabriquer des listes de types, selon une construction récursive.
- Exemple :
```
typedef TypeList< int,
    TypeList<double,NullType> > l_int_double;
```
- Simplification de la construction à l'aide de macros :
```
#define TYPELIST_1(t1)
   TypeList<t1, NullType>
#define TYPELIST_2(t1,t2)
   TypeList<t1, TYPELIST_1(t2)>
#define TYPELIST_3(t1,t2,t3)
   TypeList<t1, TYPELIST_2(t2,t3)>
```
- Puis
```
typedef TYPELIST_2(int,double) l_int_double;
```

31

31

Opérations sur les typelists

- Méta fonctions:
  - Length<typename TL>
  - IndexOf<typename TL, typename T>
  - TypeAt<typename TL, int N>
  - Union<typename TL1, typename TL2>
  - …

32

32

Length<typename TL>

- Spécialisations :
  `template < typename H, typename TL>`
  Métafonction `Length< TypeList<H,TL> >`
  `… valeur = 1 + Length<TL>::valeur`
- `template<>`
  Métafonction `Length<NullType>`
  `… valeur = 0`
- Renvoie une erreur si on n'utilise pas une TypeList

Comme vu précédemment, les métafonctions peuvent être mise en œuvre à l'aide de données membres statiques ou des types énumérés encapsulés dans des structures templates

33

33

Length<typename TL>

- Traduction en C++
  - Déclaration de la méta-fonction :
```
template < typename TL>
struct Length;
```
  - Spécialisations :
```
template<typename T1, typename TL>
struct Length<TypeList<T1,TL> >
{ enum{ valeur=1+Length<TL>::valeur };
};
template<>
struct Length<NullType>
{enum{ valeur=0 };
};
```

34

34

IndexOf<typename TL, typename A>

- Spécialisations
  `template <typename TL, typename A>`
  Métafonction `IndexOf< TypeList<`**`A`**`,TL>,` **`A`** `>`
  `… valeur = 0`
- `template <typename A>`
  Métafonction `IndexOf<NullType, A>`
  `… valeur = -1`
- `template <typename H, typename TL, typename A>`
  Métafonction `IndexOf< TypeList<H,TL>, A >`
  Utilisation d'une « variable » temporaire
  `temp = IndexOf<TL, A> //recherche sur la Queue`
  Si `(temp == -1)` alors `valeur = -1 // pas trouvé`
  Sinon `valeur = 1 + temp // trouvé`

35

35

Utilisation

- Permet de définir des familles de type
  - `typedef TYPELIST_4(int, char, long, short) EntierSigné`
  - `typedef TYPELIST_4(uint, uchar, ulong, ushort) EntierNonSigné`
  - `typedef Union<EntierSigné, EntierNonSigné> Entier`
  - `typedef TYPELIST_2(float, double) Flottant`
  - `typedef Union<Entier, Flottant> Nombre`
- Permet d'explorer un ensemble de type (par exemple pour générer du code associé)
  - Les template variadiques de C++11 le permettent également

36

36

- Curiously Recurring Template Pattern (CRTP)
  - Schéma

```
template <class T>
class Base {
 // ...
};
class Derivee : public Base<Derivee> {
 // ...
};
```

  - Modèle d'une classe **dérivée une seule fois** et ayant des connaissances sur sa Derivee.
  - Les fonctions membres de Base, si elles sont instanciées, le seront bien après leur classe d'appartenance
  - Les fonctions membres de la Base<Derivee> pourront accéder par downcast à celle la Derivee

37

37

- CRTP peut être utilisé à des fins de polymorphisme statique (sans surcout lié à virtual)
  - Schéma

```
template <class T>
class Base{
    void interfaceSpecialisee()
    { static_cast<T*>(this)->implementation(); }
    static void static_func()
    { T::static_sub_func(); }
};

struct Derivee : public Base<Derivee> {
    void implementation();
    static void static_sub_func();
};
```

  - Vous vous demandez à quoi ca peut servir?

38

38

- Génération automatique d'une fonction clone dans une hiérarchie de classe polymorphe

```
class Figure {
  public:
    virtual ~Figure() {}
    virtual Figure *clone() const = 0;
};
// La classe CRTP dérive ici de Figure …
template <typename Derivee>
class Figure_CRTP : public Figure {
public:
   virtual Derivee *clone() const
    {return new Derivee(
          *static_cast<Derivee const*>(this));}
};
```

- Définition d'une spécialisation de Figure déjà munie d'une fonction clone par simple dérivation du patron de méthode

```
class Triangle : public Figure_CRTP<Triangle> {
};
```

39

39

- Exemple d'utilisation :
  - Embarquement automatique d'un compteur d'instances dans une classe

```
template <typename T>
struct avec_compteur{
  protected:
      static int objets_vivants;
      avec_compteur(){++objets_vivants;}
      avec_compteur(const avec_compteur &)
                {++objets_vivants;}
      ~avec_compteur(){--objets_vivants;}
};
template <typename T>
  int avec_compteur<T>::objets_vivants( 0 );
```

  - Définition d'une classe avec un compteur d'instance par simple dérivation du template précédent

```
class X : protected avec_compteur<X>{// …
};
```

40

40

Utilisation des listes de types

- Génération de classes via la génération automatique de hierarchies
- Exemple :
  - Etant donné une hiérarchie de classes
    Ex : Hiérarchie de classe Figure
    - rectangle,
    - rond,
    - groupe de Figures [*pattern composite*]

```
class Figure {  …  };
class groupe : public Figure { …
  set<Figure *> composants;
  };
```

  - On veut mettre en place une deuxième hiérarchie de classe correspondant à un pattern Visiteur (ex: pour visualiser)
  - Permet une séparation données/traitement d'affichage

41

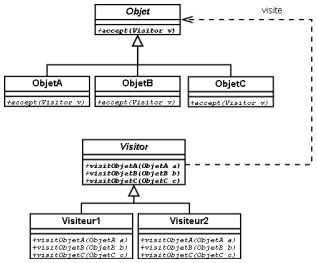
41

Utilisation

- Toutes les figures dispose de fonctions d'affichages élémentaires (ex: affichage1 et affichage2), à partir desquelles il est possible de composer de nouveaux modes d'affichage
- On ne souhaite pas revenir sur la définition des figures, chaque fois qu'on souhaite ajouter un nouveau mode d'affichage
- C'est les visiteurs qui se chargeront d'afficher les figures selon ce nouveau mode.

42

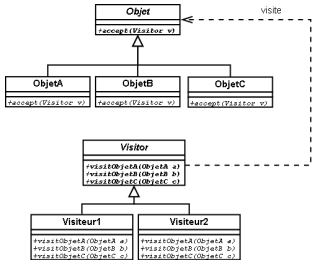
42



- Un visiteur dont on n'a pas besoin de connaître le type exact pourra visiter un objet (ici une figure) dont on ne connaît pas le type exact
- Ici : accepte = recoitVisite

43

43




```
class Figure
{public :
  virtual void
    accepte(Visiteur&)const =0;
};
```

44

44

Pour chaque classe d'objet visité :

- fonction membre **virtuelle** `accepte`:

```
void FigureA::accepte(Visiteur& v) const
{ v.visiteA(this) ; }
```

Pour chaque classe de visiteur :

- Autant de fonctions membres **virtuelle**s `visite` que de classes dans la hiérarchie de Figures

```
void MonVisiteur::visiteA(const FigureA& f)
  { // Traitement d'un objet de type A }
void MonVisiteur::visiteB(const FigureB& f)
  { // Traitement d'un objet de type B }
void MonVisiteur::visiteC(const FigureC& f)
  { // Traitement d'un objet de type C }
```

- On peut ici bénéficier du mécanisme de surcharge :
  Une fonction visite par type visité! Elles ont des paramètres de type différent ce qui permet de les distinguer.
  On peut tout appeler visite

45

45

Pour chaque classe d'objet visité :

- fonction membre **virtuelle** `accepte`:

```
void FigureA::accepte(Visiteur& v)const
{ v.visite(this) ; }
```

Pour chaque classe de visiteur :

- Autant de fonctions membres **virtuelle**s `visite` que de classes dans la hiérarchie de Figures

```
void MonVisiteur::visite(const FigureA& f)
  { // Traitement d'un objet de type A }
void MonVisiteur::visite(const FigureB& f)
  { // Traitement d'un objet de type B }
void MonVisiteur::visite(const FigureC& f)
  { // Traitement d'un objet de type C }
```

En effet les visiteurs sont des visiteurs multiples au sens où ils doivent pouvoir visiter différents types de Figure.

46

46

Utilité d'une génération de code automatique :

Dans une spécialisation MonVisiteur de la Hiérarchie Visiteur, toutes les sucharges de MonVisiteur::visite ont le même code!

Pour la classe `VisiteurAffichagePlein` :

- Autant de fonctions membres **virtuelle**s `visite` que de classes dans la hiérarchie de Figures

```
void VisiteurAffichagePlein::visite( const
  FigureA& f)
  { f.affichagePlein();}
void VisiteurAffichagePlein::visite(const
  FigureB& f)
  {f.affichagePlein();}
void VisiteurAffichagePlein::visite(const
  FigureC& f)
  {f.affichagePlein();}
```

47

47

- Etant donné une spécialisation de Visiteur :
  - N'écrire le code de `visite` qu'une seule fois dans un *template*, puis l'instancier pour chacun des types d'une `TypeList` des spécialisations offertes par `Figure`

48

48

- Ecriture d'une classe *templatée* par le type FF de `Figure`, permettant de générer une classe de Visiteur avec UNE fonction membre `visite(const FF&)` et son code.
- ```
  template <class FF>
  class PatronVisiteur1 :
                  public Visiteur
  { blablacode
    using Visiteur::visite;
    void visite(const FF& f)
     {f.affichageMode1();}
  }
  ```
- Attention affichageMode1 peut même être non virtuelle ☺

49

49

- La classe `VisiteurMultiple1` devra savoir visiter plusieurs type de `Figure`s, elle héritera donc des instanciation du *template* pour tous les types de `Figure`s.
- Pour résoudre le problème de l'héritage multiple de la classe de base `Figure`, on opte pour un **héritage** dit **virtuel** (cf. cours sur l'héritage virtuel)

50

50

- Code écrit une seule fois dans un *template*, puis instanciation pour chacun des types d'une TypeList de `Figure`s
- ```
  template <class FF>
  class PatronVisiteur1
      : virtual public Visiteur
  { blablacode
    using Visiteur::visite;
    void visitObjet(const FF *o)
     {o->affichageMode1();}
  };
  ```
- La classe `VisiteurMultiple1` finale dérivera de toutes ses instanciations!

51

51

- Instanciation pour tous les types de `Figure` listés dans une TypeList
  - Utilisation d'un *template* dont un des paramètres *template* est un *template*!
    (ici le *template* du Patron de Visiteurs)
- On obtient ensuite un `VisiteurMultiple` qui sait visiter tous les types de `Figure` selon le mode unique défini par le *template*

52

52

```
template <class TList,
          template <class> class PVisiteur>
class VisiteurMultiple;
```

Spécialisations :

```
• template <class T1, class TL,
            template <class> class PVisiteur>
  class VisiteurMultiple<TypeList<T1,TL>, PVisiteur >
   : public PVisiteur<T1>,
     public VisiteurMultiple<TL,PVisiteur>
     { ...A vous de mettre les bons using
     }; // 2 héritages
• template <class T,
            template <class> class PVisiteur>
  class VisiteurMultiple<TypeList<T,NullType>,
                         PVisiteur >
   : public PVisiteur<T>
    {...A vous de mettre le bon using
    }; // 1 seul héritage dans le cas d'une liste
       // contenant un seul type
```

53

53

- Reste à définir la classe de base `Visiteur` qui doit elle même présenter tous les prototypes des surcharges de la fonction membre virtuelle visite
- On utilise un mécanisme similaire au précédent, pour construire `Visiteur` par héritage multiple de classes construites par un *template*

54

54

```
template <class OO>
 class PatronBaseVisiteur
 {
   void visitObjet(const OO *o) virtual=0;
 };
```

La classe `Visiteur` finale dérivera de toutes les instanciations de ce *template* pour la liste des types d'objets traités!

Même mécanisme que précédemment en définissant un template

```
template <class TList >
class BaseVisiteurMultiple;
```

55

55

Au final, la classe Visiteur correspond à :

```
typedef BaseVisiteurMultiple<LTypesFig>
 Visiteur;
```

où `LTypesFig` est une `TypeList` des types de figures possibles

56

56