ISIMA

PARTIE IV

Généricité

Bruno Bachelet

Loïc Yon

Historique

- Concept apparu dès les années 70
- Ce n'est pas un concept objet
  - Les principes objets ne sont pas nécessaires
- … mais proposé par les langages objets !
  - ADA
  - C++
  - Java, C#

Généricité *(1/2)*

- Définir des entités abstraites du type de données
  - Structures de données: vecteur, pile, file, ensemble…
  - Algorithmes: chercher, trier, insérer, extraire…

⇒ Abstraction de données

- Autre manière de factoriser le code
  - Dans une fonction, les paramètres sont des valeurs
    - Dans sa définition, des valeurs sont inconnues
    - Au moment de l'appel (à l'exécution), ces valeurs sont fixées
  - Dans un générique, les paramètres sont des types
    - Dans sa définition, des types sont inconnus
    - Au moment d'utiliser le générique (à la compilation), ces types sont fixés

Généricité *(2/2)*

- Un générique est un modèle
  - Instanciation = création d'un élément à partir d'un modèle
  - Instancier un générique ⇒ fixer le type de ses paramètres

- Spécificités en C++
  - Génériques appelés *«templates»*
  - Des constantes peuvent aussi être des paramètres
  - Peuvent être génériques: fonctions, classes ou méthodes
    - Depuis C++14: variables globales ou attributs de classe
  - Possibilité de «spécialisation statique»
    - Une nouvelle forme de polymorphisme
    - Permet la spécialisation pour certains types de données

Exemples

- Algorithme de tri
  - Fonctionne de la même manière sur tout type de données
    - Entiers, flottants, chaînes, instances d'une classe A…
  - Suppose des fonctionnalités sur le type manipulé
    - Une relation d'ordre
      - Opérateur «<»
      - Une fonction ou un objet tiers (e.g. foncteur)
    - Un mécanisme de copie
      - Opérateur «=»
- Type pile
  - Fonctionne de la même manière sur tout type de données
  - Suppose un mécanisme de copie

Héritage *vs.* généricité

- La généricité est complémentaire de l'héritage
- Tous les deux fournissent une forme de polymorphisme
  - La généricité agit à la compilation
  - L'héritage agit à l'exécution
- Contribuent tous les deux à développer du code générique
  - Tous les deux font abstraction du type
  - L'un par un processus de généralisation
  - L'autre par un mécanisme de paramètre
- Avec l'héritage
  - Plus de flexibilité, mais moins de sûreté (e.g. `vector<ObjetGraphique *>`)
  - Contrôles de type effectués à l'exécution
  - Peut entraîner des ralentissements significatifs
- Avec la généricité
  - Moins de flexibilité, mais plus de sûreté (e.g. `vector<T>`)
  - Contrôles de type effectués à la compilation
  - Moins de ralentissement (voire aucun) à l'exécution

Généricité en C++

- Mot-clé «`template`»
- Précède un composant générique
  - Fonction, classe ou méthode
  - Ou variable (depuis C++14)
- `template <`*liste_paramètres*`>` *composant*
- Définit une liste de paramètres de différentes natures
  - Point commun: leur valeur sera fixée à la compilation ⇒ instanciation
  - Les plus courants
    - Un type: `typename T` (ou `class T`)
    - Une constante: `int N`
  - Les autres
    - Un *template*: `template <typename> class C`
    - Un «pack» de paramètres: `typename... P` (depuis C++11, cf. *variadic templates*)

Fonction générique

- Définition d'une fonction générique

```
template <typename T>
const T & min(const T & a, const T & b)
{ return (a<b ? a : b ); }
```

- Suppose l'opérateur de comparaison sur le type paramétré «`T`»

- Appel à une fonction générique (instanciation + exécution)

```
int i,j;
…
int k = min<int>(i,j);
```

- Instanciation ⇒ fixer les types paramétrés

Polymorphisme statique

- Pas obligatoire de préciser les types paramétrés à l'instanciation
- Si le compilateur a suffisamment d'informations, il déduit les types
  - Comme avec la surcharge de nom
  - Forme de polymorphisme statique
  - `int i,j; … min(i,j);` ⇒ instanciation de `min<int>`
  - `double a,b; … min(a,b);` ⇒ instanciation de `min<double>`
- Le compilateur peut effectuer des conversions implicites si les types ne correspondent pas tout à fait

Les «concepts» *(1/3)*

- Algorithme de tri générique
  - Classe générique «**AlgoTri**» avec paramètre «**T**»
  - **T** = type des éléments à trier
  - Eléments comparés à l'aide de la méthode «**estAvant**»
    - Permet un tri décroissant par exemple

- Exemple

```
template <typename T>
void AlgoTri<T>::trier(T t[],int n) {
 for (int i = 0; i < n-1; i++)
  for (int j = i+1; j < n; j++)
   if (t[j].estAvant(t[i]))
   { T x = t[i]; t[i] = t[j]; t[j] = x; }
}
```

- Hypothèse: le type «**T**» possède la méthode «**estAvant**»
  - Vérification faite à la compilation, au moment de l'instanciation

Les «concepts» *(2/3)*

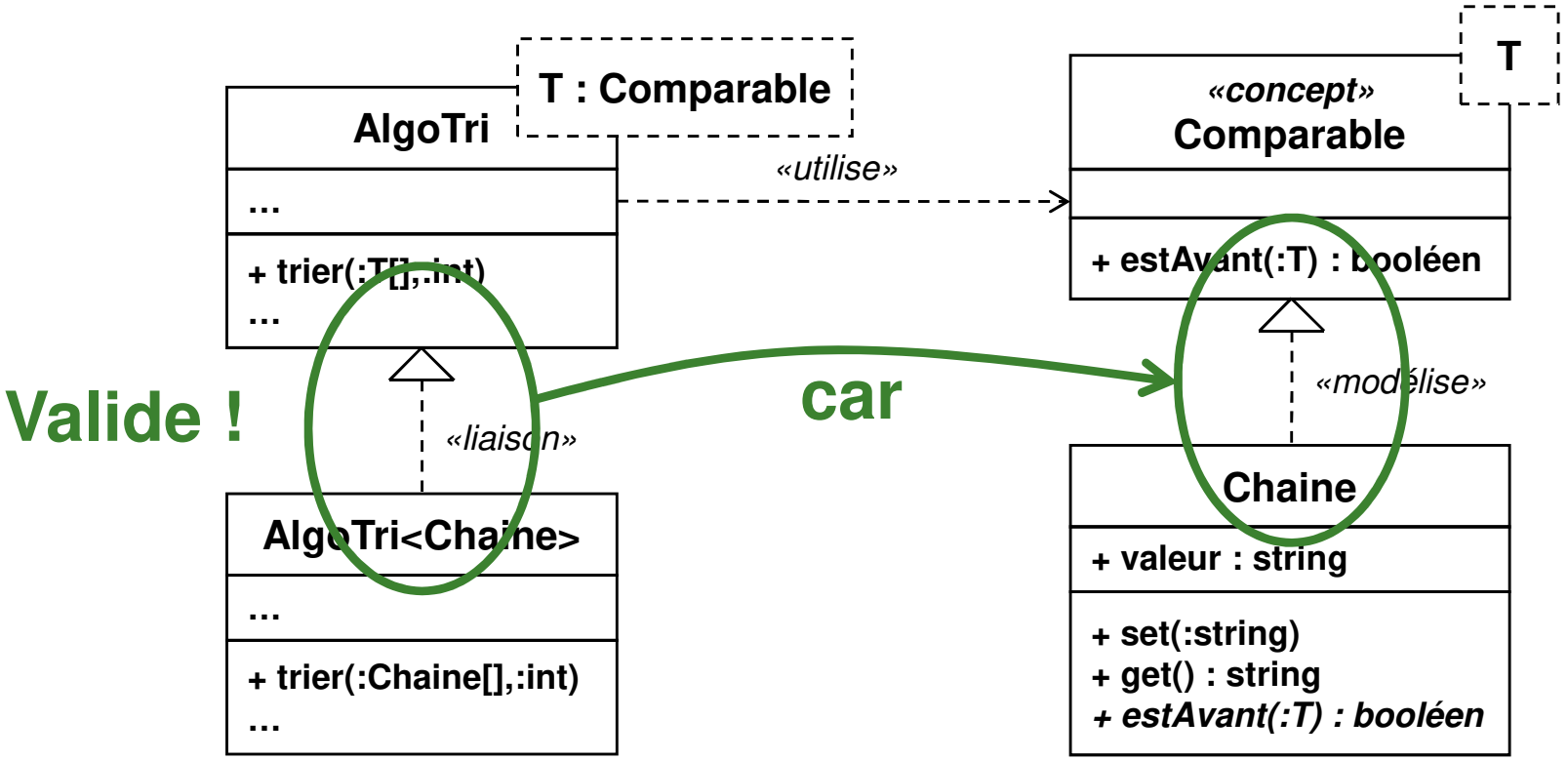
- L'interface supposée de «`T`» fait partie d'un «concept»

- Concept = ensemble «nommé» de spécifications/contraintes
  - Concerne l'interface: existence d'une méthode
  - Concerne l'implémentation: sémantique d'une méthode
  - Mais aussi toute contrainte pertinente liée à l'utilisation du type

- Proposition de définition du concept «`Comparable`»
  - La méthode d'instance «`estAvant`» doit exister
    - Signature exacte (UML): **booléen estAvant(:T)**
  - Elle doit définir une relation d'ordre (partielle) entre deux objets
    - Pseudo-code: **si a.estAvant(b) = vrai alors b.estAvant(a) = faux**

- Le type «`T`» de l'algorithme peut être contraint par ce concept
  - «`T`» respecte le concept «`Comparable`»
  - On dit aussi: «`T`» modélise le concept «`Comparable`»

Les «concepts» *(3/3)*



- En Java: concepts limités aux interfaces
  - Un paramètre générique peut être contraint par des interfaces
- En C++: concepts intégrés au langage depuis C++20
  - Avant: seule une documentation permettait de les identifier (cf. doc STL)
  - Maintenant: un paramètre générique peut être contraint par des concepts

Classe générique

- Définition d'une classe générique

```
template <typename T, int N>
class Pile {
 private:
  T elements[N];
  int sommet;
 public:
  Pile();
  void ajouter(const T &);
  T retirer();
};
```

- Instanciation d'une classe générique
  - `Pile<int,256> p;`
  - `using pile_double_t = Pile<double,100>;`

Paramètres par défaut *(1/2)*

- Possibilité d'une valeur par défaut pour un paramètre
- Constante par défaut
  - `template <typename T, int N = 256>`
    `class Pile;`
  - `Pile<int>` ⇒ instanciation de `Pile<int,256>`
- Type par défaut
  - `template <typename T, typename C = int>`
    `class TableHachage;`
  - `TableHachage<string>`
    ⇒ instanciation de `TableHachage<string,int>`

Paramètres par défaut *(2/2)*

- Exemple plus subtil
  - Le type de structure utilisée pour modéliser une pile devient un paramètre

- Définition de la classe

```
template <typename T, typename C>
class Pile {
 private:
  C elements;
 …
};
```

- Instanciation: `Pile<int,std::vector<int>>`

- Possibilité d'une structure par défaut
  - `template <typename T, typename C = std::vector<T>>`
    `class Pile;`
  - `Pile<int>` ⇒ instanciation de `Pile<int,std::vector<int>>`

Paramètre «template template»

- Possibilité d'avoir une classe générique comme paramètre
  - Mot-clé «`template`» utilisé dans les paramètres du générique
  - Exemple: pile paramétrée par la classe générique de la structure sous-jacente

- Définition de la classe

```
template <typename T, template <typename> class C>
class Pile {
 private:
  C<T> elements;
 …
};
```

- Instanciation: `Pile<int,std::vector>`

- Attention: «`C`» n'est pas un type mais bien un modèle !
  - `C` = classe générique, `C<T>` = type de la structure sous-jacente
  - `Pile<int,std::vector<int>>` est donc incorrect

Méthodes génériques

- Exemple: copie de piles de types différents
  - ```
    Pile<double> p1;
    Pile<int> p2;
    …
    p1 = p2; // Incorrect, "p1" et "p2" de types différents
    ```

- Solution avec une méthode générique

```
template <typename T> class Pile {
 …
 template <typename U> void copier(const Pile<U> &);
};
```

- Appel à la méthode générique
  - Instanciation implicite: `p1.copier(p2);`
  - Instanciation explicite: `p1.copier<int>(p2);`

- Opérateur d'affectation générique
  - `template <typename U> Pile<T> & operator=(const Pile<U> &);`
```

Implémentation d'un template *(1/2)*

- Normalement, séparation interface et implémentation
  - Fichier entête
    - Déclaration méthodes + attributs
  - Fichier implémentation
    - Définition méthodes + attributs statiques

- Pour la suite, méthode *«template»*
  = méthode générique ou méthode d'une classe générique

- Implémentation des méthodes *template* dans un entête
  - Utilisation des méthodes *inline* similaire aux méthodes *template*
  - Ce sont des modèles de méthodes
  - Leur implémentation doit être visible au moment de l'appel

- Conseil: placer les implémentations en dehors de la classe

Implémentation d'un template *(2/2)*

```
template <typename T, int N>
class Pile {
 private:
  T elements[N];
  int sommet;
 public:
  Pile();
  void ajouter(const T &);
  T retirer();
};

template <typename T, int N>
Pile<T,N>::Pile() : sommet(0) {}

template <typename T, int N>
void Pile<T,N>::ajouter(const T & e)
{ elements[sommet++] = e; }

template <typename T, int N>
T Pile<T,N>::retirer() { return elements[--sommet]; }
```

Compilation d'un générique *(1/2)*

- Un code générique n'est pas compilé
  - Analyse «succincte» au niveau syntaxique
- Un code instancié est compilé
  - Analyse «complète» au niveau sémantique
- Instanciation = réécriture
  - Code générique dupliqué
  - Types paramètres remplacés par types concrets
- Equivalent d'un copier-coller-remplacer
  - Permet une efficacité optimale du code

Compilation d'un générique *(2/2)*

- Attention: une instance par jeu de paramètres
  - Travail du compilateur important ⇒ temps de compilation
  - Duplication de code ⇒ taille de l'exécutable

- Attention: aucun lien entre deux instances (en C++)
  - Pas de parenté entre les instances d'une classe générique
  - Pas de passerelle de conversion
    - `Pile<int> p1;`
    - `Pile<double> p2;`
    - `p2 = p1;` ⇒ interdit (bien que la conversion `int` → `double` existe)
  - Même dans le cas de constantes
    - `Pile<int,10> p1;`
    - `Pile<int,20> p2;`
    - `p2 = p1;` ⇒ interdit

Relation d'amitié *(1/2)*

- Amitié = rompre l'encapsulation avec un composant bien identifié
  - Mot-clé «**friend**»
- A éviter, mais parfois nécessaire
  - Entre composants d'un même module
  - Evite des méthodes publiques inutiles hors module
  - En C++, pas d'amitié inter-module comme en Java
- Autoriser la classe «**B**» à voir les membres cachés de la classe «**A**»
  - ```
    class A {
     friend class B;
     …
    };
    ```
  - Membre caché = «**protected**» ou «**private**»
- L'amitié n'est pas réciproque (ni transitive)
  - Réciprocité ⇒ `class B { friend class A; … };`
    ```

Relation d'amitié *(2/2)*

- Une fonction peut être amie
  - `class A { friend void f(int); … };`
  - La fonction «`f(int)`» voit les membres cachés de «`A`»
  - Ce n'est pas le cas des autres surcharges de «`f`»
- Une méthode peut être amie
  - `class A { friend void B::g(void); … }`
  - La méthode «`g`» de la classe «`B`» voit les membres cachés de «`A`»
- Déclaration préalable pas nécessaire pour établir une amitié
  - Sauf cas particuliers avec généricité (voir plus loin)
- L'amitié ne remplace pas une déclaration
  - «`A`» ne peut pas utiliser «`f`» ou «`B`» sans déclaration préalable

Déclaration anticipée *(1/3)*

- Pour utiliser une classe ou une fonction, celle-ci doit être connue
  - Elle doit être déclarée
  - Pour une fonction ⇒ prototype
  - Pour une classe ⇒ déclaration complète ou «anticipée»

- Dépendance réciproque entre classes
  ⇒ déclaration anticipée (*«forward declaration»*)

- Avant chaque classe, déclaration anticipée de l'autre classe
  - Entête classe A

```
class B; // Déclaration anticipée
…
class A { … void m1(B & b); … };
```

  - Entête classe B

```
class A; // Déclaration anticipée
…
class B { … void m2(A & a); … };
```

Déclaration anticipée *(2/3)*

- Déclaration anticipée = déclaration partielle d'un type
  - Seul le nom est indiqué
  - Rien n'est précisé sur la structure du type

⇒ Restrictions tant qu'il n'est pas complètement déclaré

- Aucune méthode ou attribut ne peut être appelé
  - `A a;` ⇒ interdit
  - `A::x;` ⇒ interdit
  - `A::m();` ⇒ interdit

- Le type peut être utilisé sans restriction dans les déclarations
  - `void m(A *);` ⇒ ok
  - `void m(A &);` ⇒ ok
  - `void m(A);` ⇒ ok

Déclaration anticipée *(3/3)*

- Seuls les pointeurs et références peuvent être utilisés dans les définitions
  - Variables
    - `A * a;` ⇒ ok
    - `A & a;` ⇒ ok
    - `a->m();` ⇒ interdit
  - Arguments
    - `void m(A *) {…}` ⇒ ok
    - `void m(A &) {…}` ⇒ ok
    - `void m(A) {…}` ⇒ interdit
- Possibilité de faire des alias d'une déclaration anticipée
  - `using mon_ami = A;`

Amitié et généricité *(1/2)*

- Exemples
  - `template <typename T> class B;`
  - `template <typename T> void f();`
- Amitié avec toutes les instances
  - `class A { template <typename T> friend class B; … };`
  - `class A { template <typename T> friend void f(); … };`
- Amitié avec une instance particulière
  - Attention: une déclaration préalable (de «`B`» et «`f`») est nécessaire
  - `class A { friend class B<int>; … };`
  - `class A { friend void f<int>(); … };`

Amitié et généricité *(2/2)*

- Cas d'une classe générique: exemple d'amitié avec une instance

```
template <typename T> class Vecteur; // Déclaration anticipée

template <typename T> // Prototype nécessite déclaration
ostream & operator << (ostream &,const Vecteur<T> &);

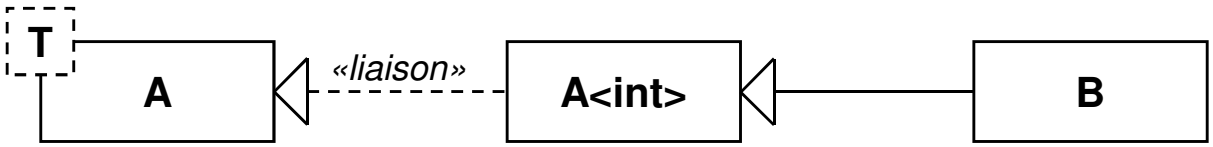
template <typename T> class Vecteur {
 // Amitié nécessite prototype
 friend ostream & operator<< <T> (ostream &,
                                  const Vecteur<T> &);
 private
  T * elements;
  int nb;
 …
};

template <typename T> // Définition nécessite amitié
ostream & operator<<(ostream & f, const Vecteur<T> & v) {
 for (int i=0; i<v.nb; ++i) f << v.elements[i] << " ";
 return f;
}
```

Héritage et généricité *(1/4)*

- Héritage «simple»
  - Héritage d'une instance d'une classe générique
  - Exemple: «`NuagePoint`» hérite de «`Vecteur<Point>`»

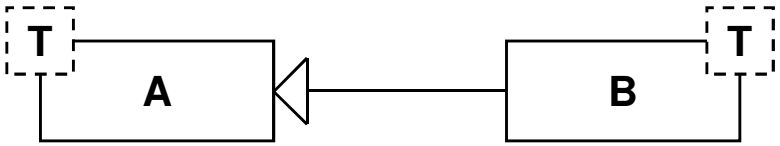
- Illustration
  - ```
    template <typename T>
    class A {…};
    ```
  - ```
    class B : public A<int> {…};
    ```



Héritage et généricité *(2/4)*

- Héritage «classique»
  - Héritage entre deux classes génériques
  - Exemple: «`FileAttente<T>`» hérite de «`Vecteur<T>`»

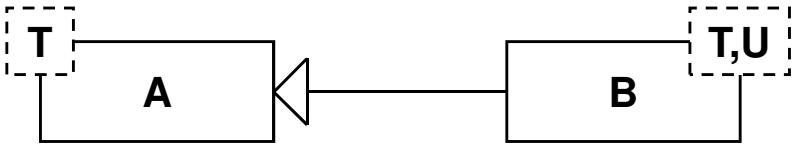
- Illustration
  - ```
    template <typename T>
    class A {…};
    ```
  - ```
    template <typename T>
    class B : public A<T> {…};
    ```



Héritage et généricité *(3/4)*

- Héritage avec «extension»
  - Héritage entre classes génériques avec ajout d'un paramètre
  - Exemple: «`FilePriorite<T,C>`» hérite de «`Vecteur<T>`»
    - `C` = objet comparateur qui indique la relation d'ordre

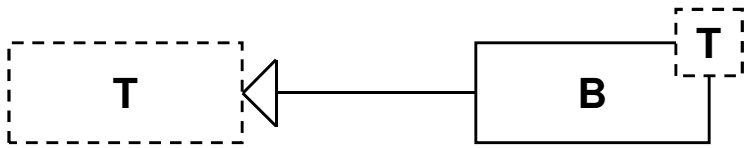
- Illustration
  - ```
    template <typename T>
    class A {…};
    ```
  - ```
    template <typename T, typename U>
    class B : public A<T> {…};
    ```



Héritage et généricité *(4/4)*

- Héritage «générique»
  - Héritage d'une classe qui est un paramètre
    - Extension potentielle de toutes les classes
  - Exemple: «`Comparable<T>`» hérite de «`T`»
    - Toute classe peut devenir un «comparable»

- Illustration
  - `template <typename T> class B : public T {…};`



Spécialisation statique

- Composant générique = modèle indépendant des types
- Mais cela peut être pénalisant
  - Exemple: recherche d'un élément dans une structure
  - Approches différentes suivant que la structure soit triée ou non

$\Rightarrow$ Mécanisme de spécialisation «statique»
  - Spécialisation du modèle générique pour un jeu de paramètres
  - Jeu de paramètres partiel ou complet
    - On parle aussi d'«instanciation» partielle ou complète
- Associé au polymorphisme statique de l'instanciation
  - «Meilleure» instanciation choisie en fonction du jeu de paramètres

Spécialisation d'une fonction générique

- Modèle générique d'une fonction de calcul de moyenne

```
template <int N> double moyenne(int * tab) {
 double somme = 0.0;
 for (int i = 0; i < N; ++i) somme += tab[i];
 return (somme/N);
}
```

- Spécialisation du modèle pour *N = 2* et *N = 1*

```
template <> double moyenne<2>(int * tab)
{ return (double(tab[0] + tab[1])/2); }

template <> double moyenne<1>(int * tab)
{ return double(tab[0]); }
```

- Attention
  - Déclarer d'abord la version générique, puis les versions spécifiques
  - Spécialisation «partielle» d'une fonction (ou méthode) interdite

Spécialisation d'une classe générique

- Modèle générique d'un vecteur d'éléments

```
template <typename T> class Vecteur {
 private:
  T * elements;
  int taille;
 …
 public: T operator[](int i) { return elements[i]; }
};
```

- Spécialisation du modèle pour *T = bool*

```
template <> class Vecteur<bool> {
 private:
  char * elements;
  int taille;
 …
 public: bool operator[](int i)
 { return ((elements[i/8] >> (i%8)) & 1); }
};
```

Polymorphisme statique

- Mécanisme statique lors de l'instanciation d'un modèle
  - Sélection de la version la plus spécialisée
  - En fonction du jeu de paramètres

⇒ Génération du code le plus dédié possible

- Exemples d'instanciations
  - `moyenne<10>(tab);` ⇒ version générique
  - `moyenne<2>(tab);` ⇒ version spécialisée pour *N = 2*
  - `Vecteur<int> v;` ⇒ version générique
  - `Vecteur<bool> v;` ⇒ version spécialisée pour *T = bool*

Spécialisation partielle

- Spécialisation partielle
  = spécialisation avec un jeu de paramètres incomplet

- Retour sur l'exemple de calcul de moyenne

```
template <typename T, int N> class Moyenne {
 public: static T calculer(T * tab) {
  T somme = T();
  for (int i = 0; i < N; ++i) somme += tab[i];
  return (somme/T(N));
 }
};
```

- Spécialisation pour *N = 2* (*T* reste inconnu)

```
template <typename T> class Moyenne<T,2> {
 public: static T calculer(T * tab)
 { return ((tab[0] + tab[1])/T(2)); }
};
```

Retour sur l'héritage avec généricité

- Exemple
  - ```
    template <typename T> class A
    { … public: void m(); … };
    ```
  - ```
    template <typename T> class B : public A<T>
    { … public: void n() { … m(); … } … };
    ```

- Instanciation partielle ⇒ doute
  - La version générique de A peut être remise en question par une spécialisation
  - La méthode «`m`» peut ne pas exister dans cette spécialisation
    ⇒ appel à la fonction «`m`» si elle existe au lieu de la méthode

- Conseil: toujours utiliser «`this->`» sur un membre hérité
  - Cela provoquera une erreur si une spécialisation ne possède pas ce membre
  - Toujours mieux qu'un comportement implicite (certainement non voulu)
  - Solution: `void n() { … this->m(); … }`

Alias de type

- Deux syntaxes possibles
  - C++03: `typedef pair<int,double> paire_t;`
  - C++11: `using paire_t = pair<int,double>;`
  - Strictement équivalentes ⇒ privilégier la seconde

- Alias de type *template* possible avec «`using`»
  - `template <typename T> using paire_t = pair<int,T>;`
  - Forme d'instanciation «partielle»

- Type interne à une classe
  - Possibilité de déclarer une classe dans une autre
    - `class vector { … class iterator { … }; … };`
  - Et de déclarer des alias de type
    - `class vector { … using iterator = …; … };`

Mot-clé «typename»

- Indique que ce qui suit est un type
- Utilisé dans la déclaration d'un paramètre
  - `template <typename T>`
  - Equivalent à: `template <class T>`
- Utilisé pour lever une ambiguïté
  - A cause de l'instanciation partielle
  - Tant que l'instanciation n'est pas effective ⇒ doute
  - Exemple
    - ```
      template <typename T> class A
      { public: using type_t = T; // type interne };
      ```
    - ```
      template <typename T> class B
      { public: using type_A = typename A<T>::type_t; };
      ```
  - Avec l'instanciation partielle, doute sur la nature de «`A<T>::type_t`»
    - Type ou attribut ? ⇒ `typename`

Variadic template (1/2)

- *Variadic template* = générique à paramètres variables
  - Depuis C++11
  - Liste des paramètres *templates* non fixée
  - A l'instar des arguments variables d'une fonction
- Permet de modéliser des collections hétérogènes
  - `template <typename... TYPES> class Tuple;`
- Syntaxe simple pour instancier le générique
  - `Tuple<int,double,std::string> t;`
- Mais syntaxe pas toujours intuitive pour écrire le générique
  - Mécanisme d'«expansion»
  - Ou approche récursive (métaprogrammation)

Variadic template (2/2)

- Permet de renforcer le contrôle de types
  - `fprintf(const char * format,...);`
    - Impossible d'identifier les types des arguments variables
  - ```
    template <typename... TYPES>
    void fprintf(const char * format, TYPES... args);
    ```
    - Possibilité d'identifier le type de chaque argument variable
- Paramètres variables = «pack» de paramètres
  - Pack représenté par le symbole «`...`»
  - Pack = 0 à *n* paramètres
- Pack de valeurs: `template <int... VALEURS>`
- Pack de types: `template <typename... TYPES>`
    ```

Expansion de pack *(1/3)*

- `template <typename... TYPES>`
  ⇒ `template <typename T1, ... ,typename Tn>`
  - Il s'agit d'une illustration: *T1…Tn* n'existent pas explicitement

- Accès direct à un paramètre d'un pack impossible
  - Un paramètre n'a pas d'identifiant
    - Aucun moyen d'obtenir le nom d'un paramètre
  - Un paramètre n'a pas de numéro
    - Aucun moyen direct d'obtenir le n^{ième} paramètre

- Parcours et identification possibles par récursivité
  - Ecriture de *templates* récursifs ⇒ voir métaprogrammation

- Nombre d'éléments d'un pack: opérateur `sizeof...(`*PACK*`)`

Expansion de pack *(2/3)*

- Pour utiliser ces paramètres ⇒ mécanisme d'expansion
- On décrit un schéma d'expansion
  - Expression contenant l'identifiant d'un pack
  - Et terminée par « . . . »
- Expansion ⇒ réplication du schéma
  - Pour chaque paramètre du pack
  - Séparation par une virgule
- Depuis C++17: introduction des *«fold expressions»*
  - Expansion possible avec les opérateurs binaires

Expansion de pack *(3/3)*

- Supposons un pack
  - `template <typename... TYPES>`
- Exemples d'expansions possibles
  - `TYPES...`
    ⇒ `T1, … ,Tn`
  - `X<TYPES>...`
    ⇒ `X<T1>, … ,X<Tn>`
  - `X<TYPES>::a...`
    ⇒ `X<T1>::a, … ,X<Tn>::a`
  - `X<TYPES>::m(u,v)...`
    ⇒ `X<T1>::m(u,v), … ,X<Tn>::m(u,v)`
  - `const TYPES &... x`
    ⇒ `const T1 & x1, … ,const Tn & xn`