Programmation C++
Programmation générique

Stéphane Vialette

LIGM, Université Paris-Est Marne-la-Vallée

3 février 2013

C++ : Un peu de méta-programmation

- Calcul de constante
- Calcul sur les types
- Vérification de concept
- Polymorphisme statique
- Liste de types
- Hiérarchie automatique
- Manipulation de vecteurs

C++ : Compter le nombre d'objets

```
template<typename T>
struct Compteur {
  static unsigned cp;
  protected:
  Compteur() { ++cp; }
  Compteur(const Compteur& c) { ++cp; }
  ~Compteur() { --cp; }
};

template<typename T>
unsigned Compteur<T>::cp = 0;

struct A : public Compteur<A> {
  /*..*/
};
```

C++ : Calcul de constantes

Grâce aux classes template, on peut faire des calculs récursifs sur les constantes.

```
template<unsigned N>
struct NbBits {
  static const unsigned res = 1+NbBits<N/2>::res;
};

template<>
struct NbBits<0> {
  static const unsigned res = 0;
};
```

C++ : Calcul de constantes

On peut vérifier que la constante est bien calculée au moment de la compilation.

```
template<unsigned N>
struct Aff {};

int main() {
  Aff< NbBits<273>::res >::print;
}
```

Lorsqu'on compile avec `g++` on obtient

```
error : 'print' is not a member of 'Aff<9u>'
```

C++ : Calcul de constantes

Attention, le code suivant n'est pas correct :

```
template<unsigned N>
struct NbBits {
  static const unsigned res =
  (N==0) ? 0 : (1+NbBits<N/2>::res);
};
```

En effet, pour pouvoir évaluer l'expression, le compilateur évalue toutes les sous-expressions, d'où un récurrence infinie.

C++ : Tester l'égalité de deux types

```
template<typename T, typename U>
struct AreEquals {  //  Definition
  static const bool val= false;
};

template<typename T>
struct AreEquals<T,T> {  // Specialisation
  static const bool val= true;
};

template<typename T, typename U>
void truc(const T& x, const U& y) {
  if(AreEquals<T,U>::val) //...
}
```

C++ : Vérification de concept

On peut écrire un type template pour vérifier un concept. Par exemple, pour s'assurer qu'un type possède

- une méthode `static void make(int);` et
- une méthode objet `int get() const` :

On écrit la classe suivante :

```
template<typename T,
         void (*Make)(int) = &T::make,
         int (T::*Get)() = &T::get>
struct CheckConcept{
  static const int check=0;
};
```

C++ : Vérification de concept

- Pour vérifier si un type `truc_t` vérifie le concept, il suffit d'écrire {`CheckConcept<truc_t>::check;`}.
- Si la classe `truc_t` ne possède pas les méthodes dont le type est celui des pointeurs requis en paramètres de `CheckConcept`, le compilateur affiche une erreur.

```
error: 'get' is not a member of 'truc_t'
error: template argument 3 is invalid
```

C++ : Interface statique

Pour indiquer qu'une classe vérifie un concept, on peut lui faire étendre le vérificateur de concept.

```
struct base : public CheckConcept<base> {
  static int r;

  static void make(int n){
    std::cout << n << std::endl;
    r=n;
  }

  int get() const{
    return r;
  }
};
```

C++ : Interface statique

Ceci permet de borner les templates :

```
template<typename T>
int ma_fonction(CheckConcept<T>& ct){
   /******/
}
```

- Si on passe à `ma_fonction` un objet d'un type `T` qui implémente l'interface statique `CheckConcept`, il est accepté.
- Pour que tout ceci soit utile, il faut que `ct` soit capable de fournir les services de l'interface.

C++ : Interface statique

```
template<typename T,
         void (*Make)(int) = &T::make,
         int (T::*Get)() const = &T::get>
struct CheckConcept {
  public:
  T& self() {
    return static_cast<T&>(*this);
  }
  const T& self() const {
    return static_cast<const T&>(*this);
  }
  inline static void make(int n) {
    Make(n);
  }
  inline int get() const {
    return (self().*Get)();
  }
};
```

C++ : Interface statique

Pour simplifier les traitements, on crée une classe `Self` qui gère l'introspection statique :

```
template<typename T>
struct Self {
  public:
  typedef T type;
  type& self() {
    return static_cast<type&>(*this);
  }
  const type& self() const {
    return static_cast<const type&>(*this);
  }
};
```

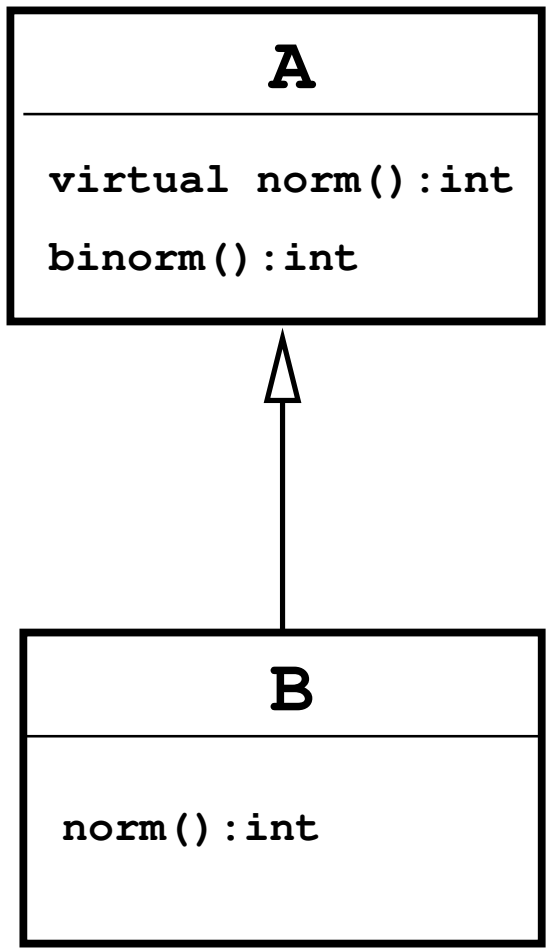
C++ : Interface statique

L'interface s'écrit alors

```
template<typename T,
         void (*Make)(int) = &T::make,
         int (T::*Get)() const = &T::get>
struct CheckConcept : public Self<T>{
  public:
  inline static void make(int n) {
    Make(n);
  }
  inline int get() const {
    return (this->self().*Get)();
  }
};
```

C++ : Rappel : Polymorphisme dynamique

Rappel : de manière dynamique, le polymorphisme s'obtient grâce à `virtual`.



C++ : Rappel : Polymorphisme dynamique

```
struct A {
  virtual int norm() { /***/ }
  int binorm() { return 2*norm(); }
};

struct B : public A {
  int norm() { /***/ }
};

B b;
//...
b.binorm(); // Calcule avec norm() de B
```

C++ : Polymorphisme statique

- On voudrait un comportement similaire, avec des appels de méthodes résolus à la compilation.
- Pour cela, on fera en sorte que chaque classe soit paramétrée par le vrai type de l'objet. Ainsi, la classe `B` est passée en paramètre de la classe qu'elle étend.

```
struct B : public A<B> {
  int norm() { /***/ }
};
```

C++ : Polymorphisme statique

```
template<typename T>
struct Self{
  public:
  typedef T type;
  type& self() {
    return static_cast<type&>(*this);
  }
  const type& self() const {
    return static_cast<const type&>(*this);
  }
};
template<typename T>
struct A : public Self<T> {
  int norm() { /***/ }
  int binorm() { return 2*this->self().norm(); }
};
```

C++ : Polymorphisme statique

La solution proposée fonctionne bien si on veut simuler une classe abstraite `A`. Mais sinon, on ne peut pas instancier d'objet de type `A`, puisqu'il s'agit d'une classe template...

C++ : Polymorphisme statique

Première solution :

```
template<typename T>
struct A_: public Self<T> {
  int norm() { /***/ }
  int binorm() {
    return 2*this->self().norm();
  }
};

struct A : public A_<A> {};

struct B : public A_<B> {
  int norm() {
    /***/
  }
};
```

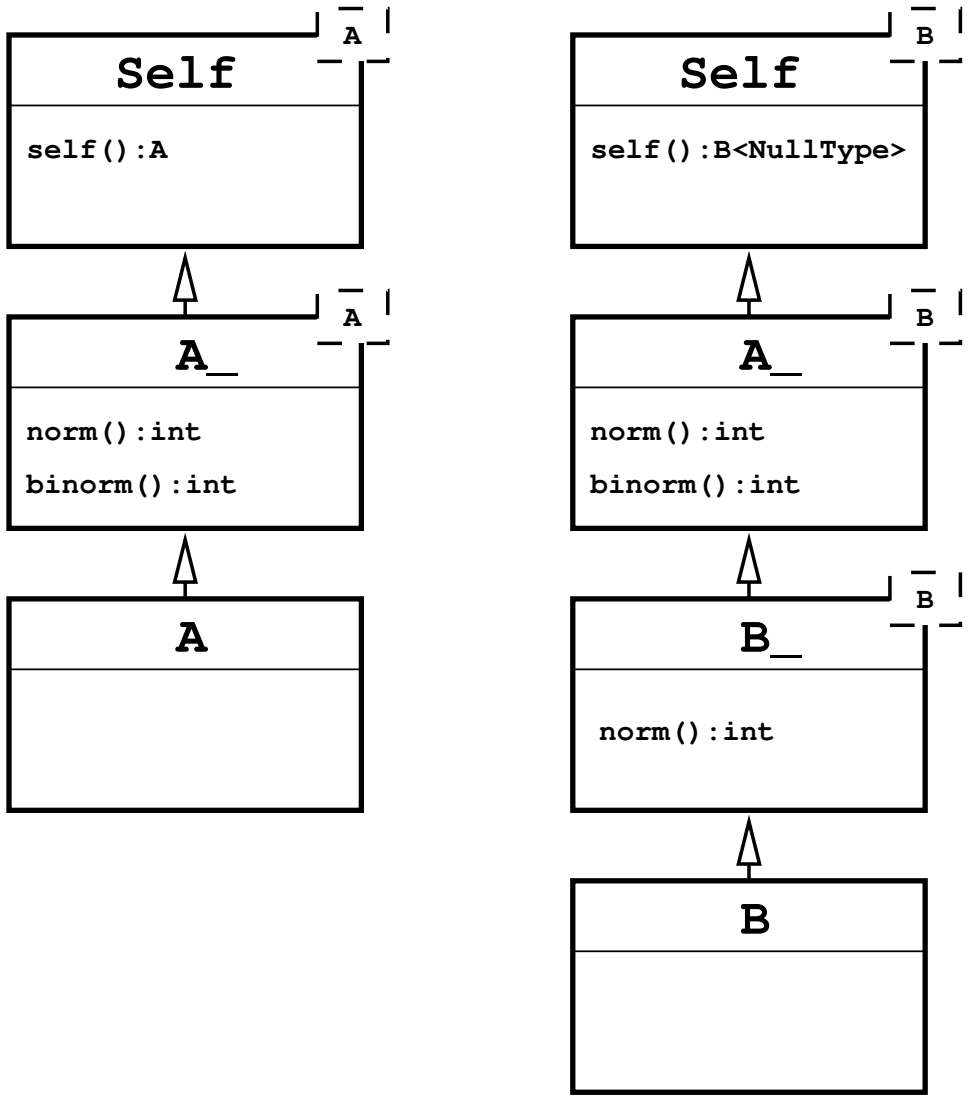
C++ : Polymorphisme statique

On peut même étendre ce principe à toutes les classes de la hiérarchie :

```
template<typename T>
struct B_ : public A_<T> {
  int norm() {
    /***/
  }
};

struct B : public B_<B> {};
```

C++ : Polymorphisme statique



C++ : Polymorphisme statique

Seconde solution :

On crée un type `NullType` pour paramétrer un type qu'on souhaite instancier.

```
struct NullType {};
```

Le type `A<T>` représente alors un objet dont le *vrai* type est `T`, sauf si `T=NullType`, auquel cas le vrai type est `A<NullType>`.

C++ : Polymorphisme statique

On peut écrire une classe qui fait ce calcul :

```
template<template<typename> class A, typename T>
struct TrueType {
  typedef T type;
};

template<template<typename> class A>
struct TrueType<A,NullType> {
  typedef A<NullType> type;
};
```

C++ : Polymorphisme statique

La classe `A` s'écrit alors :

```
template<typename T=NullType>
struct A :
public Self<typename TrueType<A,T>::type > {
  int norm() {
    /***/
  }
  int binorm() {
    return 2*this->self().norm();
  }
};
```

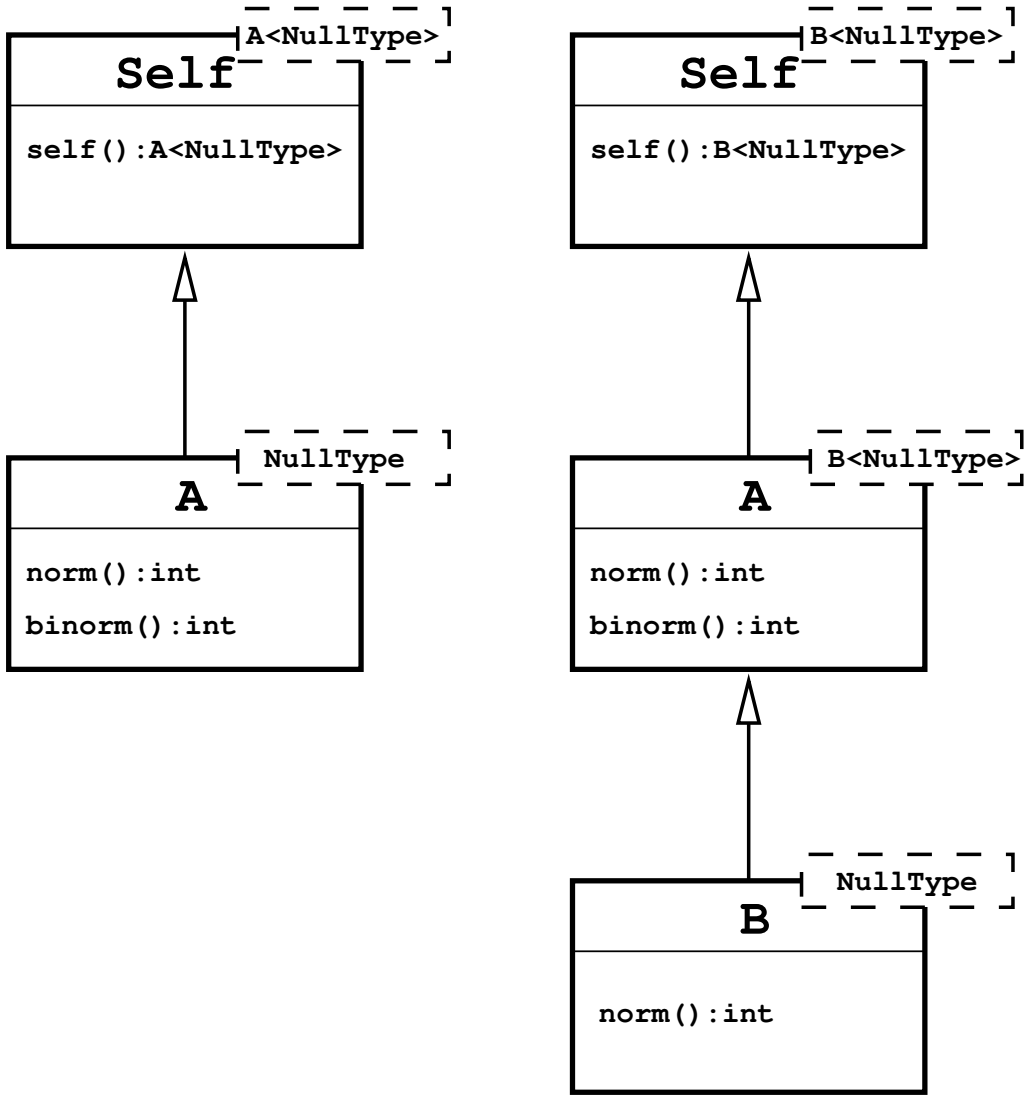
Et on peut instancier un objet de type `A` en écrivant `A<> a;`

C++ : Polymorphisme statique

On peut étendre ce principe à toutes les classes de la hiérarchie :

```
template<typename T=NullType>
struct B :
public A<typename TrueType<B,T>::type > {
  int binorm() {
    return 2*this->self().norm();
  }
};
```

C++ : Polymorphisme statique



C++ : Liste de types

```
struct NullType{};

template<typename H, typename T>
struct TypeList {
  typedef H head;
  typedef T tail;
};

typedef
TypeList<int, TypeList<double, NullType> > liste_t;
```

C++ : Liste de types

```
template<typename List>
struct ListLenght{
  static const int value =
  1+ListLenght<typename List::tail>::value;
};

template<>
struct ListLenght<NullType>{
  static const int value = 0;
};
```

C++ : Liste de types

```
template<typename List, typename T>
struct ListAdd {
  typedef TypeList<
  typename List::head,
  typename ListAdd<typename List::tail, T>::type
  > type;
};

template<>
struct ListAdd<NullType, T>{
  typedef TypeList<T, NullType> type;
};
```

C++ : Liste de types

```
template<typename List>
struct ListReverse {
  typedef typename
  ListReverse<typename
  List::tail>::type rtail;
  typedef TypeList< typename rtail::head,
  ListAdd<rtail,
  typename List::head> > type;
};
template<>
struct ListReverse<NullType>{
  typedef NullType type;
};
```

C++ : Liste de types

```
template<typename T,typename U,
typename R1,typename R2>
struct IfEqualTypes {
  typedef R2 type;
};

template<typename T,typename R1,typename R2>
struct IfEqualTypes<T,T,R1,R2>{
  typedef R1 type;
};
```

C++ : Liste de types

```
template<List,T>
struct  ListRemove{
  typedef typename List::head head;
  typedef typename List::tail tail;
  typedef IfEqualTypes<T,head ,
  tail,
  typename TypeList<head,
  typename ListRemove<tail,T>::type >
  > type;
};

template<T>
struct ListRemove<NullType,T>{
  typedef NullType type;
};
```

C++ : Liste de types

```
template<List>
struct  ListUnique {
  typedef typename List::head head;
  typedef
  typename ListUnique<typename List::tail>::type tail;
  typedef TypeList<head,
  typename ListRemove<tail,head>::type >
  > type;
};

template<>
struct ListUnique<NullType>{
  typedef NullType type;
};
```

C++ : Créer des listes

On peut utiliser des fabriques pour faciliter la création des listes de types.

C++ : Créer des listes

```
template<typename T1, typename T2=NullType,
 typename T3=NullType, typename T4=NullType>
struct MakeList {
  typedef TypeList<T1,
   typename MakeList<T2,T3,T4,NullType>::type
   > type;};

template<>
struct MakeList<NullType,NullType,
NullType,NullType> {
  typedef NullType type;
};
```

C++ : Créer des listes

On peut aussi écrire des classes pour concaténer les listes, supprimer les doublons, etc.

C++ : Hiérarchie automatique

On peut grâce aux templates et aux listes de types engendrer automatiquement une hiérarchie.
Le but peut être

- de créer un type qui étend tous les types de la liste ;
- d'avoir une méthode définie pour chaque type de la liste

C++ : Hiérarchie automatique

```
template<typename T>
struct MonHandler {
  bool ma_methode(const T& t) const {
    /****/
  }
};
```

C++ : Hiérarchie automatique

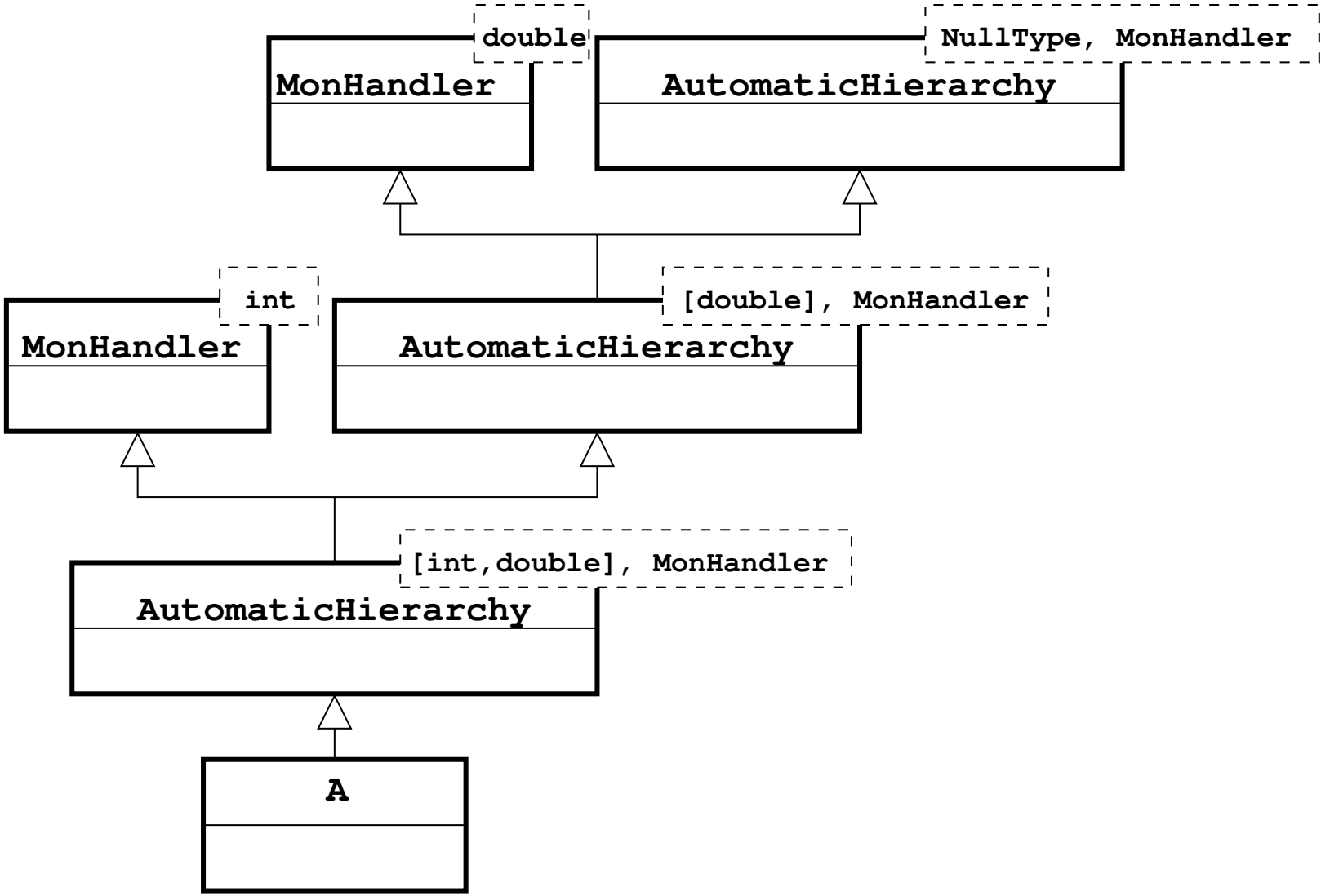
```
template< typename TList,
 template <typename> class Handler>
struct AutomaticHierarchy :
 public Handler<typename TList::head>,
 public AutomaticHierarchy<typename TList::tail,
                           Handler>
{};

template<template <typename> struct Handler >
struct AutomaticHierarchy<NullType, Handler>
{};
```

C++ : Hiérarchie automatique

```
struct A :
AutomaticHierarchy<MakeList<int,double>::type,
MonHandler> {
   /****/
};
```

C++ : Hiérarchie automatique



C++ : Hiérarchie automatique

Un autre type de hiérarchie automatique est celle qui permet d'hériter plusieurs fois de la même classe.

On veut par exemple implanter la composition d'un objet de type Voiture avec 4 objets de type Roue, ce qui se fait en C++ via l'héritage privé.

C++ : Hiérarchie automatique

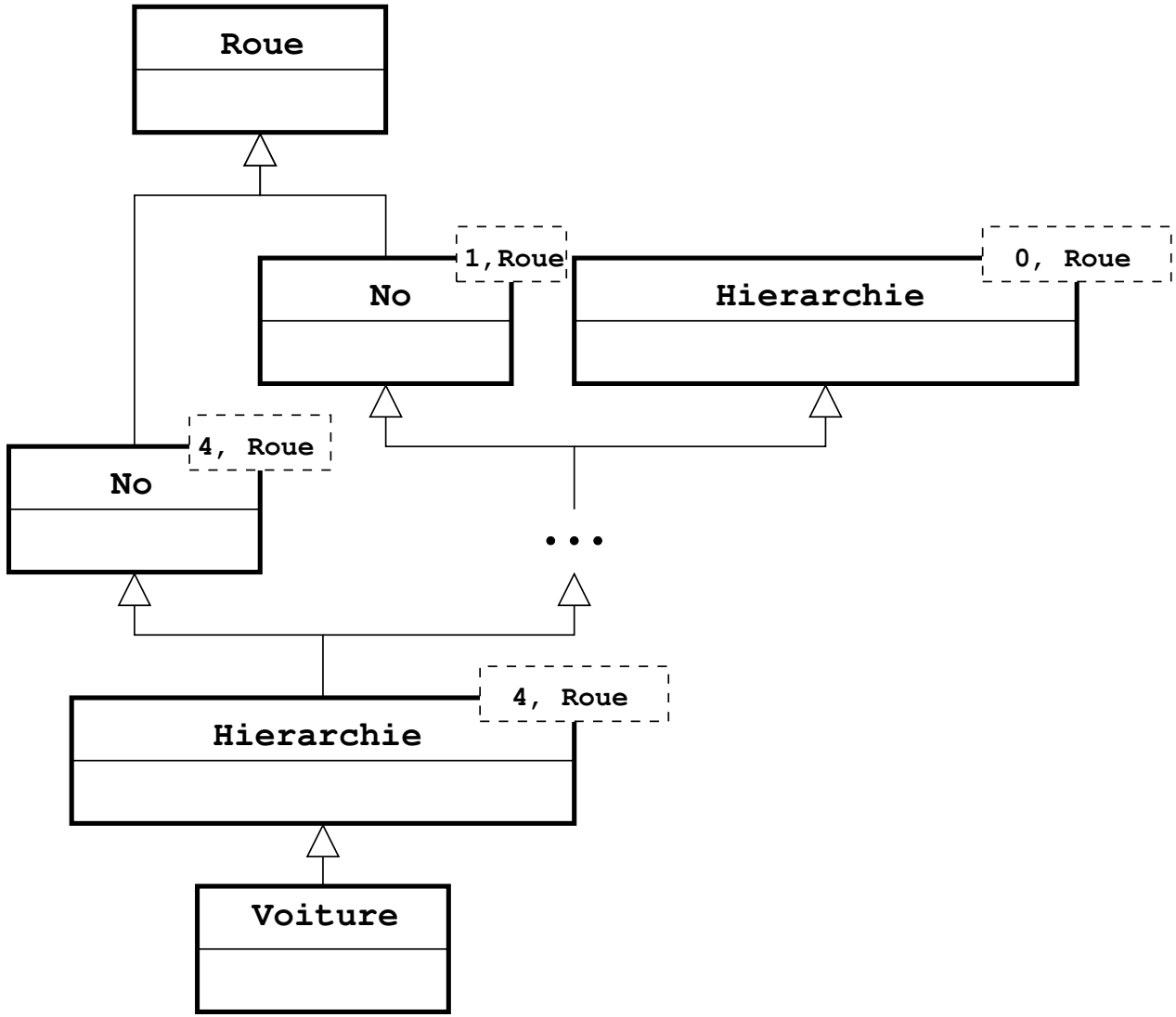
```
template<unsigned N, typename T>
struct No : T{};

template<unsigned N, typename T>
struct Hierarchy : No<N,T>, Hierarchy<N-1, T> {};

template<typename T>
struct Hierarchy<0,T>{};

struct Voiture :
private Hierarchy<4,Roue> {
   /****/
};
```

C++ : Hiérarchie automatique



C++ : Hiérarchie automatique

On pourra ensuite appeler la méthode `truc` de la troisième roue `Roue` avec `this->No<3,Roue>::truc(...)`.

C++ : Expressions template

On veut écrire une bibliothèque `Vector` qui permette d'écrire, par exemple

```
Vector U,V,W,X; //vecteurs de meme taille
//...
X = ( V+W )*5 - U;
```

Si on surcharge classiquement les opérateurs pour les vecteurs, chaque sous-expression nécessite un parcours linéaire et la création d'un objet temporaire.

Comment faire en sorte qu'un tel calcul se fasse avec un seul parcours et sans objet temporaire ?

C++ : Expressions template

La solution consiste à faire en sorte que `( V+W )*5 - U` construise un arbre d'itérateurs ;

chaque feuille est un itérateur sur le vecteur qui est un atome de l'expression,

chaque nœud interne correspond à un opérateur arithmétique, il fait avancer ses fils avec lui et son déréférencement consiste à appliquer l'opérateur au déréférencement de ses fils.

L'opérateur d'affectation appliqué à cet arbre provoque le parcours qui permet de renseigner le résultat.

C++ : Expressions template

```
struct Vector {
  double Elements[3];
  typedef double* iterator;
  typedef const double* const_iterator;
  template<typename T>
  const Vector& operator=(T t);
  iterator begin() {
    return Elements;
  }
  iterator end() {
    return Elements + 3;
  }
  const_iterator begin() const {
    return Elements;
  }
  const_iterator end() const {
    return Elements+3;
  }
};
```

C++ : Expressions template

```
// Ce qui est commun a tous les noeuds binaires
template <class T, class U> struct BinaryOpBase {
  BinaryOpBase(T I1, U I2) : It1(I1), It2(I2)
  {
    // empty
  }
  inline void operator ++() {
    ++It1;
    ++It2;
  }

  T It1;
  U It2;
};
```

C++ : Expressions template

```
// Pour chaque noeud, on fixe le dereferencement
template <class T, class U>
struct AddOp : public BinaryOpBase<T, U> {
  AddOp(T I1, U I2) :
  BinaryOpBase<T, U>(I1, I2) {}
  inline
  double operator *() {
    return *It1 + *It2;
  }
};
template <class T, class U>
inline
AddOp<T, U> MakeAdd(const T& t, const U& u) {
  return AddOp<T, U>(t, u);
}
```

C++ : Expressions template

```
template <class T, class U>
AddOp<T, U> operator +(const T& v1, const U& v2) {
  return MakeAdd(v1, v2);
}
AddOp<Vector::const_iterator,
      Vector::const_iterator>
operator +(const Vector& v1, const Vector& v2) {
  return MakeAdd(v1.begin(), v2.begin());
}
//et versions (const Vector& v1, const T& v2)
et (const T& v1, const Vector& v2)
```

C++ : Expressions template

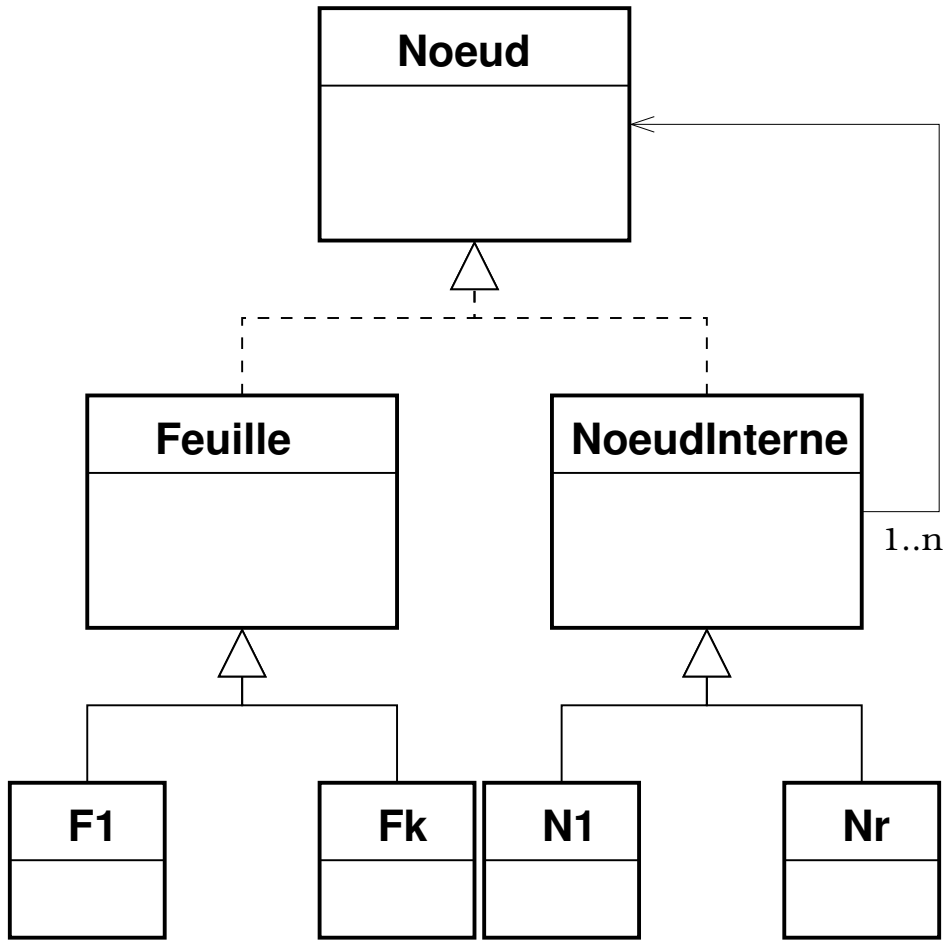
Il suffit alors de surcharger l'opérateur d'affectation.

```
template <class T>
const Vector& Vector::operator =(T Expr) {
  for (iterator i = begin(); i != end();
       ++i, ++Expr)
    *i = *Expr;
  return *this;
}
```

et voilà !

Revisitons le visiteur

Considérons une hiérarchie définissant une structure arborescente :



Revisitons le visiteur

L'objectif du visiteur est de permettre d'ajouter des traitements (affichage, mise à jour, etc.) exigeant le parcours des éléments d'une telle structure sans avoir à modifier à chaque fois les classes définissant la structure.

Le traitement sera effectué par un objet, appelé visiteur ; définir un nouveau traitement consistera à implémenter un nouveau visiteur.

Revisitons le visiteur

Un visiteur doit spécifier le traitement pour chaque type concret de nœud :

```
struct Visiteur {
  virtual void visit(F1& f) = 0;
  //...
  virtual void visit(Fk& f) = 0;
  virtual void visit(N1& n) = 0;
  //...
  virtual void visit(Nk& n) = 0;
};
```

Revisitons le visiteur

A priori, lorsqu'on applique le visiteur à un nœud, on ne connaît pas sa nature exacte ; pour résoudre le type du nœud, on utilise à la fois le polymorphisme dynamique et l'injection de contrôle.

Revisitons le visiteur

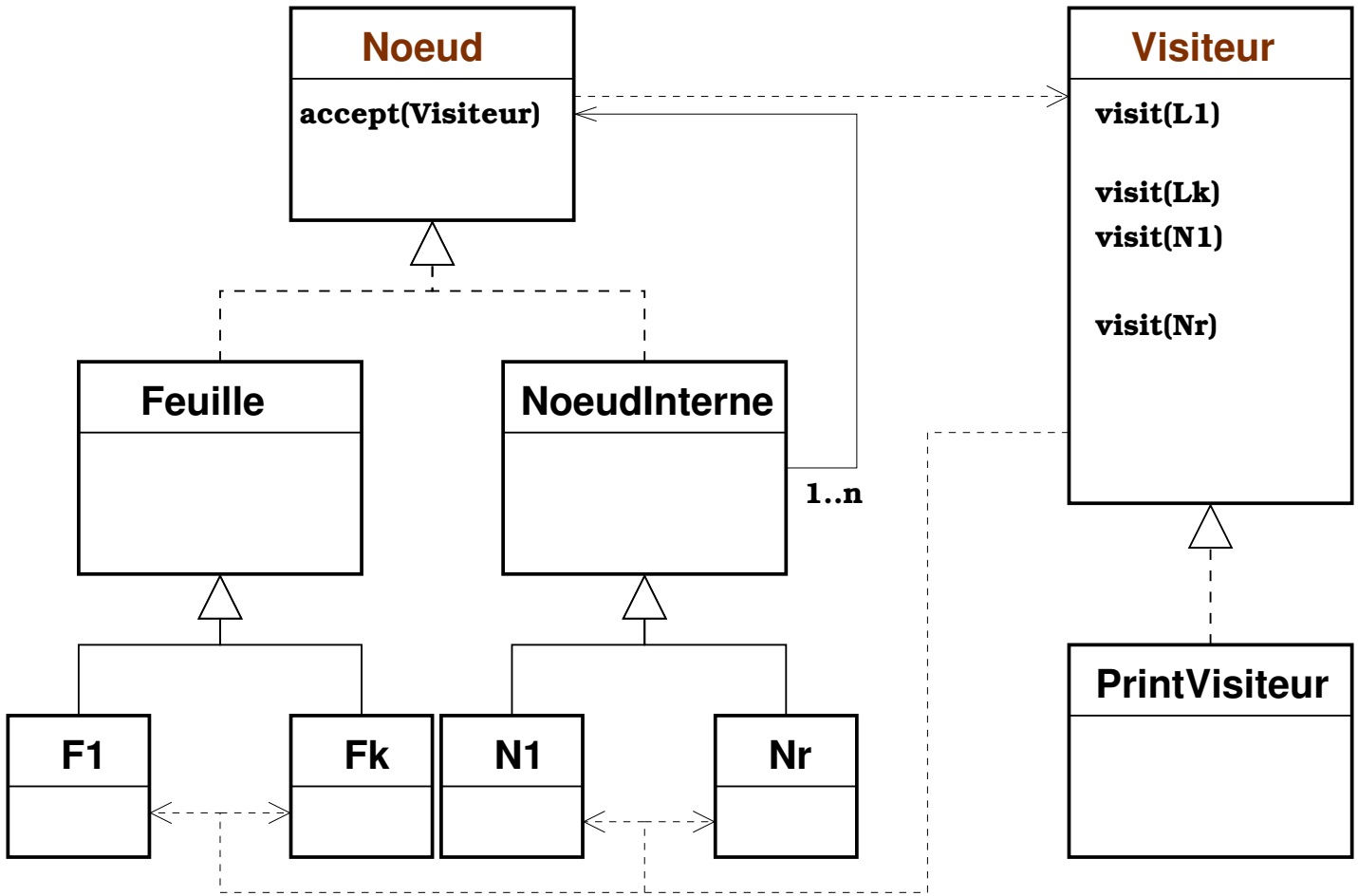
Plutôt que d'appliquer le visiteur à un nœud, c'est le nœud qui accepte que le visiteur lui soit appliqué :

```
struct Node {
  virtual void accept(Visiteur& v) = 0;
  //...
};
struct F1 {
  void accept(Visiteur& v) {
    v.visit(*this);
  }
};
```

Chaque classe concrète contient une implémentation identique de cette méthode.

Revisitons le visiteur

À l'intérieur de chaque méthode `visit`, pour visiter les éventuels fils du nœud, on fait aussi appel à leur méthode `accept`.



Revisitons le visiteur

Inconvénients :

- le visiteur induit une dépendance cyclique entre les classe : `Node` dépend de `Visiteur` qui dépend des classes concrètes de nœuds qui héritent de `Node` ;
- si jamais on veut étendre la hiérarchie des nœuds, il faut remettre à jour chaque classe de la hiérarchie des visiteurs ;

Revisitons le visiteur

- pour chaque hiérarchie décrivant une structure, il faut une hiérachie de visiteurs distincte ;
- si on veut traiter proprement les visiteurs ”constants” et les visiteurs non constants, il faut deux hiérarchies distinctes de visiteurs.

Visiteur acyclic

Pour lever le problème des cycles de dépendance, on déclare une interface de visiteur pour chaque type de nœud.

La classe `Visiteur` devient une classe vide.

```
struct Visiteur {
  virtual ~Visiteur() {}
}

struct NiVisiteur {
  virtual void visit(Ni& n) = 0;
};
```

Visiteur acyclic

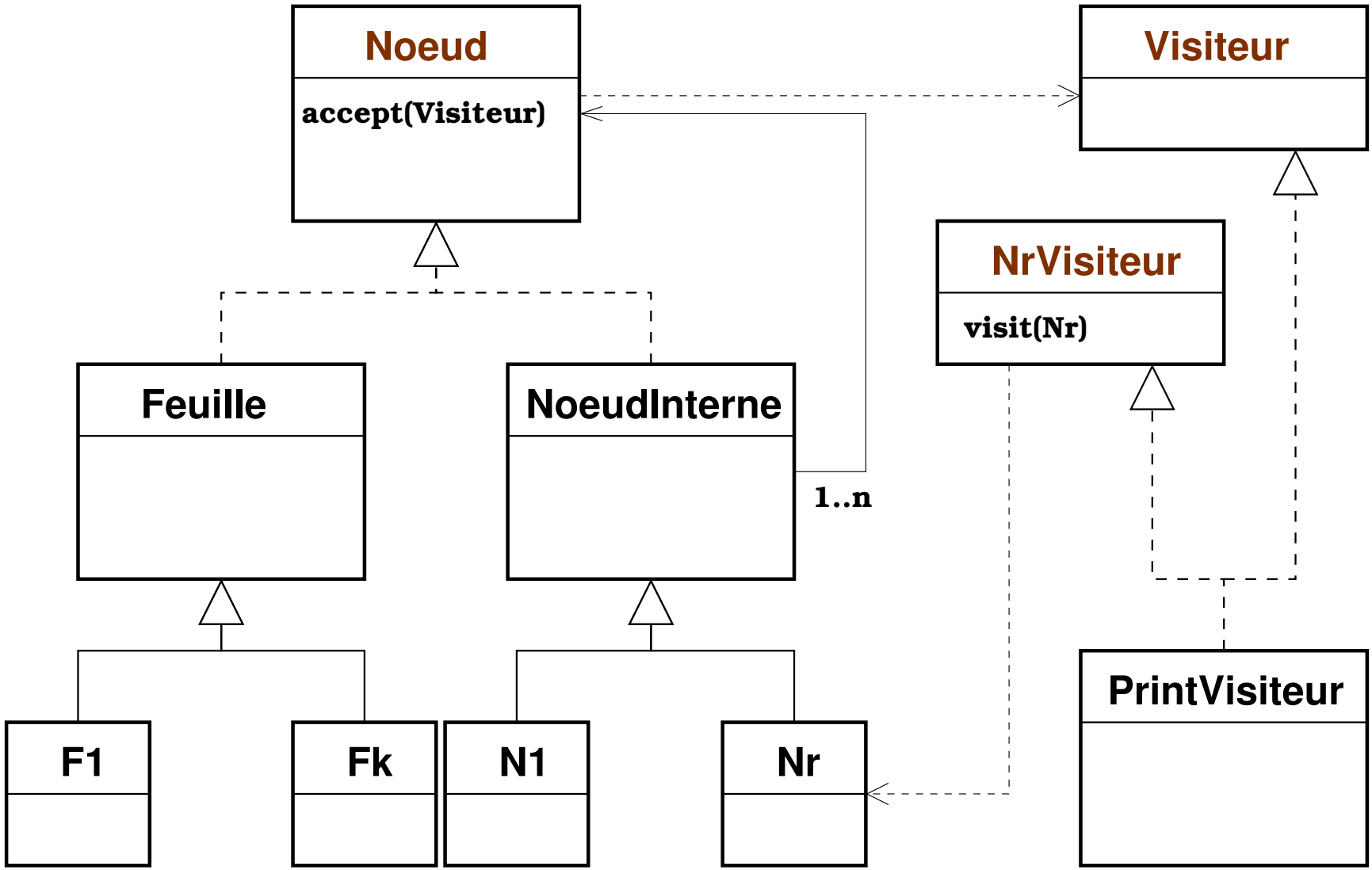
Une classe concrète de visiteur implémente donc `Visiteur` et toutes les interfaces correspondant aux nœuds qu'il peut visiter (du coup, il n'est pas obligé de supporter tous les types de nœuds).

Visiteur acyclic

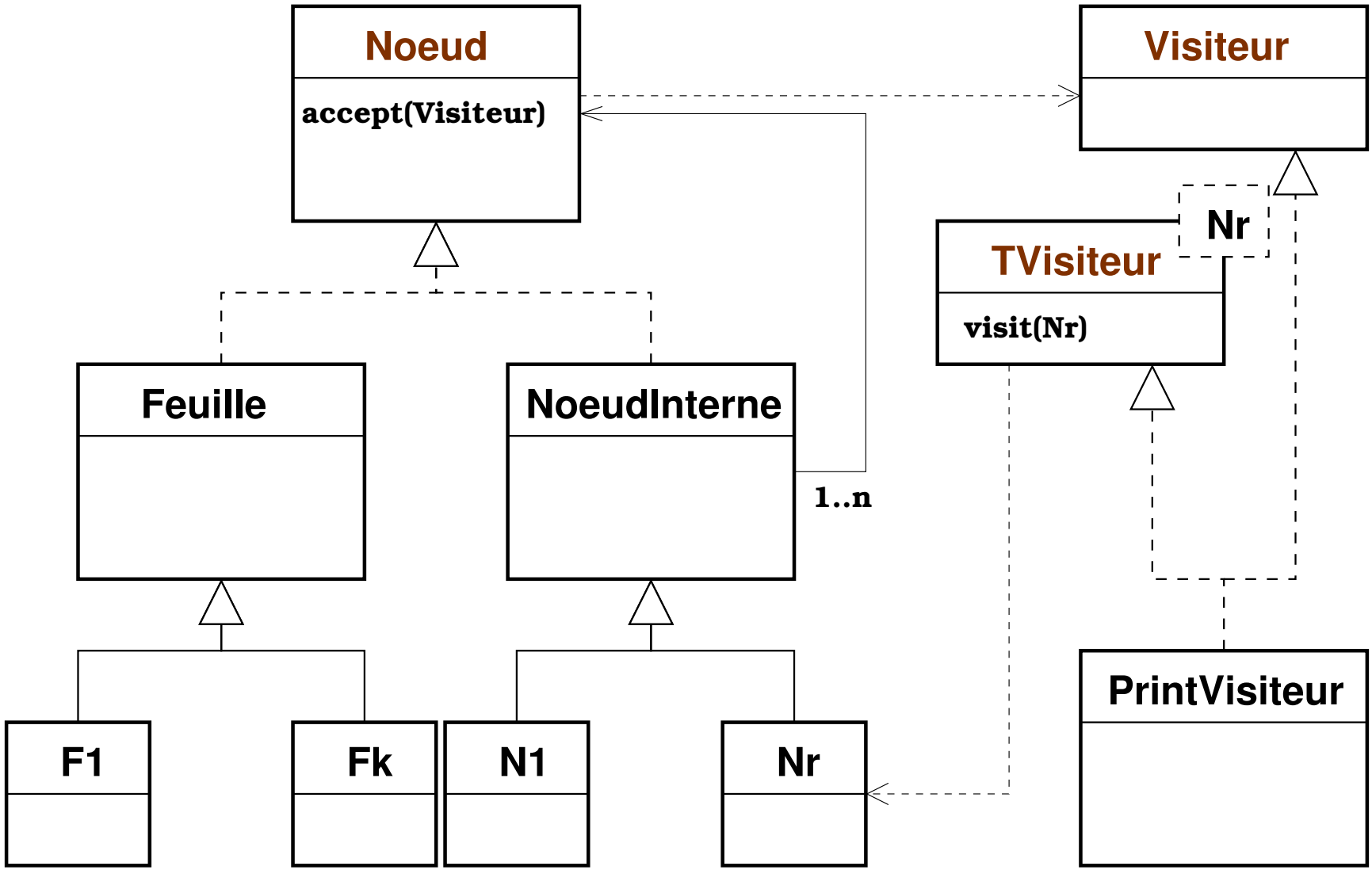
Dans chaque classe de la hiérarchie, on a une méthode `accept` (toujours déclarée dans `Node`) spécifique :

```
struct Ni : public Noeud {
  virtual void accept(Visiteur& v){
    NiVisiteur* p =
    dynamical_cast<NiVisiteur*>(&p);
    if (p) {
      p->visit(*this);
    }
    else {
      /* gestion de l'erreur */
    }
  }
};
```

Visiteur acyclic



Visiteur acyclic + template (1)



Visiteur acyclic + template (1)

```
template<typename T>
struct TVisiteur {
  virtual void visit(T& n) =0;
};
```

On peut en profiter pour choisir le type de retour de la méthode `visit`, pour s'adapter à la hiérarchie qu'on visite...

Visiteur acyclic + template (2)

```
template<typename T, typename R=void>
struct TVisiteur {
  virtual R visit(T& n) = 0;
  typedef R return_type;
};
```

On peut en profiter pour choisir le type de retour de la méthode `visit`...

Visiteur acyclic + template (2)

Un visiteur concret sera donc de la forme :

```
struct EvalVisiteur : public Visiteur,
public TVisiteur<F1,int>,
public TVisiteur<N3,int> {
  int visit(F1& f) {
    /*...*/
  }
  int visit(N3& n) {
    /*...*/
  }
};
```

- On peut utiliser des listes de types pour spécifier quels nœuds sont gérés...
- Tous les `visit` doivent retourner un même type, qui est celui retourné par `accept`

Visiteur acyclic + template (2)

En utilisant les hiérachies automatiques, on peut même avoir quelque chose comme :

```
struct EvalVisiteur :
public VisiteurList<MakeList<F1,N3>::type,int> {
  int visit(F1& f) {
    /*...*/
  }
  int visit(N3& n) {
    /*...*/
  }
};
```

Visiteur acyclic + template

Il faut s'assurer que la hiérarchie acceptante fournit bien des méthodes `accept` correctes. On crée une classe pour gérer cela.

Visiteur acyclic + template

```
template<typename R=void>
struct Visitable {
  typedef R r_type;
  virtual r_type accept(Visiteur& v) = 0;
};

struct Node : public Visitable<int> {/***/}

struct Ni : public Node {
  r_type accept(Visiteur& v) {
    Visiteur<Ni,R>* p =
      dynamic_cast<Visitor<Ni,R>*>(&v);
    if (p) return p->visit(node);
    else {/** gestion d'erreur **/}
  }
  //...
};
```

Visiteur acyclic + template

Pour éviter au client qui voudrait ajouter des classes à la structure d'écrire une méthode `accept` compliqué, on veut écrire une macro, pour avoir :

```
struct Ni : public Node {
  ACCEPT_VISITOR
  //...
};
```

Le seul problème est que dans cette macro, on ne peut pas utiliser le type de la classe pour le `dynamic_cast`...

Visiteur acyclic + template

On transforme cette méthode objet en méthode template statique...

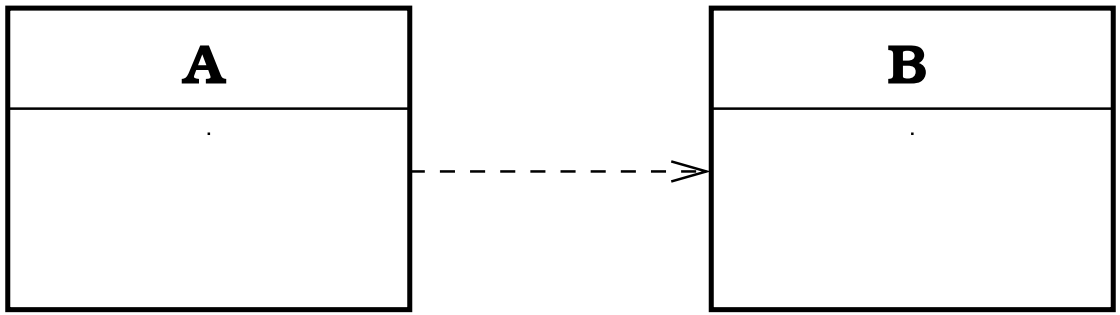
```
template<typename R=void>
struct Visitable {
  //...
  template<typename N>
  static r_type acceptImpl(N& noeud, Visiteur& v)
    Visiteur<N,R>* p =
      dynamic_cast<Visitor<N,R>*>(&v);
    if (p) return p->visit(node);
    else {/** gestion d'erreur **/}
  }
};
```

Visiteur acyclic + template

. . . ce qui est dans la macro se contente d'utiliser le polymorphisme pour retrouver le type exact du nœud.

```
#define ACCEPT_VISITOR \
return_type accept(Visiteur& v) \
{
  return acceptImpl(*this, v);
}
```

Association



En C++, on a plusieurs possibilités pour implémenter qu'une classe `A` est associée à une classe `B`.

- `A` a un champ de type B ;
- `A` a un champ de type B* ;
- `A` a un champ de type B& ;
- `A` hérite de B.

Laquelle choisir ?

Association

Stocker un pointeur de type `B*` est pertinent dans l'une des deux situations suivantes :

- l'objet de type `B` a une vie indépendante de l'objet `A`, il peut être associé à plusieurs objet de type `A` et un objet `A` n'est pas forcément à sa création associé à un objet de type `B` ;
- `A` peut être en réalité associé à un sous-type de `B` (qui est alors généralement polymorphe) : la taille de cet objet peut alors varier et il doit être stocké en dehors de la classe ; si l'objet `B` est créé en même temps que l'objet `A`, ce sera via `new`, il faut alors que `A` appelle `delete` dans son destructeur.

Association

Stocker une référence de type `B&` est pertinent si l'objet `B` existe avant l'objet `A` et que celui-ci n'en change pas durant toute la durée de sa vie.

Association : Composition

Stocker un champ de type `B` ou hériter de `B` revient au même. Dans un cas comme dans l'autre, la durée de vie de l'objet `B` est liée à celle de `A`.

Toutefois, on peut changer sa valeur dans les deux cas.

Avec un champ :

```
A a(/*...*/); // Creation de a et de a.b
//...
a.b = valeurB;
```

Avec héritage :

```
A a(/*...*/); // Creation de a et de son pere
//...
static_cast<B&>(a) = valeurB;
```