École Normale Supérieure

Langages de programmation et compilation

Jean-Christophe Filliâtre

Cours 10 / 9 décembre 2016

dans le cours d'aujourd'hui, on se focalise sur les **langages à objets**

bref historique :

- Simula I et Simula 67 (années 60)
- Smalltalk (1980)
- C++ (1983)
- Java (1995)

on utilise ici le langage Java à des fins d'illustration

brève présentation des concepts objets

le premier concept objet est celui de **classe** ; la déclaration d'une classe introduit un nouveau type

en toute première approximation, une classe peut être vue comme un enregistrement

```
class Polar {
  double rho;
  double theta;
}
```

ici `rho` et `theta` sont les deux **champs** de la classe `Polar`, de type `double`

on crée une **instance** particulière d'une classe, appelée un **objet**, avec la construction `new` ; ainsi

```
Polar p = new Polar();
```

déclare une nouvelle variable locale `p`, de type `Polar`, dont la valeur est une nouvelle instance de la classe `Polar`

l'objet est alloué sur le tas ; ses champs recoivent ici des valeurs par défaut (en l'occurrence 0)

on peut accéder aux champs de `p`, et les modifier, avec la notation usuelle

```
p.rho = 2;
p.theta = 3.14159265;
double x = p.rho * Math.cos(p.theta);
p.theta = p.theta / 2;
```

on peut introduire un ou plusieurs **constructeurs**, dans le but d'initialiser les champs de l'objet

```
class Polar {
  double rho, theta;
  Polar(double r, double t) {
    if (r < 0) throw new Error("Polar: negative length");
    rho = r;
    theta = t;
  }
}
```

ce qui permet alors d'écrire

```
  Polar p = new Polar(2, 3.14159265);
```

supposons maintenant que l'on veuille maintenir l'**invariant** suivant pour tous les objets de la classe `Polar`

$$0 \leq \texttt{rho} \quad \wedge \quad 0 \leq \texttt{theta} < 2\pi$$

pour cela on déclare les champs `rho` et `theta` **privés**, de sorte qu'ils ne sont plus visibles à l'extérieur de la classe `Polar`

```
class Polar {
  private double rho, theta;
  Polar(double r, double t) { /* garantit l'invariant */ }
}
```

depuis une autre classe :

```
  p.rho = 1;
```

```
complex.java:19: rho has private access in Polar
```

la valeur du champ `rho` peut néanmoins être fournie par l'intermédiaire d'une **méthode**, c'est-à-dire d'une fonction fournie par la classe `Polar` et applicable à tout objet de cette classe

```
class Polar {
  private double rho, theta;
  ...
  double norm() { return rho; }
}
```

pour un objet `p` de type `Polar`, on appelle la méthode `norm` ainsi

```
p.norm()
```

que l'on peut voir naïvement comme l'appel `norm(p)` d'une fonction

```
  double norm(Polar x) { return x.rho; }
```

les objets remplissent donc un premier rôle d'**encapsulation**

l'équivalent en OCaml serait obtenu grâce aux types abstraits

champs et méthodes statiques

il est possible de déclarer un champ comme **statique** et il est alors lié à la classe et non aux instances de cette classe ; dit autrement, il s'apparente à une variable globale

```
class Polar {
  double rho, theta;
  static double two_pi = 6.283185307179586;
```

de même, une **méthode** peut être **statique** et elle s'apparente alors à une fonction traditionnelle

```
  static double normalize(double x) {
    while (x < 0) x += two_pi;
    while (x >= two_pi) x -= two_pi;
    return x;
  }
}
```

ce qui n'est pas statique est appelé **dynamique**

le second concept objet est celui d'**héritage** : une classe `B` peut être définie comme héritant d'une classe `A`

```
class B extends A { ... }
```

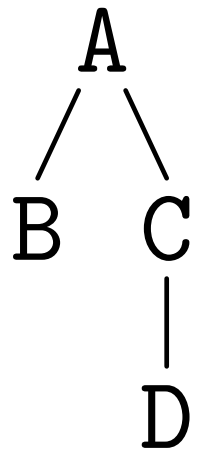
les objets de la classe `B` héritent alors de tous les champs et méthodes de la classe `A`, auxquels ils peuvent ajouter de nouveaux champs et de nouvelles méthodes

la notion d'héritage s'accompagne d'une notion de **sous-typage** : toute valeur de type `B` peut être vue comme une valeur de type `A`

en Java, chaque classe hérite d'au plus une classe ; on appelle cela l'**héritage simple**, par opposition à l'héritage multiple

la relation d'héritage forme donc un arbre

```
class A { ... }
class B extends A { ... }
class C extends A { ... }
class D extends C { ... }
```



considérons une classe `Graphical` pour des objets graphiques (cercles, rectangles, etc.)

```
class Graphical {
  int x, y;           /* centre */
  int width, height;

  void move(int dx, int dy) { x += dx; y += dy; }
  void draw() { /* ne fait rien */ }
}
```

pour représenter un rectangle, on hérite de la classe `Graphical`

```
class Rectangle extends Graphical {
```

on hérite donc des champs `x`, `y`, `width` et `height` et des méthodes `move` et `draw`

on peut écrire un constructeur qui prend en arguments deux coins du rectangle

```
  Rectangle(int x1, int y1, int x2, int y2) {
    x = (x1 + x2) / 2;
    y = (y1 + y2) / 2;
    width = Math.abs(x1 - x2);
    height = Math.abs(y1 - y2);
  }
```

redéfinition (*overriding*)

on peut utiliser directement toute méthode héritée de `Graphical`

```
Rectangle p = new Rectangle(0, 0, 100, 50);
p.move(10, 5);
```

pour le dessin, en revanche, on va **redéfinir** la méthode `draw` dans la classe Rectangle (*overriding*)

```
class Rectangle extends Graphical {
  ...
  void draw() { /* dessine le rectangle */ }
}
```

et le rectangle sera alors effectivement dessiné quand on appelle

```
p.draw();
```

on procède de même pour les cercles ; ici on ajoute un champ `radius` pour le rayon, afin de le conserver

```
class Circle extends Graphical {
  int radius;
  Circle(int cx, int cy, int r) {
    x = cx;
    y = cy;
    radius = r;
    width = height = 2 * radius;
  }
  void draw() { /* dessine le cercle */ }
}
```

la construction `new C(...)` construit un objet de classe `C`, et la classe de cet objet ne peut être modifiée par la suite ; on l'appelle le **type dynamique** de l'objet

en revanche, le **type statique** d'une expression, tel qu'il est calculé par le compilateur, peut être différent du type dynamique, du fait de la relation de sous-typage introduite par l'héritage

exemple

```
Graphical g = new Rectangle(0, 0, 100, 50);
g.draw(); // dessine le rectangle
```

pour le compilateur, `g` a le type `Graphical`, mais le rectangle est effectivement dessiné : c'est donc bien la méthode `draw` de la classe `Rectangle` qui est exécutée

introduisons enfin un troisième type d'objet graphique, qui est simplement la réunion de plusieurs objets graphiques

on commence par introduire des listes chaînées de `Graphical`

```
class GList {
  Graphical g;
  GList next;
  GList(Graphical g, GList next) {
    this.g = g;
    this.next = next;
  }
}
```

(`this` désigne l'objet dont on appelle la méthode ; il est utilisé ici pour distinguer le paramètre formel g du champ g de même nom)

un groupe hérite de `Graphical` et contient une `GList`

```
class Group extends Graphical {
  GList group;

  Group() { group = null; }

  void add(Graphical g) {
    group = new GList(g, group);
    // + mise à jour de x, y, width, height
  }
```

il reste à redéfinir les méthodes `draw` et `move`

```
  void draw() {
    for (GList l = group; l != null; l = l.next)
      l.g.draw();
  }

  void move(int dx, int dy) {
    x += dx; y += dy;
    for (GList l = group; l != null; l = l.next)
      l.g.move(dx, dy);
  }
}
```

note : il est clair sur cet exemple que le compilateur ne peut pas connaître le type dynamique de `l.g`

remarque : il n'y a pas lieu de créer d'instance de la classe `Graphical` ; c'est ce que l'on appelle une **classe abstraite**

certaines méthodes, comme `draw`, peuvent alors n'être définies que dans les sous-classes

```
abstract class Graphical {
  int x, y;
  int width, height;

  void move(int dx, int dy) { x += dx; y += dy; }
  abstract void draw();
}
```

il est alors obligatoire de définir `draw` dans toute sous-classe (non abstraite) de `Graphical`

en Java, plusieurs méthodes d'une même classe peuvent porter le même nom, pourvu qu'elles aient des arguments en nombre et/ou en nature différents ; c'est ce que l'on appelle la **surcharge** (*overloading*)

```
class Polar {
  ...
  void mult(Polar p) {
    rho *= p.rho; theta = normalize(theta + p.theta);
  }
  void mult(double f) {
    rho *= f;
  }
}
```

puis

```
  p.mult(p) ... p.mult(2.5) ...
```

la surcharge est résolue au typage

tout se passe comme si on avait écrit

```
class Polar {
  ...
  void mult_Polar(Polar p) {
    rho *= p.rho; theta = normalize(theta + p.theta);
  }
  void mult_double(double f) {
    rho *= f;
  }
}
```

puis

```
  p.mult_Polar(p) ... p.mult_double(2.5) ...
```

on peut également surcharger les constructeurs

```
class Rectangle extends Graphical {
  Rectangle(int x1, int y1, int x2, int y2) {
    ...
  }
  Rectangle(int x1, int y1, int w) {
    this(x1, y1, x1 + w, y1 + w); /* construit un carré */
  }
  ...
```

la notion de classe remplit plusieurs fonctions

- **encapsulation**, à travers des règles de visibilité
- organisation de l'**espace de noms**, à travers la possibilité d'utiliser le même nom dans des classes différentes ou pour des profils différents
- **factorisation de code**, à travers l'héritage et la redéfinition

ce sont des objectifs essentiels du **génie logiciel**, atteints par des moyens différents dans d'autres langages (exemple : polymorphisme, ordre supérieur, ou encore système de modules, dans le cas d'OCaml)

qu'est-ce qui distingue

```
type graphical = Circle of ... | Rectangle of ...
```

```
class Graphical {...} class Circle extends Graphical {...}
```

en OCaml, le code de `move` est à un seul endroit et traite tous les cas

```
  let move = function Circle _ -> ... | Rectangle _ -> ...
```

en Java, il est éclaté dans l'ensemble des classes

brève comparaison fonctionnel / objet

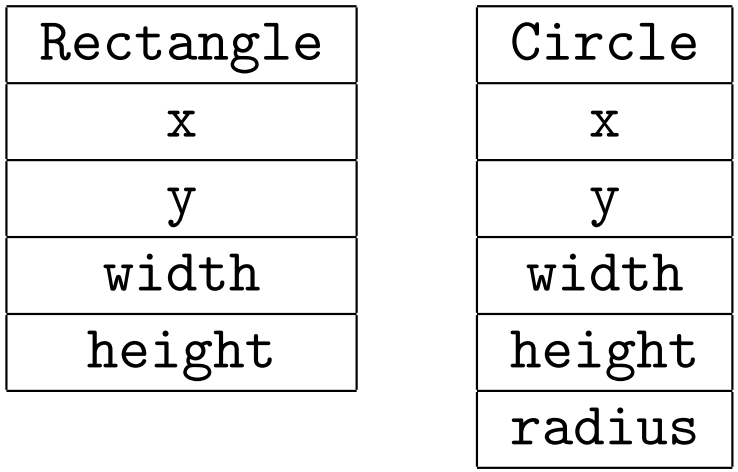
	extension horizontale = ajout d'un cas	extension verticale = ajout d'une fonction
Java	**facile** (un seul fichier)	pénible (plusieurs fichiers)
OCaml	pénible (plusieurs fichiers)	**facile** (un seul fichier)

compilation des langages à objets

un objet est un bloc alloué sur le tas, contenant

- sa classe
- les valeurs de ses champs (comme pour un enregistrement)

```
class Graphical {
  int x, y, width, height; ... }
class Rectangle extends Graphical {
  ... }
class Circle extends Graphical {
  int radius; ... }

new Rectangle(0, 0, 100, 50)
new Circle(20, 20, 10)
```



la valeur d'un objet est le pointeur vers le bloc

on note que l'héritage simple permet de stocker la valeur d'un champ x à un emplacement constant dans le bloc ; les champs propres viennent après les champs hérités

le calcul de la valeur droite ou gauche de $e.x$ est donc aisé

exemple : on compile `e.width` par

```
    # on compile la valeur de e dans %rcx, puis
    movq 24(%rcx), %rax
```

on compile `e.width = e'` par

```
    # on compile la valeur de e dans %rcx
    # on compile la valeur de e' dans %rax
    movq %rax, 24(%rcx)
```

en Java, le mode de passage est **par valeur** (mais la valeur d'un objet n'est qu'un pointeur sur le tas)

une méthode statique est compilée de manière traditionnelle

que ce soit pour les constructeurs, les méthodes statiques ou dynamiques, la surcharge est résolue à la compilation, et des noms distincts sont donnés aux différents constructeurs et méthodes

```
class A {
  A() {...}
  A(int x) {...}

  void m() {...}
  void m(A a) {...}
  void m(A a, A b) {...}
```

```
class A {
  A() {...}
  A_int(int x) {...}

  void m() {...}
  void m_A(A a) {...}
  void m_A_A(A a, A b) {...}
```

la surcharge est cependant délicate

```
class A {...}
class B extends A {
  void m(A a) {...}
  void m(B b) {...}
}
```

dans le code

```
{ ... B b = new B(); b.m(b); ... }
```

les deux méthodes s'appliquent potentiellement

c'est la méthode `m(B b)` qui est appelée,
car **plus précise** du point du vue de l'argument

il peut y avoir ambiguïté

```
class A {...}
class B extends A {
  void m(A a, B b) {...}
  void m(B b, A a) {...}
}
{ ... B b = new B(); b.m(b, b); ... }
```

```
surcharge1.java:13: reference to m is ambiguous,
  both method m(A,B) in B and method m(B,A) in B match
```

algorithme de résolution de la surcharge

à chaque méthode définie dans la classe `C`

$$\tau\ \mathtt{m}(\tau_1\ x_1, ..., \tau_n\ x_n)$$

on associe le profil $(\mathtt{C}, \tau_1, \ldots, \tau_n)$

on **ordonne** les profils : $(\tau_0, \tau_1, \ldots, \tau_n) \sqsubseteq (\tau'_0, \tau'_1, \ldots, \tau'_n)$ si et seulement si τ_i est un sous-type de τ'_i pour tout i

pour un appel

$$e.m(e_1, \ldots, e_n)$$

où e a le type statique τ_0 et e_i le type statique τ_i, on considère l'ensemble des éléments **minimaux** dans l'ensemble des profils compatibles

- aucun élément $\Rightarrow$ aucune méthode ne s'applique
- plusieurs éléments $\Rightarrow$ ambiguïté
- un unique élément $\Rightarrow$ c'est la méthode à appeler

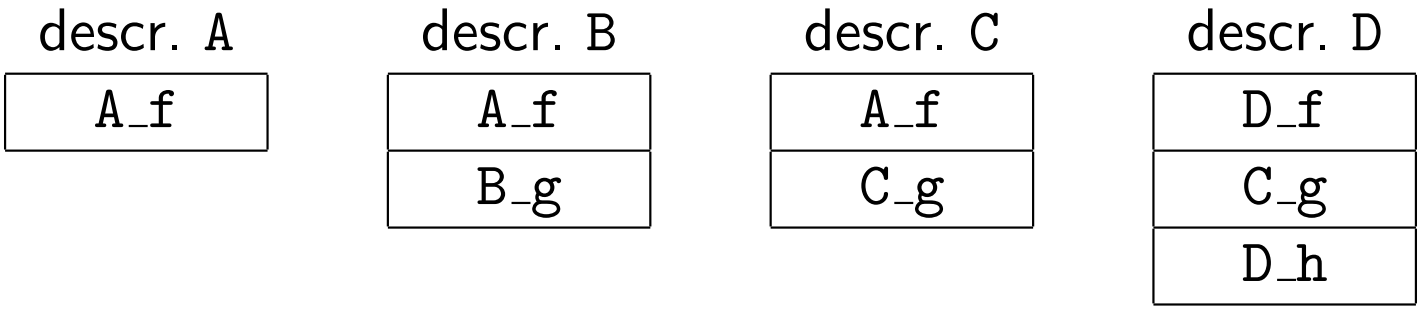
toute la subtilité de la compilation des langages à objets est dans l'**appel d'une méthode dynamique** $e.m(e_1, \ldots, e_n)$

pour cela, on construit pour chaque classe un **descripteur de classe** qui contient les adresses des codes de méthodes dynamiques de cette classe

comme pour les champs, l'héritage simple permet de ranger l'adresse du code de la méthode m à un emplacement constant dans le descripteur

les descripteurs de classes peuvent être construits dans le segment de données ; chaque objet contient dans son premier champ un pointeur vers le descripteur de sa classe

```
class A             { void f() {...} }
class B extends A { void g() {...} }
class C extends B { void g() {...} }
class D extends C { void f() {...}
                    void h() {...} }
```



en pratique, le descripteur de la classe C contient également l'indication de la classe dont C hérite, appelée **super classe** de C

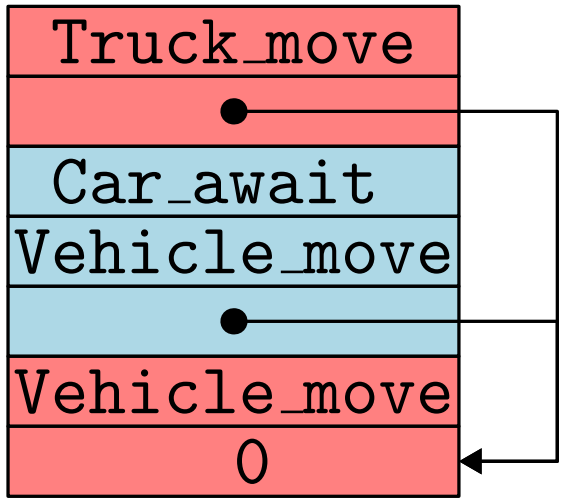
la super classe est représentée par un pointeur vers son descripteur

on peut le ranger dans le premier champ du descripteur

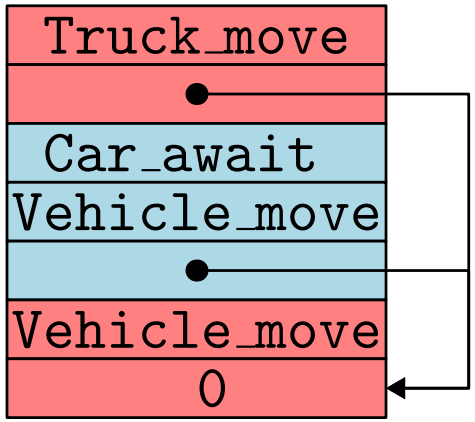
exemple complet

```
class Vehicle {
  static int start = 10;
  int position;
  Vehicle() { position = start; }
  void move(int d) { position += d; } }
class Car extends Vehicle {
  int passengers;
  Car() { super(); }
  void await(Vehicle v) {
    if (v.position < position)
      v.move(position - v.position);
    else
      move(10); } }
class Truck extends Vehicle {
  int load;
  Truck() { super(); }
  void move(int d) {
    if (d <= 55) position += d; else position += 55; } }
```

on construit les descripteurs suivants dans le segment de données



```
        .data
descr_Vehicle:
        .quad 0
        .quad Vehicle_move
descr_Car:
        .quad descr_Vehicle
        .quad Vehicle_move
        .quad Car_await
descr_Truck:
        .quad descr_Vehicle
        .quad Truck_move
```



et le champ statique de `Vehicle` est également dans le segment de données

```
static_start:
        .quad 10
```

le code d'un constructeur est une fonction qui suppose l'objet déjà alloué et son adresse dans %rdi, le premier champ déjà rempli (descripteur de classe) et les arguments du constructeur dans %rsi, %rdx, etc., et la pile

```
class Vehicle {
  Vehicle() { position = start; }
}
```

```
new_Vehicle:
        movq    static_start, %rcx
        movq    %rcx, 8(%rdi)
        ret
```

pour `Car`, le constructeur se contente d'appeler celui de la super classe, à savoir `Vehicle`

```
class Car extends Vehicle {
  Car() { super(); }
}
```

on reconnaît là un appel terminal, ce qui donne tout simplement

```
new_Car:
        jmp new_Vehicle
```

de même pour le constructeur de `Truck`

pour les méthodes, on adopte la même convention : l'objet est dans `%rdi` et les arguments de la méthode dans `%rsi`, `%rdx`, etc., et la pile si besoin

```
class Vehicle {
  void move(int d) { position += d; }
}
```

```
Vehicle_move:
        addq    %rsi, 8(%rdi)
        ret
```

(de même pour la méthode `move` de `Truck`)

code contenant un appel dynamique

```
class Car extends Vehicle {
  void await(Vehicle v) {
    if (v.position < position)
      v.move(position - v.position);
    else
      move(10);
  }
}
```

```
Car_await:
    movq  8(%rdi), %rcx
    subq  8(%rsi), %rcx
    jle   L1
    movq  %rsi, %rdi
    movq  %rcx, %rsi
    movq  (%rdi), %rcx
    jmp   *8(%rcx)
L1: movq  $10, %rsi
    movq  (%rdi), %rcx
    jmp   *8(%rcx)
```

c'est un saut à une adresse calculée
(optimisé avec `jmp` au lieu de `call` car l'appel est terminal)

programme principal

```
class Main {
  public static void main(String arg[]) {
    Truck t = new Truck();
    Car c = new Car();
    c.passengers = 2;
    System.out.println(c.position); // 10
    c.move(60);
    System.out.println(c.position); // 70
    Vehicle v = c;
    v.move(70);
    System.out.println(c.position); // 140
    c.await(t);
    System.out.println(t.position); // 65
    System.out.println(c.position); // 140
  }
}
```

création d'un objet

```
Truck t = new Truck();
```

on commence par allouer un bloc de 24 octets sur le tas

```
movq  $24, %rdi
call  malloc
movq  %rax, %r12
```

on stocke le descripteur de `Truck` dans le premier champ

```
movq  $descr_Truck, (%r12)
```

on appelle le code du constructeur

```
movq  %r12, %rdi
call  new_Truck
```

(de même pour `c = new Car()`, stockée dans %r13)

l'appel

```
c.move(60);
```

est compilé en

```
movq    %r13, %rdi
movq    $60, %rsi
movq    (%rdi), %rcx
call    *8(%rcx)
```

la déclaration de variable

```
    Vehicle v = c;
```

ne fait que créer un alias (un autre nom pour le même objet)

si `v` est stockée dans `%r14`, le code produit est simplement

```
        movq %r13, %r14
```

(on pourrait même faire l'économie de cette instruction)

etc.

pour plus d'efficacité, on peut chercher à remplacer un appel dynamique (*i.e.* calculé pendant l'exécution) par un appel statique (*i.e.* connu à la compilation)

pour un appel $e.m(\dots)$, et e de type statique C, c'est notamment possible lorsque la méthode m n'est redéfinie dans aucune sous-classe de C

une autre possibilité, plus complexe, consiste à propager les types connus à la compilation (*type propagation*)

```
B b = new B();     // la classe de b est B
A a = b;           // la classe de a est B
a.m();             // on sait exactement de quelle
                   // méthode il s'agit
```

comme on l'a vu, le type statique et le type dynamique d'une expression désignant un objet peuvent différer (à cause du sous-typage)

il est parfois nécessaire de « forcer la main » au compilateur, en prétendant qu'un objet e appartient à une certaine classe C, ou plus exactement à l'une des super classes de C ; on appelle cela le **transtypage** (*cast*)

la notation de Java est

$$(C)e$$

le type statique d'une telle expression est C

considérons l'expression

$$(C)e$$

soit

- D le type statique de l'expression e
- E le type dynamique de (l'objet désigné par) e

il y a trois situations

- C est une super classe de D : on parle d'**upcast** et le code produit pour $(C)e$ est le même que pour e (mais le *cast* a une influence sur le typage puisque le type de $(C)e$ est C)
- C est une sous-classe de D : on parle de **downcast** et le code contient un **test dynamique** pour vérifier que E est bien une sous-classe de C
- C n'est ni une sous-classe ni une super classe de D : le compilateur refuse l'expression

exemple (upcast)

```
class A {
  int x = 1;
}

class B extends A {
  int x = 2;
}
```

```
  B b = new B();
  System.out.println(b.x);       // 2
  System.out.println(((A)b).x); // 1
```

exemple (downcast)

```
void m(Vehicle v, Vehicle w) {
  ((Car)v).await(w);
}
```

rien ne garantit que l'objet passé à `m` sera bien une voiture ; en particulier il pourrait ne même pas posséder de méthode `await` !

le test dynamique est donc nécessaire

l'exception `ClassCastException` est levée si le test échoue

tester l'appartenance à une classe

pour permettre une programmation un peu plus défensive, il existe une construction booléenne

$$e \texttt{ instanceof } C$$

qui détermine si la classe de e est bien une sous-classe de C

on trouve souvent le schéma

```
if (e instanceof C) {
  C c = (C)e;
  ...
}
```

dans ce cas, le compilateur effectue typiquement une optimisation consistant à ne pas générer de second test pour le *cast*

compilons la construction

$$e \texttt{ instanceof } C$$

en supposant la valeur de e dans %rdi et le descripteur de C dans %rsi

```
instanceof:
        movq    (%rdi), %rdi
L:      cmpq    %rdi, %rsi      # même descripteur ?
        je      Ltrue
        movq    (%rdi), %rdi    # on passe à la super classe
        testq   %rdi, %rdi
        jnz     L               # on a atteint Object ?
Lfalse: movq    $0, %rax
        ret
Ltrue:  movq    $1, %rax
        ret
```

le compilateur peut optimiser les constructions $(C)e$ et e `instanceof` C dans certains cas

- si C est l'unique sous-classe de D alors un unique test d'égalité plutôt qu'une boucle
- si D est une sous-classe de C alors e `instanceof` C vaut `true`

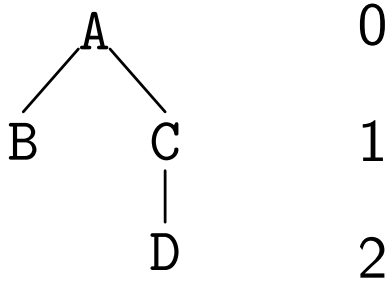
une autre optimisation est possible si l'ensemble des classes est connu à la compilation ; soit n la profondeur maximale dans la hiérarchie des classes

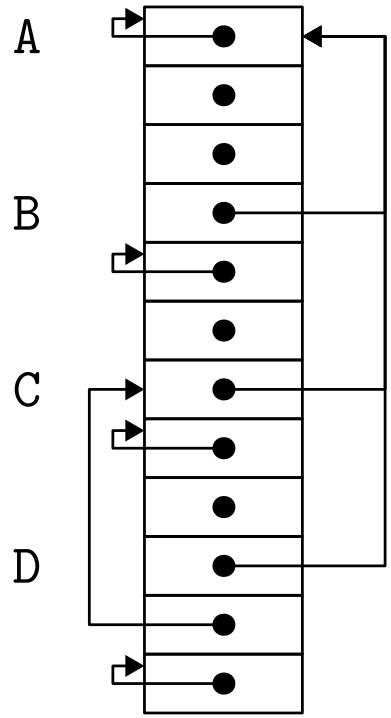
le descripteur d'une classe C de profondeur k contient un tableau de taille n où les cases $0..k$ contiennent les pointeurs vers les descripteurs des super classes de C ; les autres cases contiennent le pointeur nul

pour tester si x est une instance de D on considère la profondeur j de D (connue statiquement) et on regarde dans la case j du descripteur de x s'il y a un pointeur vers le descripteur de D

exemple

```
class A {...}                    class C extends A {...}
class B extends A {...}          class D extends C {...}
```





quelques mots sur C++

on reprend l'exemple des véhicules

```
class Vehicle {
  static const int start = 10;
public:
  int position;
  Vehicle() { position = start; }
  virtual void move(int d) { position += d; }
};
```

`virtual` signifie que la méthode `move` pourra être redéfinie

```
class Car : public Vehicle {
public:
  int passengers;
  Car() {}
  void await(Vehicle &v) { // passage par référence
    if (v.position < position)
      v.move(position - v.position);
    else
      move(10);
  }
};
```

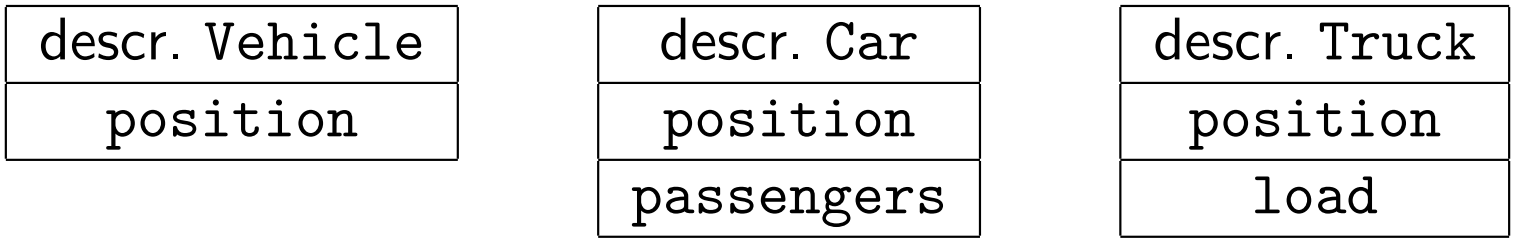
exemple (suite)

```
class Truck : public Vehicle {
public:
  int load;
  Truck() {}
  void move(int d) {
    if (d <= 55) position += d; else position += 55;
  }
};
```

exemple (suite)

```
#include <iostream>
using namespace std;

int main() {
  Truck t; // objets alloués ici sur la pile
  Car c;
  c.passengers = 2;
  cout << c.position << endl; // 10
  c.move(60);
  cout << c.position << endl; // 70
  Vehicle *v = &c; // alias
  v->move(70);
  cout << c.position << endl; // 140
  c.await(t);
  cout << t.position << endl; // 65
  cout << c.position << endl; // 140
}
```

sur cet exemple, la représentation d'un objet n'est pas différente de Java

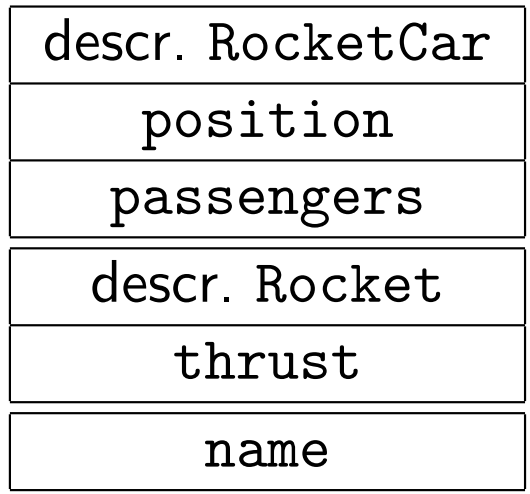


mais en C++, on trouve aussi de l'**héritage multiple**

conséquence : on ne peut plus (toujours) utiliser le principe selon lequel

- la représentation d'un objet d'une super classe de C est un préfixe de la représentation d'un objet de la classe C
- de même pour les descripteurs de classes

```
class Rocket {
public:
  float thrust;
  Rocket() { }
  virtual void display() {}
};

class RocketCar : public Car, public Rocket {
public:
  char *name;
  void move(int d) { position += 2*d; }
};
```



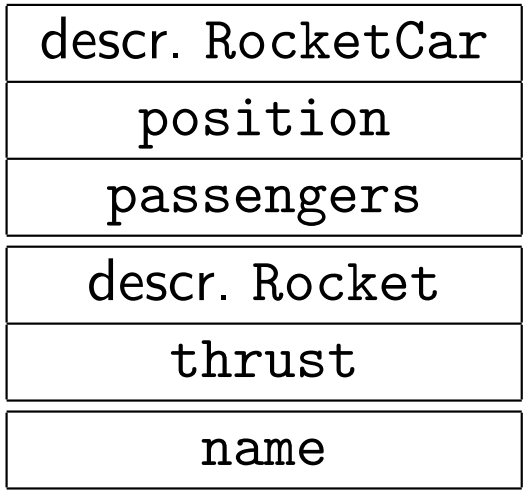
les représentations de Car et Rocket sont juxtaposées

en particulier, un transtypage comme

```
RocketCar rc;
Rocket r = (Rocket)rc;
```

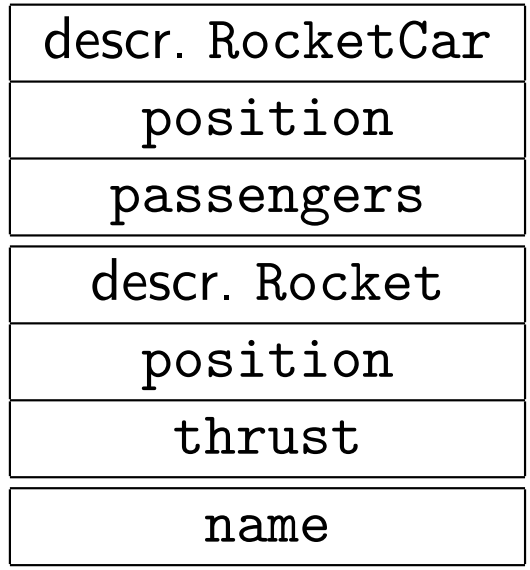
est traduit par une arithmétique de pointeur

```
r <- rc + 12
```



supposons maintenant que `Rocket` hérite également de `Vehicle`

```
class Rocket : public Vehicle {
public:
  float thrust;
  Rocket() { }
  virtual void display() {}
};

class RocketCar : public Car, public Rocket {
public:
  char *name;
  ...
};
```



on a maintenant **deux** champs `position`

et donc une ambiguïté potentielle

```
class RocketCar : public Car, public Rocket {
public:
  char *name;
  void move(int d) { position += 2*d; }
};
```

```
vehicles.cc: In member function ‘virtual void RocketCar::move(int)’
vehicles.cc:51:22: error: reference to ‘position’ is ambiguous
```

il faut préciser de quel champ `position` il s'agit

```
class RocketCar : public Car, public Rocket {
public:
  char *name;
  void move(int d) { Rocket::position += 2*d; }
};
```

pour n'avoir qu'une seule instance de `Vehicle`, il faut modifier la façon dont `Car` et `Rocket` héritent de `Vehicle` (héritage virtuel)

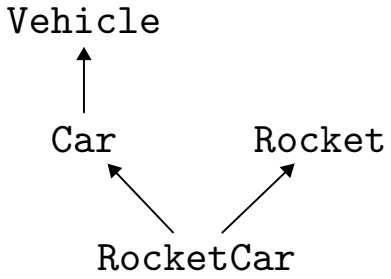
```
class Vehicle { ... };

class Car : public virtual Vehicle { ... };

class Rocket : public virtual Vehicle { ... };

class RocketCar : public Car, public Rocket {
```

il n'y a plus d'ambiguïté quant à `position` :

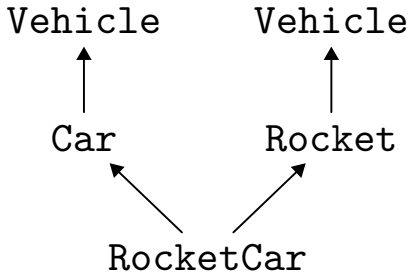
```
public:
  char *name;
  void move(int d) { position += 2*d; }
};
```

trois situations différentes

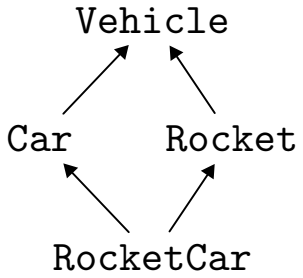
```
class Vehicle { ... };
class Car : Vehicle { ... };
class Rocket { ... };
class RocketCar : Car, Rocket { ... };
```




```
class Vehicle { ... };
class Car : Vehicle { ... };
class Rocket : Vehicle { ... };
class RocketCar : Car, Rocket { ... };
```




```
class Vehicle { ... };
class Car : virtual Vehicle { ... };
class Rocket : virtual Vehicle { ... };
class RocketCar : Car, Rocket { ... };
```



(le diamant)

la suite

- TD 10
  - production de code
    (on ajoute des fonctions au mini langage **Arith**)

- prochain cours
  - allocation mémoire