

Cours de C++

Segment 2

2025-2026

1. Copie
2. Déplacement
3. L-Value et R-Value
4. Conteneurs
5. Pointeurs intelligents
6. Héritage
7. Classes polymorphes

1. Copie.

- a. Construction vs affectation
- b. Constructeur de copie
- c. Opérateur d'affectation par copie
- d. Implémentations par défaut

2. Déplacement.

3. L-Value et R-Value.

4. Conteneurs

5. Pointeurs intelligents

6. Héritage.

7. Classes polymorphes.

Il faut distinguer l'**instanciation** d'un objet de sa **réaffectation**, car ce ne sont pas les mêmes fonctions qui sont appelées.

Si on instancie un tout nouvel objet :

```
Value v1 { 4 };
```



Appel du
constructeur

Si on modifie la valeur d'un objet qui existe déjà :

```
v1 = 3;
```



Appel de
l'opérateur d'affectation

Construction vs affectation

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Opérateur
d'affectation

⚠️ Un seul =

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?

```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?

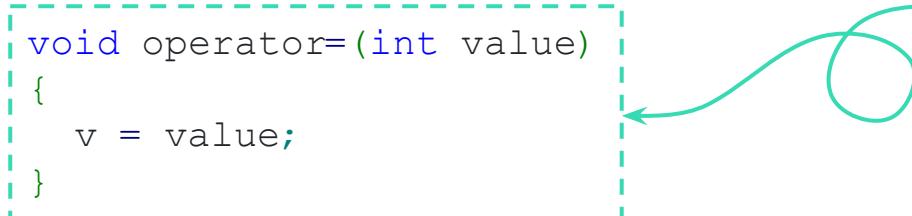
```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?



```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?

```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?

```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```

```
struct Value
{
    Value(int value)
        : v { value }
    {}

    void operator=(int value)
    {
        v = value;
    }

    int v = 0;
};
```

Quelles fonctions sont appelées par les instructions suivantes ?

```
Value v1 { 4 };
v1 = 3;
Value v2 = 3;
```



Des questions?

Le **constructeur de copie** est le constructeur appelé lorsqu'un objet est **instancié** et initialisé à partir d'un objet du **même type**.

```
Animal medor
// ...
Animal medor copy1 { medor };
Animal medor_copy2 = medor ;
```

Constructeur de copie

```
class Animal
{
public:
    Animal (const std::string& species, const std::string& name)
        : _species { species }, _name { name }
    {}

    Animal (const Animal& other)
        : _species { other._species }
        , _name { other._name + " 2 " }
    {
        std::cout << _name << " was copied from " << other._name << std::endl;
    }

private:
    std::string _species;
    std::string _name;
};
```

Constructeur de copie

Constructeur de copie

```

class Animal
{
public:
    Animal (const std::string& species, const std::string& name)
        : _species { species }, _name { name }
    {}

    Animal (const Animal& other)
        : _species { other._species }
        , _name { other._name + " 2" }
    {
        std::cout << _name << " was copied from " << other._name <<
        std::endl;
    }

private:
    std::string _species;
    std::string _name;
};

```

Plus génériquement :

ClassName (const ClassName&)

Constructeur de copie

```

class Animal
{
public:
    Animal(const std::string& species, const std::string& name)
        : _species { species }, _name { name }
    {}

    Animal(const Animal& other)
        : _species { other._species }
        , _name { other._name + " 2" }
    {
        std::cout << _name << " was copied from " << other._name <<
        std::endl;
    }

private:
    std::string _species;
    std::string _name;
};

```

Les attributs sont initialisés
dans la **liste d'initialisation**

```
class Animal
{
public:
    Animal (const std::string& species, const std::string& name)
        : _species { species }, _name { name }
    {}

    Animal (const Animal& other)
        : _species { other._species }
        , _name { other._name + " 2 " }
    {
        std::cout << _name << " was copied from " << other._name <<
        std::endl;
    }

private:
    std::string _species;
    std::string _name;
};
```

Les instructions additionnelles
vont dans le **corps**

```
class Animal
{
public:
    Animal (const std::string& species, const std::string& name)
        : _species { species }, _name { name }
    {}

    Animal (const Animal& other)
        : _species { other._species }
        , _name { other._name + " 2" }
    {
        std::cout << _name << " was copied from " << other._name <<
        std::endl;
    }

private:
    std::string _species;
    std::string _name;
};
```



Des questions?

L'**opérateur d'affectation par copie** est appelé lorsque la valeur d'un objet est affectée à un objet **pré-existant du même type**.

```
Animal medor { ... };  
Animal felix { ... };  
medor = felix;
```

```
class Animal
{
public
    ...
    Opérateur d'affectation par copie
    -----
    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
    ...
};

}
```

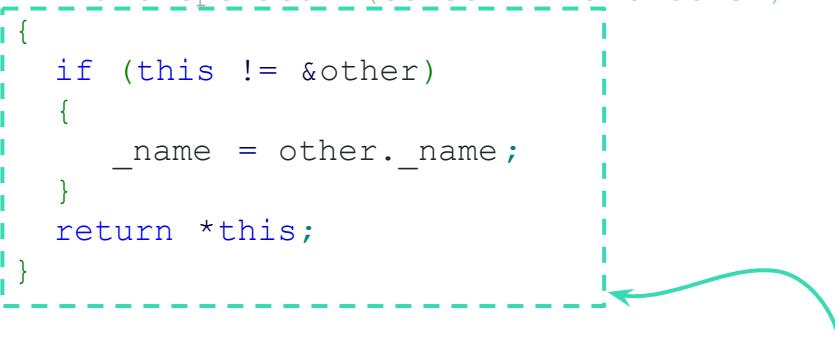
Opérateur d'affectation par copie

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
    ...
};
```

Signature

```
class Animal
{
public:
    ...

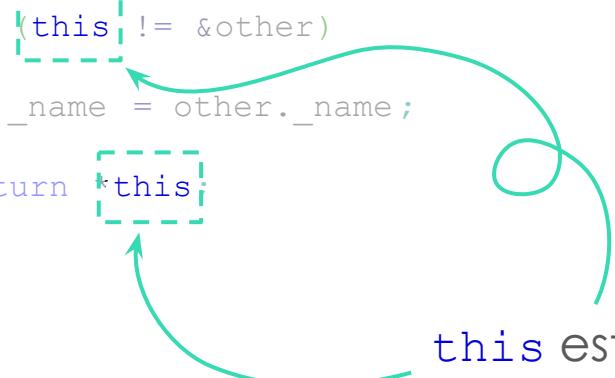
    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
    ...
};


```

Le **corps** de la fonction contient les instructions exécutées par l'affectation

```
class Animal
{
public:
    ...

    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
    ...
};
```



this est un **pointeur** permettant
d'accéder à l'**instance courante**

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
    ...
};
```

⚠ **Par convention:**
valeur de retour
=
référence sur
l'instance courante

Cela permet de chaîner les appels :
felix = medor = ginger;

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }
};
```

⚠ Attention !

vérifiez toujours que
l'objet courant et
l'objet à copier sont
des instances
distinctes

...;

Cela peut éviter des problèmes
lorsqu'on réaffecte un objet à
lui-même

```
class Animal
{
public:
    ...

    Animal& operator=(const Animal& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = other._name;
        }
        return *this;
    }

    ...
};

};
```



Des questions?

Si vous copiez un objet sans définir la fonction appropriée (constructeur de copie ou opérateur d'affectation par copie), le **compilateur** essaie de générer une **implémentation par défaut**.

Implémentation par défaut du constructeur de copie

```
ClassName(const ClassName& other)
: _attr1 { other._attr1 }
, _attr2 { other._attr2 }
, ...
{
}
```

Implémentation par défaut de l'opérateur d'affectation par copie

```
ClassName& operator=(const ClassName& other)
{
    if (this != &other)
    {
        _attr1 = other._attr1;
        _attr2 = other._attr2;
        ...
    }
    return *this;
}
```

 Suivant les cas, il se peut que le compilateur ne génère pas d'implémentations par défaut (Voir site du cours)

1. Copie.
2. **Déplacement.**
 - a. Concept
 - b. Constructeur de déplacement
 - c. Opérateur d'affectation par déplacement
 - d. Implémentations par défaut
 - e. Variables de types fondamentaux
3. L-Value et R-Value.
4. Conteneurs
5. Pointeurs intelligents.
6. Héritage.
7. Classes polymorphes.

Copier certains objets est **coûteux**.

Même en les passant par référence, certaines copies ne
sont pas évitées...

Où se trouve la copie dans le code suivant ?

```
std::string name = "Celine";
Person      celine { name };
```

```
class Person
{
public:
    Person(const std::string& name)
        : _name { name }
    {}

private:
    std::string _name;
};
```

Où se trouve la copie dans le code suivant ?

```
std::string name = "Celine";
Person      celine { name };
```

```
class Person
{
public:
    Person(const std::string& name)
        : _name { name }
    {}

private:
    std::string _name;
};
```



On aimerait bien pouvoir **déplacer** le contenu de `name`
à l'intérieur de `celine._name`

```
std::string name = "Celine";  
Person celine { name };
```

```
class Person  
{  
public:  
    Person(const std::string& name)  
        : _name { name }  
    {}  
  
private:  
    std::string _name;  
};
```

Le déplacement consiste donc à **transférer le contenu** d'une instance A à l'intérieur d'une instance B.

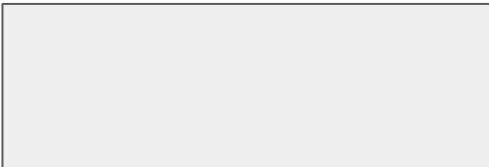
Déplacer A dans B est plus intéressant que copier A dans B si :

1. vous savez que la copie est **coûteuse**
2. **vous n'utilisez plus A** dans la suite du code

Qu'est-ce que le déplacement ?

Objet dont on a plus besoin

Données internes à
l'objet
(Usuellement sur la pile)

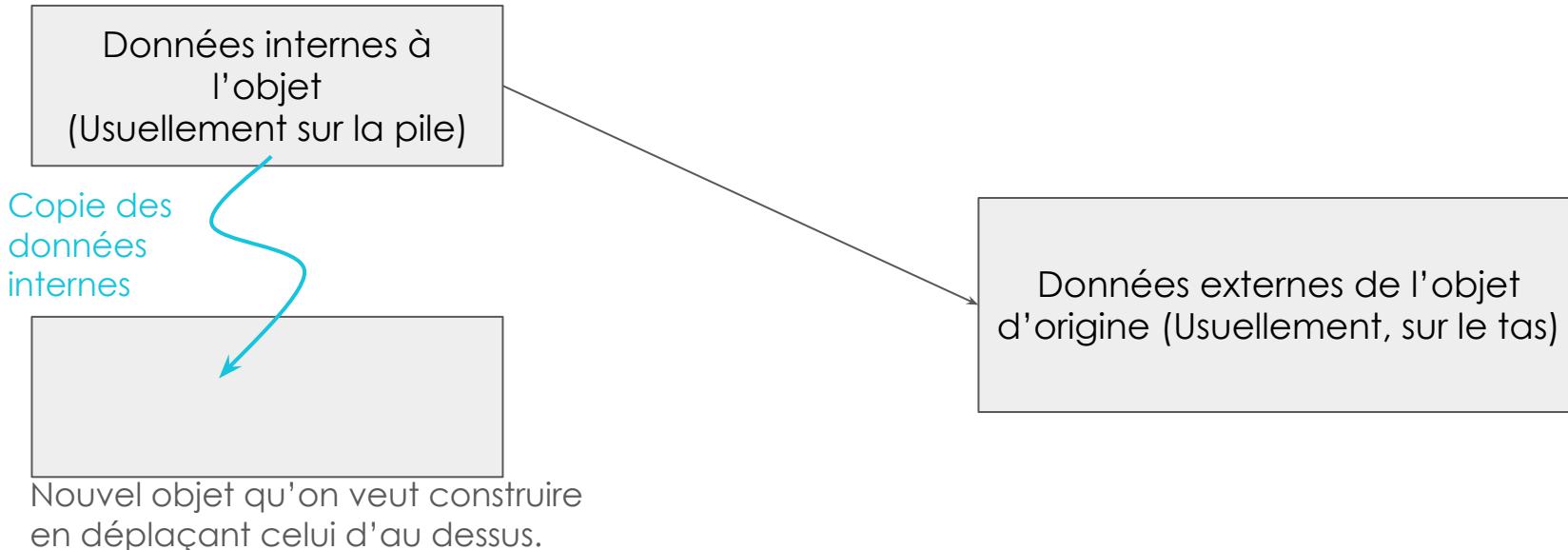


Nouvel objet qu'on veut construire
en déplaçant celui d'au dessus.

Données externes de l'objet
d'origine (Usuellement, sur le tas)

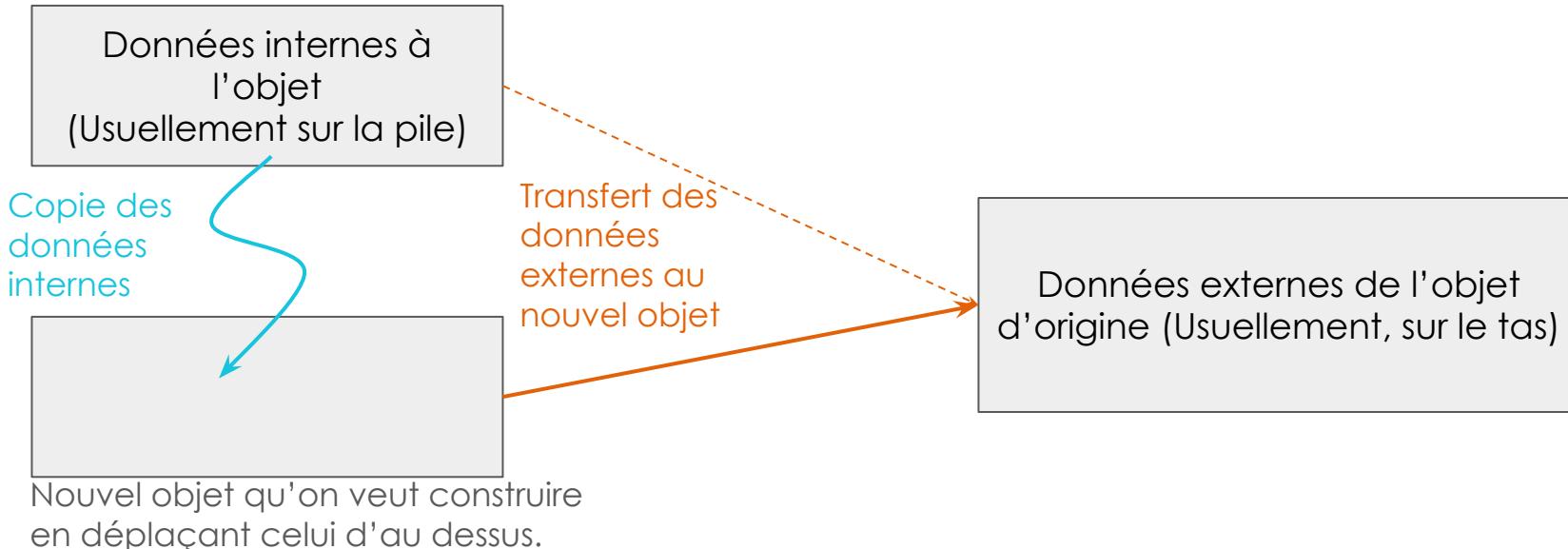
Qu'est-ce que le déplacement ?

Objet dont on a plus besoin

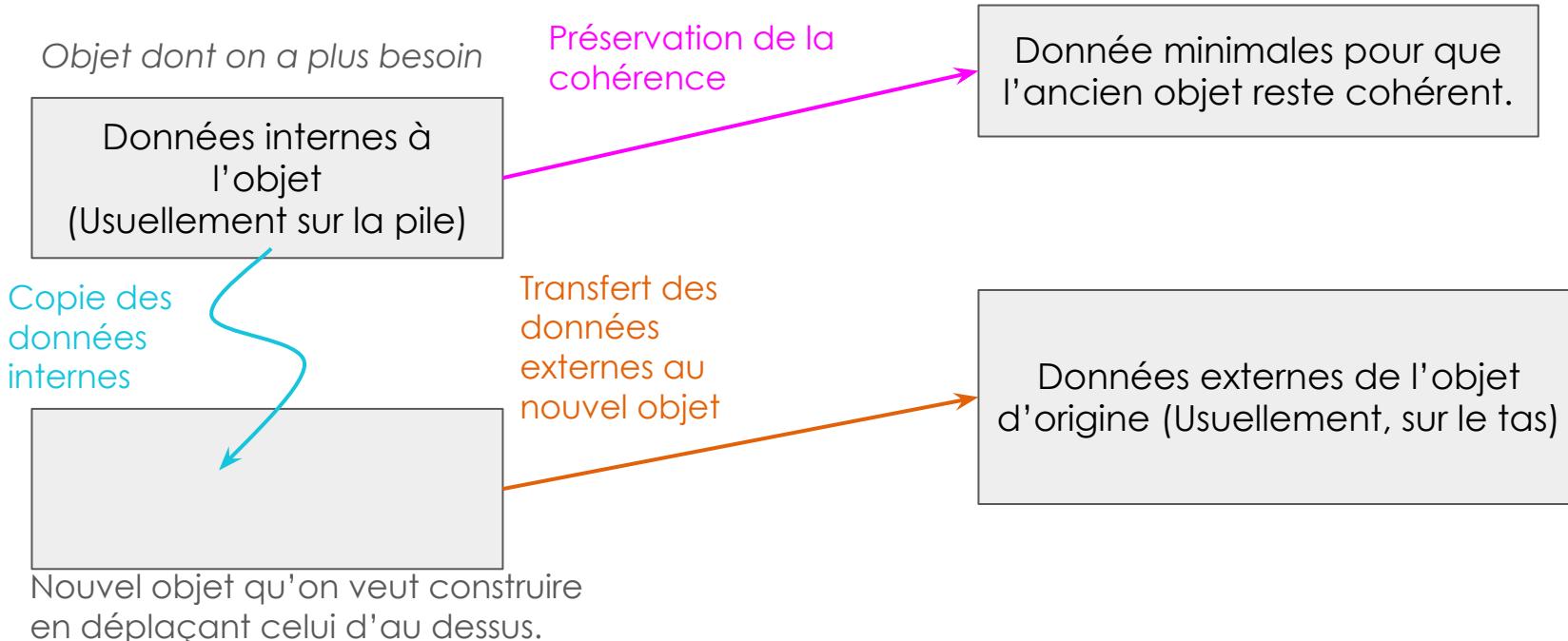


Qu'est-ce que le déplacement ?

Objet dont on a plus besoin



Qu'est-ce que le déplacement ?



Des questions?

La librairie standard fournit la fonction `std::move`,
qui permet de **transférer** le **contenu** d'un objet

```
std::string name = "Celine";  
Person celine { std::move(name) };
```

```
class Person  
{  
public:  
    Person(std::string name)  
        : _name { std::move(name) }  
    {}  
  
private:  
    std::string _name;  
};
```

On transfère le contenu de
name à l'intérieur du 1er paramètre
du constructeur

La librairie standard fournit la fonction `std::move`,
qui permet de **transférer** le **contenu** d'un objet



```
std::string name = "Celine";
Person celine { std::move(name) };

class Person
{
public:
    Person(std::string name)
        : _name { std::move(name) }
    {}

private:
    std::string _name;
};
```

On utilise `std::move`

La librairie standard fournit la fonction `std::move`,
qui permet de **transférer** le **contenu** d'un objet

```
std::string name = "Celine";  
Person celine { std::move(name) };
```

On ne passe **pas**
le paramètre par référence,
puisque'on construit un nouvel objet
à partir du contenu de l'autre

```
class Person  
{  
public:  
    Person(std::string name)  
        : _name { std::move(name) }  
    {}  
  
private:  
    std::string _name;  
};
```

La librairie standard fournit la fonction `std::move`,
qui permet de **transférer** le **contenu** d'un objet

```
std::string name = "Celine";  
Person celine { std::move(name) };
```

On transfère à nouveau le
contenu de `name` au constructeur
de l'attribut `_name`

```
class Person  
{  
public:  
    Person(std::string name)  
        : _name { std::move(name) }  
    {}  
private:  
    std::string _name;  
};
```



La variable d'origine est maintenant **vide**, puisque son contenu a été déplacé ailleurs !

```
std::string name = "Celine";
Person      celine { std::move(name) };

std::cout << "< " << name << " >";
```



```
class Person
{
public:
    Person(std::string name)
        : _name { std::move(name) }
    {}

private:
    std::string _name;
};
```

La variable d'origine est maintenant **vide**, puisque son contenu a été déplacé ailleurs !

```
std::string name = "Celine";
Person      celine { std::move(name) };

std::cout << "< " << name << " >";
```

```
class Person
{
public:
    Person(std::string name)
        : _name { std::move(name) }
    {}

private:
    std::string _name;
};
```



Des questions?

Lorsqu'on déplace un objet pour en **instancier** un autre du **même type**, c'est le **constructeur de déplacement** qui est appelé.

```
Animal new_medor = std::move(medor);
```

```
class Animal
{
public:
    ...
    Constructeur de déplacement
    Animal(Animal&& other)
        : _species { std::move(other._species) }
        , _name { std::move(other._name) }
    { }
    ...
};
```

```
class Animal
{
public:
    ...
    Signature
    Animal(Animal&& other)
        : _species { std::move(other._species) }
        , _name { std::move(other._name) }
    { }

    ...
};


```

Plus génériquement :
ClassName (ClassName&&)

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal(Animal&& other)
        : _species { std::move(other._species) }
        , _name { std::move(other._name) }
    {}
    ...
};
```

```
Animal medor { "dog", "medor" };
Animal new_medor = std::move(medor);
```

Quelles sont les valeurs de :

- *medor._species* ?
- *medor._name* ?
- *new_medor._species* ?
- *new_medor._name* ?

L'**opérateur d'affectation par déplacement** est appelé lorsqu'un objet est déplacé dans une instance **pré-existante** du **même type**.

```
Animal medor { ... };  
Animal felix { ... };  
medor = std::move(felix);
```

Opérateur d'affectation par déplacement

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(Animal&& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = std::move(other._name);
        }
        return *this;
    }
    ...
};

Opérateur d'affectation
par déplacement
```

Opérateur d'affectation par déplacement

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(Animal&& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = std::move(other._name);
        }
        return *this;
    }

    ...
};


```

Signature

```
class Animal
{
public:
    ...
    Animal& operator=(Animal&& other)
    {
        if (this != &other)
        {
            _name = std::move(other._name);
        }
        return *this;
    }
    ...
};
```

Mêmes contraintes que pour l'affectation par copie :

- valeur de retour = `*this`
- s'assurer que les instances sont bien distinctes

Comme pour les fonctions de copie, le compilateur peut générer des **implémentations par défaut** pour les fonctions de déplacement.

Implémentation par défaut du constructeur de déplacement

```
ClassName (ClassName&& other)
: _attr1 { std::move (other._attr1) }
, _attr2 { std::move (other._attr2) }
, ...
{
}
```

Implémentation par défaut de l'opérateur d'affectation par déplacement

```
ClassName& operator=(ClassName&& other)
{
    if (this != &other)
    {
        _attr1 = std::move (other._attr1);
        _attr2 = std::move (other._attr2);
        ...
    }
    return *this;
}
```

Que se passe-t-il lorsque vous déplacez une variable de type fondamental dans une autre ?

```
int a = 4;  
int b = std::move(a);
```

```
auto* ptr_1 = &a;  
auto* ptr_2 = std::move(ptr_1);
```

Lorsque vous déplacez une variable de type fondamental dans une autre, cela équivaut à **faire une copie**.

Le contenu de la **variable source** reste donc **inchangé** !

```
int a = 4;  
int b = std::move(a); // a vaut toujours 4, pas 0  
  
auto* ptr_1 = &a;  
auto* ptr_2 = std::move(ptr_1);
```

ptr_1 vaut &a et
non pas nullptr

1. Copie
2. Déplacement
- 3. L-Value et R-Value**
 - a. Expression
 - b. Catégorisation
 - c. Overloading
4. Conteneurs
5. Pointeurs intelligents
6. Héritage
7. Classes polymorphes

Une **expression** est une combinaison d'**opérandes**, d'**opérateurs**, d'appel de fonctions, pouvant être **évaluée**.

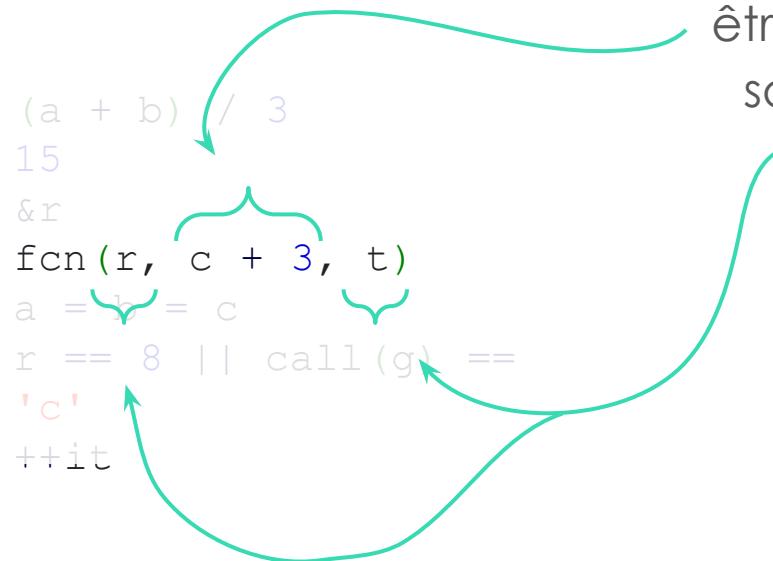
L'**évaluation** d'une expression peut **parfois** produire une **valeur**.

Exemples :

```
(a + b) / 3
15
&r
fcn(r, c + 3, t)
a = b = c
r == 8 || call(g) ==
'c'
++it
```

Expression

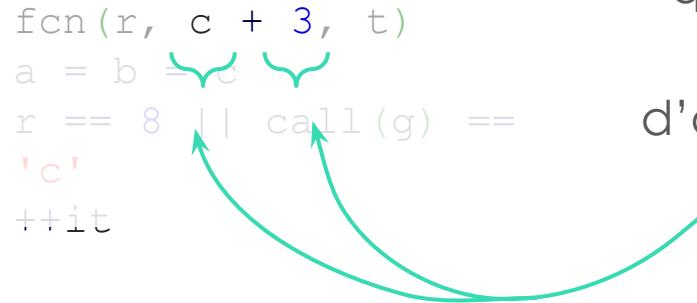
Exemples :



Une expression peut
être composée de
sous-expressions

Exemples :

```
(a + b) / 3
15
&r
fcn(r, c + 3, t)
a = b = c + 3
r == 8 || call(g) ==
'c'
++it
```



Une expression peut
être composée de
sous-expressions

...

qui peuvent-elles aussi
être constituées
d'autres sous-expressions

Exemples :



Les expressions produisant des valeurs sont catégorisées soit en tant que **L-value**, soit en tant que **R-value**.

Les expressions produisant des valeurs sont catégorisées soit en tant que **L-value**, soit en tant que **R-value**.

- Une **L-value** est une expression dont l'évaluation renvoie une donnée ayant déjà une **adresse mémoire** (ex: variable, référence).

Les expressions produisant des valeurs sont catégorisées soit en tant que **L-value**, soit en tant que **R-value**.

- Une **L-value** est une expression dont l'évaluation renvoie une donnée ayant déjà une **adresse mémoire** (ex: variable, référence).
- Une **R-value** est une expression dont l'évaluation produit un **résultat temporaire**, qui n'a pas forcément d'emplacement mémoire associé (ex: littéral entier, retour d'une fonction par valeur).

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

5 est un littéral entier

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

5 est un littéral entier



R-value

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

v1 est une variable

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

v1 est une variable



L-value

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

le résultat du calcul
n'est pas encore
stocké en mémoire

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

le résultat du calcul
n'est pas encore
stocké en mémoire



R-value

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

on construit un tout
nouvel objet

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

on construit un tout
nouvel objet



R-value

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;
auto v2 = v1;
auto v3 = v2 + 5 - v1;
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

on retourne une
référence sur l'
élément ajouté au
tableau

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5;  
auto v2 = v1;  
auto v3 = v2 + 5 - v1;  
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 };  
auto v5 = v4.emplace_back(4);
```

on retourne une
référence sur l'
élément ajouté au
tableau



L-value

L-value ou R-value ?

```
auto v1 = 5; // R
auto v2 = v1; // L
auto v3 = v2 + 5 - v1; // R
auto v4 = std::vector { 1, 2, 3 }; // R
auto v5 = v4.emplace_back(4); // L
```



Des questions?

Une bonne manière d'identifier si une expression est une L-value ou une R-value est de se demander si on peut la placer à **gauche** d'un =

Si oui, c'est une L-value (L comme **Left**), si non, c'est une R-value.

Exemple :

v1 = ... // OK



L-value

v2 + 5 - v1 = ... // Ça n'a pas de sens



R-value

Rappel

L'**overloading** (ou **surcharge**) est le mécanisme permettant de définir deux fonctions du même nom si elles ont un **nombre différent** de paramètres ou que les paramètres n'ont **pas le même type**.

Il est possible de créer des surcharges à partir de la **catégorie de valeur** (L-value ou R-value) des arguments.

Il est possible de créer des surcharges à partir de la **catégorie de valeur** (L-value ou R-value) des arguments.

C'est d'ailleurs ce que nous avons fait plus tôt avec

- les **constructeurs de copie** (qui attendent des **L-values**) et
- les **constructeurs de déplacement** (qui attendent des **R-values**).

Il est possible de créer des surcharges à partir de la **catégorie de valeur** (L-value ou R-value) des arguments.

C'est d'ailleurs ce que nous avons fait plus tôt avec

- les **constructeurs de copie** (qui attendent des **L-values**) et
- les **constructeurs de déplacement** (qui attendent des **R-values**).

L'instruction `std::move` ne fait que transformer une L-value en R-value

1. Copie
2. Déplacement
3. L-Value et R-Value
- 4. Conteneurs**
 - a. Conteneurs séquentiels
 - b. Conteneurs associatifs
 - c. Tuples
5. Pointeurs intelligents
6. Héritage
7. Classes polymorphes

Un **conteneur séquentiel** est un conteneur

- dans lequel les éléments sont stockés dans un **ordre bien défini**,
- de telle sorte que le **1er élément, 2e élément, etc.** aient un sens

Par exemple :

- `std::array`
- `std::vector`
- `std::list`

Un **conteneur associatif** est un conteneur dans lequel **chaque élément est indexé par une clé**.

Cette indexation peut-être réalisée

- soit au moyen du **tri** des clés,
- soit au moyen de leur **hashage**.

Par exemple :

- `std::set` et `std::unordered_set`
- `std::map` et `std::unordered_map`

Indexation par tri

Accès: $O(\log n)$

Insertion: $O(\log n)$

Suppression: $O(\log n)$

Contraintes sur les clés:

- comparables

Indexation par hashage

Accès: $O(1)$ amorti

Insertion: $O(1)$ amorti

Suppression: $O(1)$ amorti

Contraintes sur les clés:

- équivalences
- hashables

`std::map` et `std::unordered_map` sont des **dictionnaires** : à chaque clé est associé un seul et unique élément.

```
auto persons_by_name = std::map<std::string, Person> {  
    { "Celine", celine },  
    { "Julien", julien },  
};
```

```
persons_by_name.emplace("Donatien", donatien);  
persons_by_name.erase("Julien");
```

Indexation par tri

Indexation par hashage

`std::map` et `std::unordered_map` sont des **dictionnaires** : à chaque clé est associé un seul et unique élément.

```
auto persons_by_name = std::map<std::string, Person> {  
    { "Celine", celine },  
    { "Julien", julien },  
};
```

```
persons_by_name.emplace("Donatien", donatien);  
persons_by_name.erase("Julien");
```

`std::set` et `std::unordered_set` sont des **ensembles** : un élément ne peut être inséré que s'il n'est pas déjà présent dans le conteneur

```
auto persons = std::unordered_set<std::string> {
    { "Celine" },
    { "Julien" },
};

auto gerald_it = persons.find("Gerald");
auto has_gerald = (gerald_it != persons.end());
```

Indexation par tri

Indexation par hashage

`std::set` et `std::unordered_set` sont des **ensembles** : un élément ne peut être inséré que s'il n'est pas déjà présent dans le conteneur

```
auto persons = std::unordered_set<std::string> {
    { "Celine" },
    { "Julien" },
};
```

```
auto gerald_it = persons.find("Gerald");
auto has_gerald = (gerald_it != persons.end());
```

Les **tuples** permettent de stocker:

- plusieurs éléments
- de **types potentiellement différents**

(le nombre et type des éléments soit être connu statiquement)

La librairie standard propose les types `std::pair` et `std::tuple`.

Ils permettent notamment d'**éviter la définition de types-structurés** qui ne serviraient qu'à un seul endroit du programme.

Les **tuples** permettent de stocker un nombre **prédéfini** d'éléments de **types potentiellement différents**.

```
std::pair<std::string, unsigned int>
get_name_and_age(const Person& person)
{
    return std::make_pair(person.get_name(), person.get_age());
}
```

1. Copie.
2. Déplacement.
3. L-Value et R-Value
4. Conteneurs
- 5. Pointeurs intelligents**
6. Héritage.
7. Classes polymorphes.

Un **pointeur-intelligent** (ou **smart-pointer**) est un objet qui :

- contient un pointeur vers une donnée **allouée dynamiquement**
- **désalloue automatiquement** la donnée lorsqu'il est détruit
- gère de manière cohérente sa **copie** et son **déplacement**

Dans du code moderne :

- **tous** les **pointeurs-owners** doivent être encapsulés dans des instances de **smart-pointers** ;
- les **pointeurs-nus** sont nécessairement des **pointeurs-observants**.

Un **pointeur-intelligent** (ou **smart-pointer**) est un objet qui :

- contient un pointeur vers une donnée **allouée dynamiquement**
- **désalloue automatiquement** la donnée lorsqu'il est détruit
- gère de manière cohérente sa **copie** et son **déplacement**

Les pointeurs intelligents fournis par la librairie standard sont :

- `std::unique_ptr`
- `std::shared_ptr`

Dans ce cours, nous nous intéresserons uniquement au premier.

Qu'est-ce qu'un std::unique_ptr

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme "unique"
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme “unique”
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme "unique"
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé
- On utilise `std::make_unique<type>` pour créer un `unique_ptr<type>`

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme "unique"
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé
- On utilise `std::make_unique<type>` pour créer un `unique_ptr<type>`
- La copie est interdite

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme “unique”
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé
- On utilise `std::make_unique<type>` pour créer un `unique_ptr<type>`
- La copie est interdite
- Peut être déplacé (avec `std::move`)

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme "unique"
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé
- On utilise `std::make_unique<type>` pour créer un `unique_ptr<type>`
- La copie est interdite
- Peut être déplacé (avec `std::move`)
- Disponible dans `<memory>`

- Une sorte de pointeur (contient une adresse, peut être **nul**)
- Invariant: un seul `unique_ptr` pointe vers la même donnée
 - d'où le terme "unique"
 - des pointeurs bruts peuvent pointer vers la donnée
- Contrairement à un pointeur brut, un `unique_ptr` **own** l'objet pointé
- On utilise `std::make_unique<type>` pour créer un `unique_ptr<type>`
- La copie est interdite
- Peut être déplacé (avec `std::move`)
- Disponible dans `<memory>`

 Des questions?

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>>{};

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}
```

Exemple d'usage de std::unique_ptr

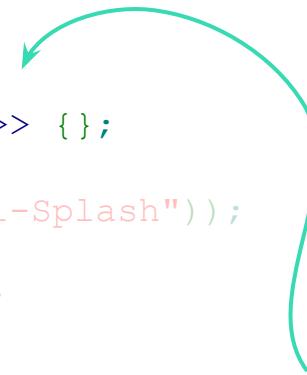
```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}
```



on instancie un `vector` de
`unique_ptr<Car>`

Exemple d'usage de std::unique_ptr

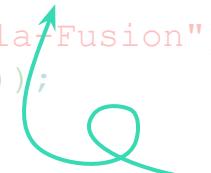
```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```



on alloue dynamiquement un
Car avec `make_unique`

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```

std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> {};
    R-value
    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}

```

l'élément est **déplacé** dans
le tableau

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```



on appelle
create_unique_car

Exemple d'usage de std::unique_ptr

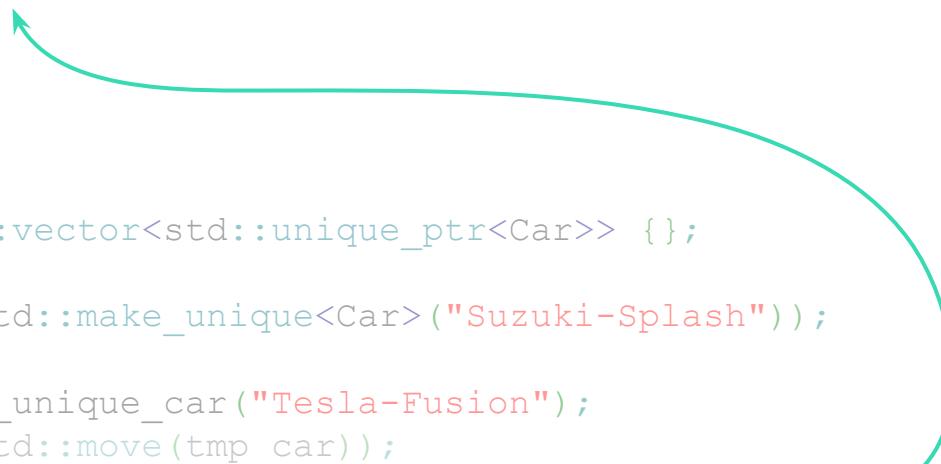
```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```



on alloue dynamiquement un
Car avec `make_unique`

Exemple d'usage de std::unique_ptr

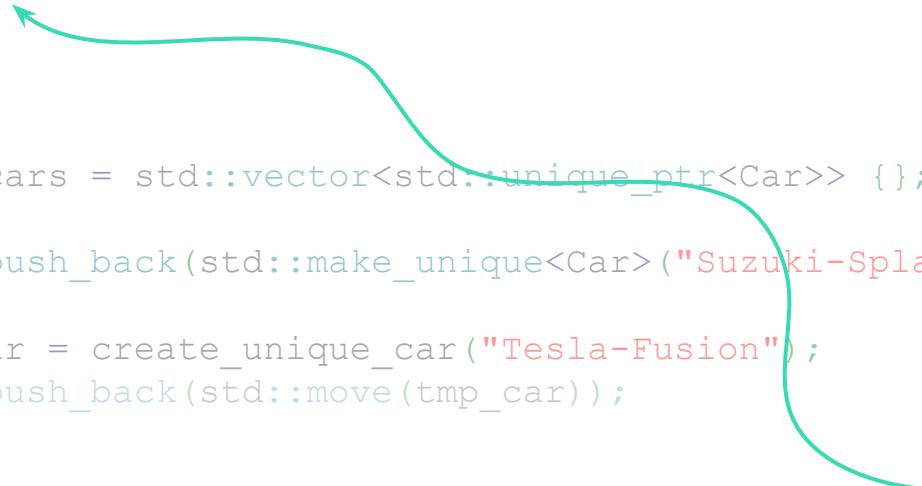
```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}
```



on renvoie le
unique_ptr par valeur

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> {};
    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}
```

R-value

la valeur de retour est **déplacée**
dans la variable tmp_car

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```

tmp_car est une **L-value** ; si on l'ajoute au tableau directement, le compilateur va essayer de **copier** le **unique_ptr**

L-value

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```

tmp_car est une **L-value**
tableau dirigé vers une autre variable au
essentiellement une **unique_ptr**

! ERREUR DE COMPILE

L-value

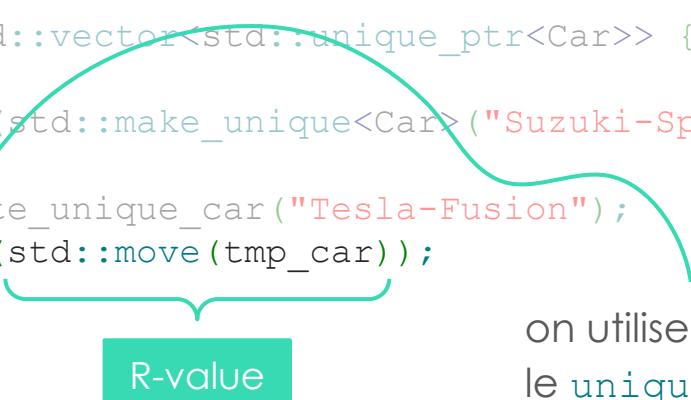
Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
    return 0;
}
```



R-value

on utilise `std::move` pour **déplacer**
le `unique_ptr` dans le tableau

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> { };

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));
}

return 0;
}
```

 tmp_car est désormais **vide**

Exemple d'usage de std::unique_ptr

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>>{};

    many_cars.push_back(std::make_unique<Car>("Suzuki-Splash"));

    auto tmp_car = create_unique_car("Tesla-Fusion");
    many_cars.push_back(std::move(tmp_car));

    return 0;
}
```



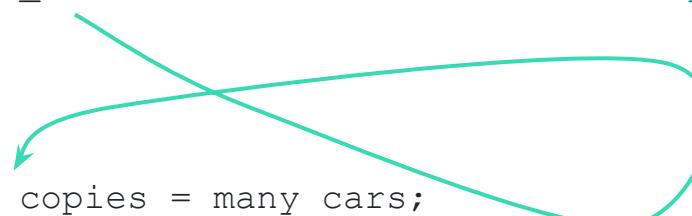
Des questions?

Et la copie dans tout ça?

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> {};
    /* .. */

    auto car_copies = many_cars;
}
```

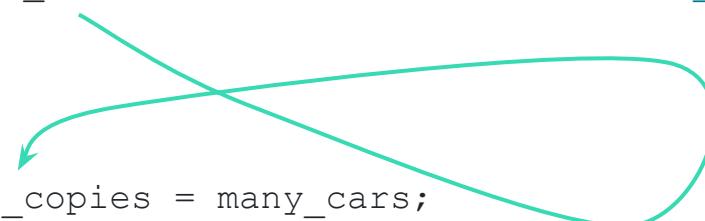


On essaie de copier un vecteur
de unique_ptr .
Est-ce que ça va marcher?

```
std::unique_ptr<Car> create_unique_car(const std::string& model)
{
    auto car = std::make_unique<Car>(model);
    return car;
}

int main()
{
    auto many_cars = std::vector<std::unique_ptr<Car>> {};
    /* .. */

    auto car_copies = many_cars;
    return 0;
}
```



On essaie de copier un vecteur
de unique_ptr .
Est-ce que ça va marcher?

Non ! copier le vecteur demande de
copier les std::unique_ptr

1. Copie
2. Déplacement
3. L-Value et R-Value
4. Conteneurs
5. Pointeurs intelligents
- 6. Héritage.**
 - a. Syntaxe
 - b. Instance d'une classe dérivée
7. Classes polymorphes.

```

class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};

```

```

class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {
        _x = 1;
        // _y = 3;
    }

private:
    int _z = 0;
};

```

```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {
        _x = 1;
        // _y = 3;
    }

private:
    int _z = 0;
};
```

toute instance de Derived peut être considérée comme une instance de Base



```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {}

    int x = 1;
    // _y = 3;
}

private:
    int _z = 0;
};
```



permet d'appeler le
constructeur de la classe-parente

Syntaxe

```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {
        _x = 1;
        // _y = 3;
    }

private:
    int _z = 0;
};
```

permet l'accès aux attributs depuis les instances-filles

Syntaxe

```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

accès valide

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {}

    _x = 1;
    // _y = 3;

private:
    int _z = 0;
};
```

```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

accès
invalidé

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {}

    _x = 1;
    // _y = 3;

private:
    int _z = 0;
};
```

```
class Base
{
public:
    Base(int x, int y)
        : _x { x }
        , _y { y }
    {}

    int get_y() const
    {
        return _y;
    }

protected:
    int _x = 0;

private:
    int _y = 0;
};
```

```
class Derived : public Base
{
public:
    Derived(int l, int m, int n)
        : Base { l + m, l * m }
        , _z { n }
    {}

    _x = 1;
    // _y = 3;
}

private:
    int _z = 0;
};
```



Des questions?

On peut appeler les fonctions publiques de la classe parente sur les instances de la classe fille.

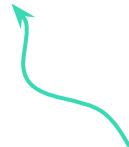
```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    std::cout << derived.get_y() << std::endl;

    return 0;
}
```

On peut appeler les fonctions publiques du type-parent sur les instances-filles.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    std::cout << derived.get_y() << std::endl;

    return 0;
}
```



`get_y()` est définie dans la partie publique de `Base`,
donc on peut l'appeler sur une instance de `Derived`

On peut appeler les fonctions publiques de la classe parente sur les instances de la classe fille.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    std::cout << derived.get_y() << std::endl;

    return 0;
}
```

 Des questions?

On peut ensuite référencer les instances du type-enfant par le type-parent.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    Base& ref_base = derived;

    return 0;
}
```

```
void fcn(const Base& base)
{
    ...
}

int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    fcn(derived);

    return 0;
}
```

On peut ensuite référencer les instances du type-enfant par le type-parent.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    Base& ref_base = derived;
    ...
    return 0;
}
```

derived peut être référencé par
son type parent Base

```
void fcn(const Base& base)
{
    ...
}

int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    fcn(derived);
    return 0;
}
```

On peut ensuite référencer les instances du type-enfant par le type-parent.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    Base& ref_base = derived;

    return 0;
}
```

```
void fcn(const Base& base)
{
    ...
}

int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    fcn(derived);

    return 0;
}
```



Des questions?

Cela fonctionne aussi avec des pointeurs **bruts**.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    Base* ref_base = &derived;

    return 0;
}
```

```
void fcn(const Base* base)
{
    ...
}

int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    fcn(&derived);

    return 0;
}
```

Cela fonctionne aussi avec des pointeurs **bruts**.

```
int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    Base* ref_base = &derived;
    ...
    return 0;
}
```

Derived* est convertible en Base*

```
void fcn(const Base* base)
{
    ...
}

int main()
{
    auto derived = Derived { ... };
    fcn(&derived);
    return 0;
}
```

Attention à la troncation

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base  base1 = f(...);  
    Base  base2 = g(...);  
    Base& base3 = g(...);  
}
```

Voyez vous le problème dans cette ligne ?



Attention à la troncation

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base base1 = f(...);  
    Base base2 = g(...);  
    Base& base3 = g(...);  
}
```

On essaie de stocker une Base
sur la pile.

On n'a donc pas la place de
stocker la Derived renvoyée par f

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base base1 = f(...);  
    Base base2 = g(...);  
    Base& base3 = g(...);  
}
```

On essaie de stocker une Base
sur la pile.

On n'a donc pas la place de
stocker la Derived renvoyée par f

⚠ Une Derived est une Base donc le
compilateur va **tronquer** ce qu'il dépasse

Attention à la troncation

```
Derived  f (...) { ... }
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()
{
    Base  base1 = f (...);
    Base  base2 = g (...);
    Base& base3 = g (...);
}
```

Voyez-vous le problème dans cette ligne ?



Attention à la troncation

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base  base1 = f (...);  
    Base  base2 = g (...);  
    Base& base3 = g (...);  
}
```

On essaie encore de stocker
une Base sur la pile.

g renvoie une L-value donc on
devrait la copier, mais on ne peut
pas stocker la copie

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base  base1 = f(...);  
    Base  base2 = g(...);  
    Base& base3 = g(...);  
}
```

On essaie encore de stocker
une Base sur la pile.

g renvoie une L-value (Derived&)
donc on devrait la copier, mais
Base ne sait se copier qu'une
Base&

⚠ Une Derived est une Base donc le
compilateur va copier la Derived **tronquée**

Attention à la troncation

```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base  base1 = f(...);  
    Base  base2 = g(...);  
    Base& base3 = g(...);  
}
```

Voyez vous le problème dans cette ligne ?



```
Derived  f (...) { ... }  
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()  
{  
    Base  base1 = f (...);  
    Base  base2 = g (...);  
    Base& base3 = g (...);
```

Voyez vous le problème dans cette ligne ?

Il n'y en a pas :)

Une Base& et une Derived& prennent la même place en mémoire.
On pourra récupérer une Derived& plus tard

```
Derived  f (...) { ... }
Derived& g (...) { ... }
```

```
int main()
{
    Base  base1 = f(...);
    Base  base2 = g(...);
    Base& base3 = g(...);
}
```

 Des questions?

Rappel:

- **Statique** = au moment de la compilation
- **Dynamique** = au moment de l'exécution

Et pour le type?

- **Type statique** = type déclarée dans le code
- **Type dynamique** = type réel à l'exécution

Type statique vs Type dynamique

```
class Base
{
    /* .. */
};

class Derived1 : public Base
{
    /* .. */
};

class Derived2 : public Base
{
    /* .. */
};

Derived1& f1() { ... }
Derived2& f2() { ... }
Base& f3() { ... }

int main()
{
    Base& x1 = f1();
    Base& x2 = f2();
    Base& x3 = f3();
}
```

Type statique vs Type dynamique

```

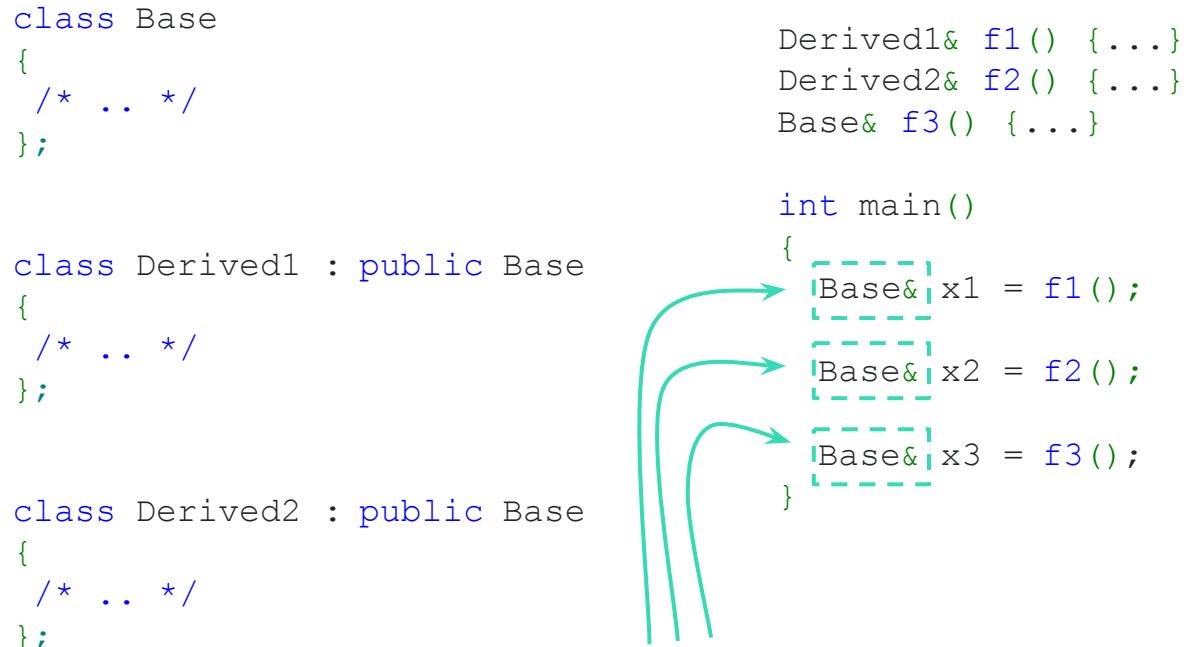
class Base
{
  /* .. */
};

class Derived1 : public Base
{
  /* .. */
};

class Derived2 : public Base
{
  /* .. */
};

Derived1& f1 () { ... }
Derived2& f2 () { ... }
Base& f3 () { ... }

int main()
{
  IBase& x1 = f1 ();
  IBase& x2 = f2 ();
  IBase& x3 = f3 ();
}
  
```



Les types statiques de `x1`,
`x2` et `x3` sont tous `Base&`

Type statique vs Type dynamique

```
class Base
{
    /* .. */
};
```

```
class Derived1 : public Base
{
    /* .. */
};
```

```
class Derived2 : public Base
{
    /* .. */
};
```

Derived1& f1() { ... }
Derived2& f2() { ... }
Base& f3() { ... }

```
int main()
{
    IBase& x1 = f1();
    IBase& x2 = f2();
    IBase& x3 = f3();
}
```

Le type **dynamique** de
x1 est probablement
Derived1&

Le type **dynamique** de
x2 est probablement
Derived2&

Les types statiques de x1,
x2 et x3 sont tous Base&

Type statique vs Type dynamique

```
class Base
{
    /* .. */
};
```

```
class Derived1 : public Base
{
    /* .. */
};
```

```
class Derived2 : public Base
{
    /* .. */
};
```

```
Derived1& f1() { ... }
Derived2& f2() { ... }
Base& f3() { ... }
```

```
int main()
{
    IBase& x1 = if1();
    IBase& x2 = if2();
    IBase& x3 = if3();
}
```

Les types statiques de x1, x2 et x3 sont tous Base&

Le type **dynamique** de x1 est probablement Derived1&

Le type **dynamique** de x2 est probablement Derived2&

⚠ On ne connaît pas le type **dynamique** de x3

```
class Base
{
    /* .. */
};
```

🧐 Des
questions?

```
class Derived1 : public Base
{
    /* .. */
};
```

```
class Derived2 : public Base
{
    /* .. */
};
```

```
Derived1& f1() { ... }
Derived2& f2() { ... }
Base& f3() { ... }
```

```
int main()
{
    IBase& x1 = if1();
    IBase& x2 = if2();
    IBase& x3 = if3();
}
```

Les types statiques de x1,
x2 et x3 sont tous Base&

Le type **dynamique** de
x1 est probablement
Derived1&

Le type **dynamique** de
x2 est probablement
Derived2&

⚠️ On ne connaît pas le
type **dynamique** de x3

1. Copie
2. Déplacement
3. L-Value et R-Value
4. Conteneurs
5. Pointeurs intelligents
6. Héritage
- 7. Classes polymorphes**
 - a. Définition
 - b. Redéfinir le comportement d'une classe
 - c. Résolution d'appels
 - d. Fonctions virtuelles pures

En C++, l'héritage permet de répondre à 2 besoins orthogonaux :

- éviter la duplication de code
- spécialiser un comportement

En C++, l'héritage permet de répondre à 2 besoins orthogonaux :

- éviter la duplication de code
- spécialiser un comportement

Une classe dont on a pu **redéfinir le comportement** via héritage est une classe dont les instances peuvent se comporter différemment selon le **type dynamique** de l'objet.

On parle de **classes polymorphes**.

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }

    void describe() const
    {
        std::cout << "This is a " << get_name() << std::endl;
    }
};
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }

    void describe() const
    {
        std::cout << "This is a " << get_name() << std::endl;
    }
};
```

indique que la fonction peut-être redéfinie par les classes-filles

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};

class Guitar: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "guitar";
    }
};
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};

class Guitar: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "guitar";
    }
};



demande que la fonction


```

demande au compilateur de vérifier que la fonction est bien virtuelle

Optionnel, mais fortement conseillé

```
int main()
{
    Piano piano;
    Guitar guitar;

    std::vector<Instrument*> instruments { &piano, &guitar };

    for (const auto* instrument: instruments)
    {
        std::cout << instrument->get_name() << std::endl;
    }

    return 0;
}
```

1. Une fonction virtuelle dans une classe-mère est également virtuelle dans les classes-filles (si elle a la **même signature**)
2. Si une fonction n'est pas virtuelle, on appelle la version définie dans le **type statique** de l'objet
3. Si une fonction est virtuelle, on appelle la version définie dans le **type dynamique** de l'objet
4. L'appel au **destructeur** répond aux mêmes règles que les autres fonctions

1. Une fonction virtuelle dans une classe-mère est également virtuelle dans les classes-filles (si elle a la **même signature**)
2. Si une fonction n'est pas virtuelle, on appelle la version définie dans le **type statique** de l'objet
3. Si une fonction est virtuelle, on appelle la version définie dans le **type dynamique** de l'objet
4. L'appel au **destructeur** répond aux mêmes règles que les autres fonctions.

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};

class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};
```

fonction
virtuelle

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};
```

fonction
virtuelle

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

donc virtuelle
aussi

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name () const
    {
        return "??";
    }
};
```

fonction
virtuelle

⚠️ **Attention** ⚠️
aux signatures

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name () const
    {
        return "piano";
    }
};
```

ne redéfinit
pas l'autre
fonction

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name () const
    {
        return "??";
    }
};
```

fonction
virtuelle

const

⚠️ Attention
aux signatures

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name ()
    {
        return "Piano";
    }
};
```

ne redéfinit
pas l'autre
fonction

BUG OBSCUR ⚠️

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};
```

toujours mettre `override` pour que
le compilateur nous prévienne si on se
trompe dans la signature

⚠️ **Attention** ⚠️
aux signatures

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() override
    {
        return "piano";
    }
};
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};
```

toujours mettre `override` pour que
le compilateur nous prévienne si on se
trompe dans la signature

⚠️ **Attention aux signatures** ⚠️

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() override
    {
        return "Piano";
    }
};
```



ERREUR DE COMPILE

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "??";
    }
};

class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```



Des questions?

1. Une fonction virtuelle dans une classe-mère est également virtuelle dans les classes-filles (si elle a la **même signature**)
2. Si une fonction n'est pas virtuelle, on appelle la version définie dans le **type statique** de l'objet
3. Si une fonction est virtuelle, on appelle la version définie dans le **type dynamique** de l'objet
4. L'appel au **destructeur** répond aux mêmes règles que les autres fonctions.
Pour garantir qu'un objet **polymorphe** sera **correctement détruit**, en particulier dans le cas d'**allocations dynamiques**, il faut toujours définir un **destructeur virtuel** dans la classe-mère (même s'il ne fait "rien").

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }
};

int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

```
int main()
{
    Piano piano; Piano type statique

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

on résout l'appel à `get_name()`



Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

fonction non
virtuelle

```
int main()
{
    Piano piano; // type statique

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

on résout l'appel à `get_name()`

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

fonction non
virtuelle

```
int main()
{
    Piano piano;
    type statique

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```

on réalise un **appel statique**

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }
};

int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```



```
class Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }
};
```

```
int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const
    {
        return "piano";
    }
};
```



Des questions?

1. Une fonction virtuelle dans une classe-mère est également virtuelle dans les classes-filles (si elle a la **même signature**)
2. Si une fonction n'est pas virtuelle, on appelle la version définie dans le **type statique** de l'objet
3. Si une fonction est virtuelle, on appelle la version définie dans le **type dynamique** de l'objet
4. L'appel au **destructeur** répond aux mêmes règles que les autres fonctions.

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }
};

int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}

class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

```
int main()
{
    Piano piano;
    Piano type statique

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

on résout l'appel à `get_name()`

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

fonction
virtuelle

```
int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

on résout l'appel à `get_name()`



```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

fonction
virtuelle

```
int type dynamique
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

on réalise un **appel dynamique**

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};
```

fonction
virtuelle

```
int type dynamique
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

on réalise un **appel dynamique**

Résolution d'appels

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "???";
    }
};

int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```



```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const
    {
        return "????";
    }
};

int main()
{
    Piano piano;

    Instrument& instrument = piano;
    std::cout << instrument.get_name() << std::endl;

    return 0;
}
```

```
class Piano: public Instrument
{
public:
    std::string get_name() const override
    {
        return "piano";
    }
};
```

🤔 Des questions?

1. Une fonction virtuelle dans une classe-mère est également virtuelle dans les classes-filles (si elle a la **même signature**)
2. Si une fonction n'est pas virtuelle, on appelle la version définie dans le **type statique** de l'objet
3. Si une fonction est virtuelle, on appelle la version définie dans le **type dynamique** de l'objet
4. L'appel au **destructeur** répond aux mêmes règles que les autres fonctions.

Pour garantir qu'un objet **polymorphe** sera **correctement détruit**, en particulier dans le cas d'**allocations dynamiques**, il faut toujours définir un **destructeur virtuel** dans la classe-mère (même s'il ne fait "rien").

Si une fonction n'a pas de sens à être définie dans la classe-mère, il n'est pas nécessaire de lui fournir une implémentation. On parle de **fonctions virtuelles pures**.

Si une classe contient des fonctions virtuelles pures, elle devient **abstraite** et n'est plus instanciable.

Les classes-filles doivent **redéfinir toutes les fonctions virtuelles pures** des types-parents pour **pouvoir être instanciées**.

Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const [= 0; ];
```



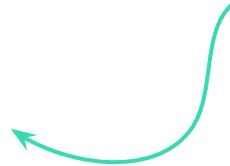
```
class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
```



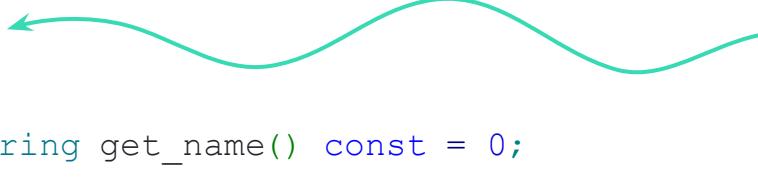
```
int main()
{
    Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

définit une fonction **virtuelle pure**



```
class Instrument {  
public:  
    virtual std::string get_name() const = 0;  
};  
  
class Flute : public Instrument {  
public:  
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }  
};  
  
int main()  
{  
    Instrument instrument;  
    Flute flute;  
  
    return 0;  
}
```



Instrument est donc **abstraite**

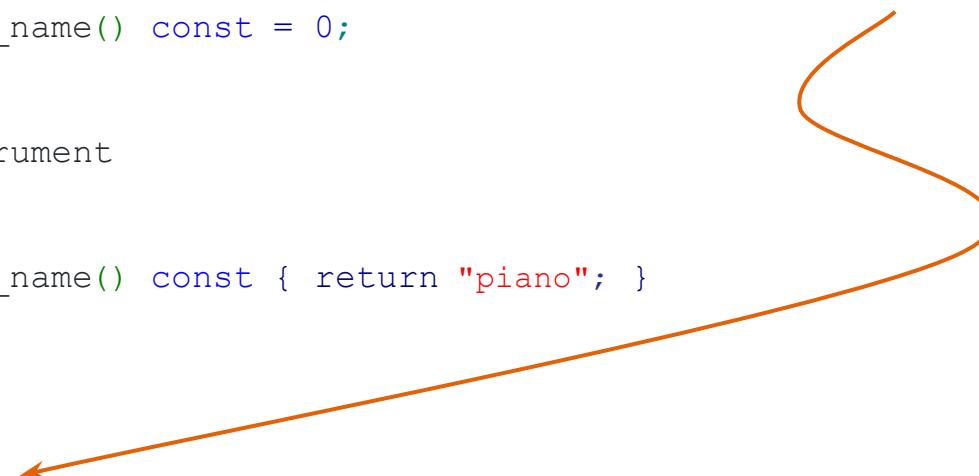
```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Instrument est donc **abstraite**
donc **n'est pas instanciable**



Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Instrument est donc **abstraite**
donc **n'est pas instanciable**

ERREUR DE COMPILEATION

Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute définit get_name



Fonctions virtuelles pures

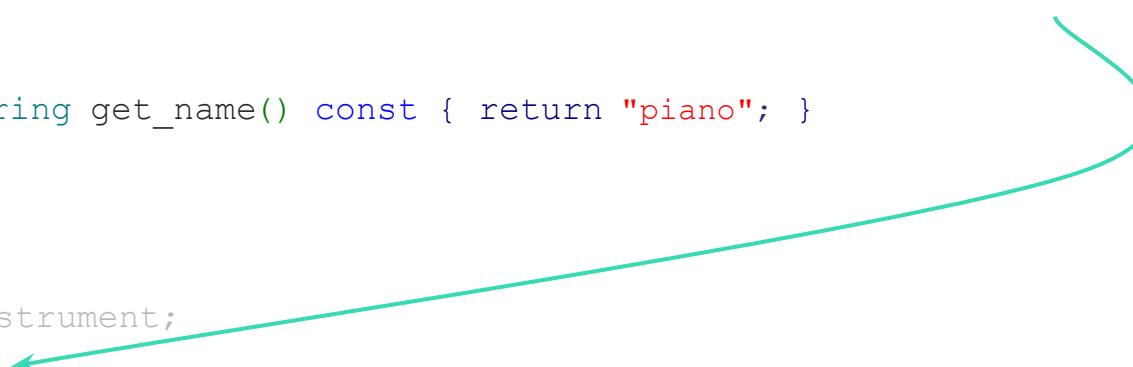
```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute n'a pas de fonctions virtuelle pure
Elle est donc instanciable.



Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute n'a pas de fonctions virtuelle pure
Elle est donc instanciable.

Pas de problème!

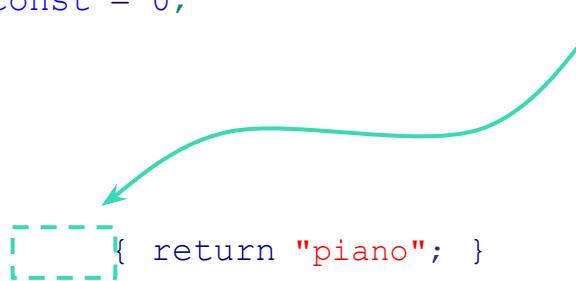
```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute, j'ai oublié const



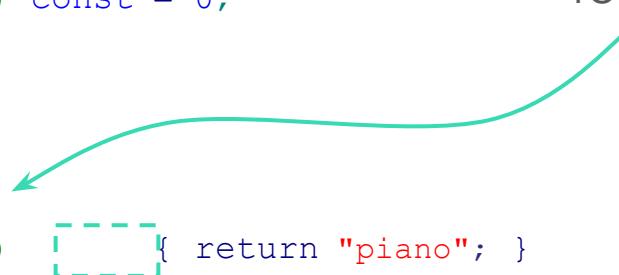
```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute définit une **autre** fonction-membre



```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() {   { return "piano"; } }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute est donc **abstraite**

Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() {   { return "piano"; } }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute est donc **abstraite**
donc **pas instanciable** 😱

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() { return "piano"; }
};

int main()
{
    //Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

Flute est donc **abstraite**
donc **pas instanciable** 😱

ERREUR DE COMPILEATION OBSCURE

Fonctions virtuelles pures

```
class Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const = 0;
};

class Flute : public Instrument
{
public:
    virtual std::string get_name() const { return "piano"; }
};

int main()
{
    Instrument instrument;
    Flute flute;

    return 0;
}
```

 Des questions?

- La copie
- Le déplacement
- Comment éviter (encore plus) de copies
- Conteneurs de base
- Utilisation des `std::unique_ptr`
- Héritage
- Résolution d'appel dynamique