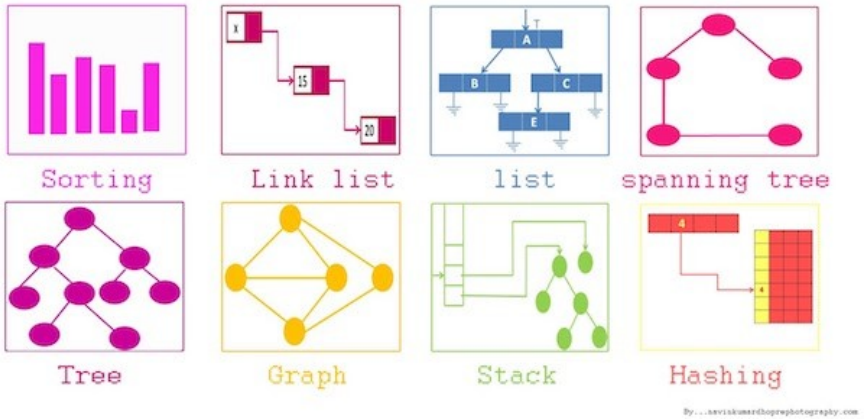
PRALG : séance 2

Notions de structures de données



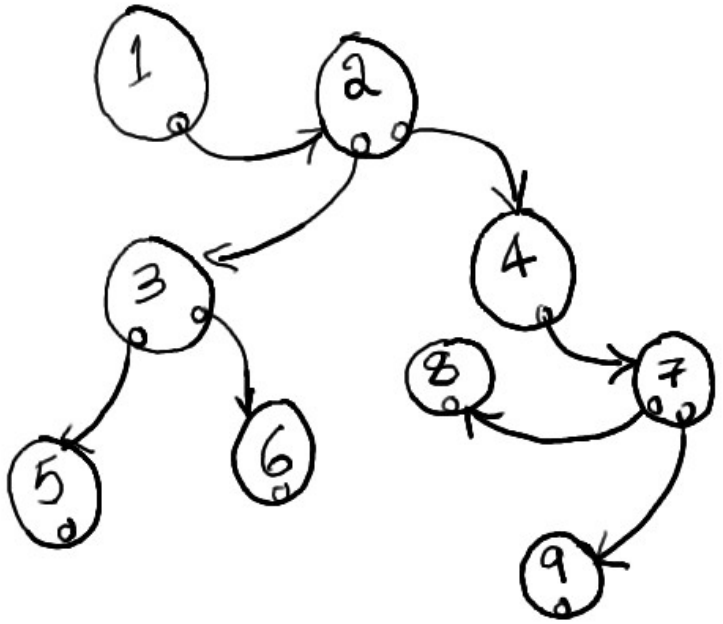
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

Pascal Monasse / Renaud Marlet
Laboratoire LIGM-IMAGINE

IP PARIS

Structure de données

- **Organisation** de l'**information**
  - structuration logique
  - moyens d'accès
- Exemples :
  - tableau
  - vecteur, matrice
  - liste, file, pile
  - arbre, graphe
  - table de hachage, ...



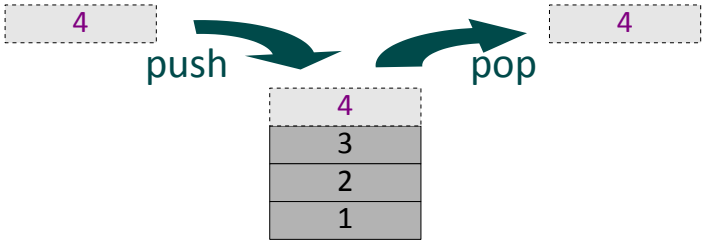
Pas d'informatique sans structures de données

- Omniprésent
  - presque tout ce qui comporte du **discret** (vs continu) ou tout ce qui est **composite**
  - simulations et calculs complexes
    - ex. physique (maillages...)
    - ex. finance (réseaux bayésiens...)

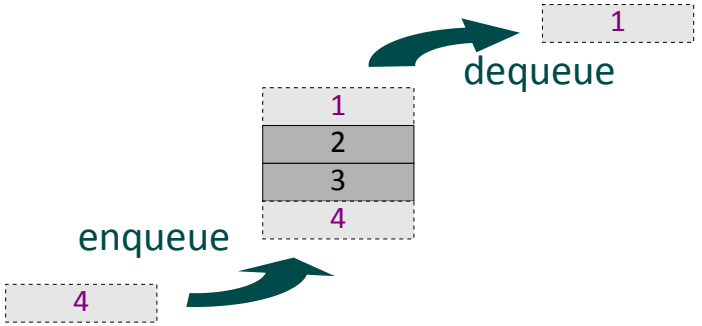
- Aspects théoriques
  - complexité : pire cas, en moyenne...
- Aspects pratiques
  - bibliothèques logicielles : STL, Imagine++, Boost, Eigen…

Type abstrait : données + opérations

- Exemple 1 : pile (stack) [Last In First Out, LIFO]
  - vide?
  - empiler (push)
  - dépiler (pop)



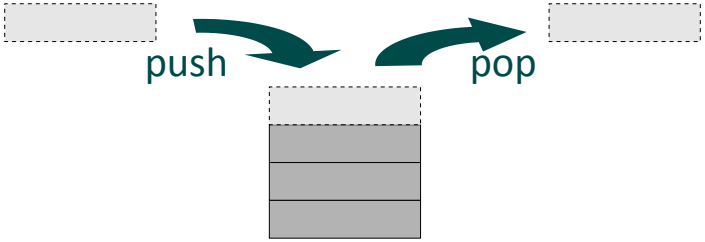
- Exemple 2 : file (queue) [First In First Out, FIFO]
  - vide?
  - ajouter (enqueue)
  - extraire (dequeue)



Type abstrait : données + opérations

- Implémentation avec langage orienté objet : classe
  - données (infos) : champs/variables d'instance (+ allocations)
  - opérations (accès, modifs) : méthodes/fonctions membres

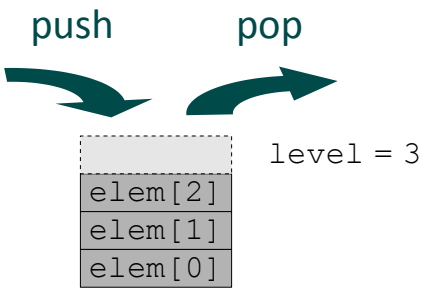
- Exemple : pile (stack)



  - les données :
    - valeurs rangées par ordre d'arrivée (ex. stockées dans un tableau)
  - les opérations :
    - accès aux données via des fonctions isEmpty(), push(val), pop()

Exemple d'implémentation (simple)

```
class stack { // Type abstrait = données + opérations
    int elem[20];
    int level;
public:
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) { elem[level++] = i; }
    int  pop() { return elem[--level]; }
};

int main() { // Exemple d'usage
    stack s;
    s.push(1);
    s.push(2);
    cout << s.pop() <<" "<< s.pop() << endl; // Affiche : 2 1
}
```



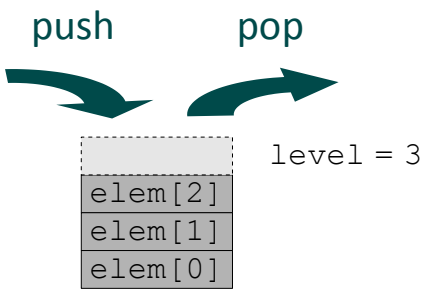
$Y = X{+}{+} \Leftrightarrow Y = X; X{+}{+};$
$Y = {+}{+}X \Leftrightarrow X{+}{+}; Y = X;$

$T[X{+}{+}] = Y \Leftrightarrow T[X] = Y; X{+}{+};$
$T[{+}{+}X] = Y \Leftrightarrow X{+}{+}; T[X] = Y;$

Exemple d'implémentation (simple)

```
class stack { // Type abstrait = données + opérations
    int elem[20];
    int level;
public:
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) { elem[level++] = i; }
    int  pop() { return elem[--level]; }
};

int main() { // Exemple d'usage
    stack s;
    s.push(1);
    s.push(2);
    cout << s.pop() <<" "<< s.pop() << endl; // Affiche : 2 1
}
```

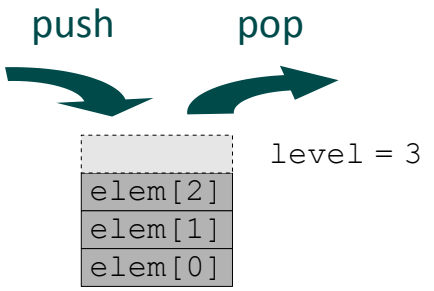
Quels sont les défauts ? (au moins 4)



Exemple d'implémentation (simple)

```
class stack { // Type abstrait = données + opérations
    int elem[20]; // taille fixe, codée en dur
    int level; // pas initialisé
public:
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) { elem[level++] = i; } // risque d'overflow
    int  pop() { return elem[--level]; } // risque d'underflow
};

int main() { // Exemple d'usage
    stack s;
    s.push(1);
    s.push(2);
    cout << s.pop() <<" "<< s.pop() << endl; // Affiche : 2 1
}
```

Quels sont les défauts ? (au moins 4)



Exemple d'implémentation (simple)

```
class stack { // Type abstrait = données + opérations
    int elem[20]; // taille fixe, codée en dur
    int level; // pas initialisé
public:
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) { elem[level++] = i; } // risque d'overflow
    int  pop() { return elem[--level]; } // risque d'underflow
};

int main() { // Exemple d'usage
    stack s;
    s.push(1);
    s.push(2);
    cout << s.pop() <<" "<< s.pop() << endl; // Affiche : 2 1
}
```

Quels sont les défauts ? (au moins 4)

Comment les corriger ?

Exemple d'implémentation (simple)

```
class stack { // Type abstrait = données + opérations
    int elem[20]; // taille fixe -> allocation + redimensionnement dynamiques
    int level; // pas initialisé -> initialisation (ex. dans un constructeur)
public:
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) { elem[level++] = i; } // overflow -> resize
    int  pop() { return elem[--level]; } // underflow -> erreur ou valeur par défaut
}; // + ajout d'un destructeur pour libérer la mémoire dynamique

int main() { // Exemple d'usage
    stack s;
    s.push(1);
    s.push(2);
    cout << s.pop() <<" "<< s.pop() << endl; // Affiche : 2 1
}
```

Comment les corriger ?

X[*n*] ⇔ (*(*X*+*n*))

Rappel sur les pointeurs

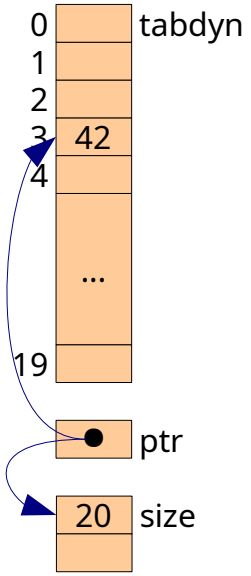
X–>name ⇔ (**X*).name

- **Allocation statique**

```
int tabstat[20];
tabstat[3] = 42;
```

- **Allocation dynamique**

```
int *tabdyn;
int size = f(var)+1;
tabdyn = new int[size];
tabdyn[3] = 42;
int* ptr = tabdyn+3;
*ptr=42;  ptr[0]=42;  // idem
ptr = &size; (*ptr)++; // 21
delete[] tabdyn;
```



- **Allocation statique**

```
class Point { public:
    int x, y;
    Point(int u,int v){...} };
Point p; p.x = 17; p.y = 5;
Point q(17,5);
int *ptr = &p.x;  *ptr = 42;
```

- **Allocation dynamique**
  -

```
Point *p = new Point;
p–>x = 17; p–>y = 5;
Point *q = new Point(17,5);
int *ptr = &p–>x; *ptr = 42;
delete p; delete q;
```

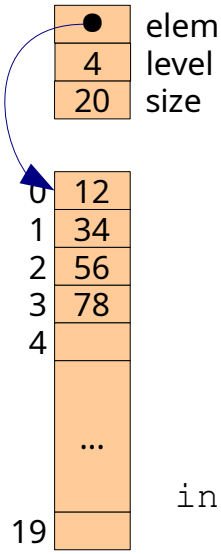
**X*++ ⇔ *(*X*++)

Exemple d'implémentation (plus robuste)

$Y = X{+}{+} \Leftrightarrow Y = X; X{+}{+};$
$Y = {+}{+}X \Leftrightarrow X{+}{+}; Y = X;$

$T[X{+}{+}] = Y \Leftrightarrow T[X] = Y; X{+}{+};$
$T[{+}{+}X] = Y \Leftrightarrow X{+}{+}; T[X] = Y;$

```
class stack {
    int *elem;
    int level, size;
public:
    stack() : level(0), size(20) { elem = new int[size]; } // Constructeur
    ~stack() { delete[] elem; }  // Destructeur : libération de la mémoire
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) {
        if (level == size) {      // Redimensionner si la pile est pleine :
            int newSize = size + 10;              // Augmenter la taille
            int *newElem = new int[newSize];      // Allouer plus grand
            for (int j=0; j < size; j++)          // Copier l'ancienne mémoire
                newElem[j]=elem[j];               //    dans la nouvelle
            delete[] elem;                        // Libérer l'ancienne mémoire
            size = newSize;                       // Mettre à jour la taille
            elem = newElem; }                     // Utiliser la nouvelle mémoire
        elem[level++] = i; }      // Garantie: toujours de la place pour empiler
    int pop() {
        if (level == 0) return 0; // Rendre une valeur par défaut si pile vide
        return elem[--level]; }   // Garantie: jamais d'accès hors du tableau
};
```



En résumé

- Constructeur
  - bien initialiser
- Destructeur
  - libérer la mémoire allouée dynamiquement (récursif)
- Vérifications de validité, de cohérence
  - débordement inférieur/supérieur (underflow/overflow), ...
- Adaptation pour poursuivre l'exécution, ou non

Gestion des cas d'erreur ☛

Y a un bug ?!

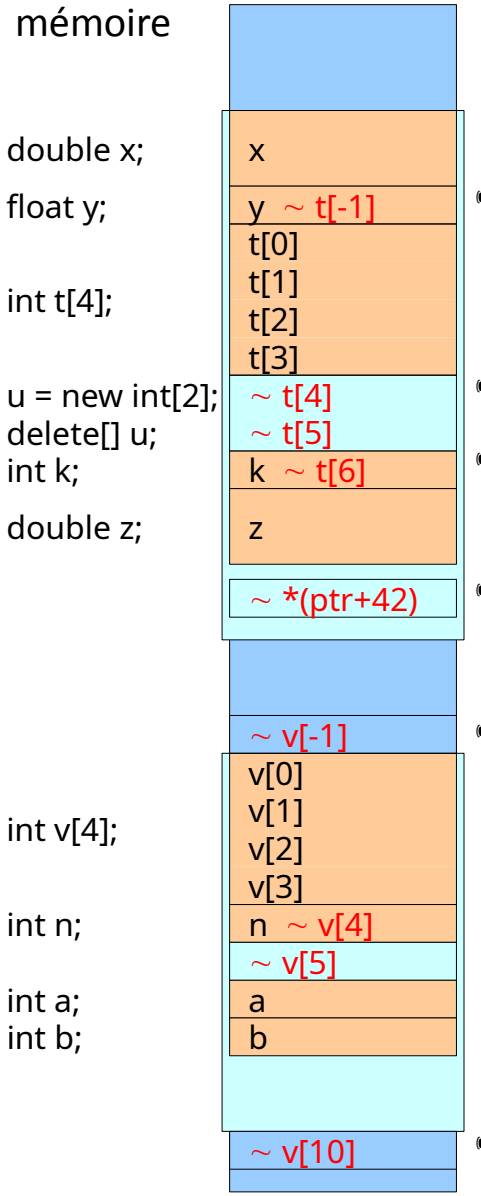
- Taille/complexité croissante des systèmes
  [mesure courante : "(source) lines of code" = (S)LOC → KLOC, MLOC...]
  - noyau Linux : 5 MLOC (2003), 16 MLOC (2012), 30 (2021)
  - distribution Debian : 55 MLOC (2000), 419 MLOC (2012)
- **Pas de programme sans erreur**
  - programme « ordinaire » : ≈ 1 erreur pour 100 LOC
    - davantage encore pour de gros programmes, plus complexes
  - navette spatiale US (à bord) : 1 erreur pour 420.000 LOC
- **Erreurs = la norme, pas l'exception ☛ savoir les gérer**
  - Ariane 5 : 10 ans de travail, 1 milliard €, crash au premier lancement (1996) pour une gestion d'erreur non activée

Attention, estimation très grossière !

Qu'est-ce qu'une erreur ?

- Terminologie IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
  - **anomalie :** toute chose qui dévie de ce qui est prévu
  - **bogue :** faute qui cause un comportement non voulu ou non anticipé
  - **erreur :** écart entre une valeur calculée/observée et sa valeur théorique ; souvent aussi synonyme de faute
  - **faute :** ensemble d'instructions incorrectes qui cause un comportement non voulu ou non anticipé
- **Dans l'usage, les termes restent flous/ambigus ☹**
  - non voulu/anticipé pour qui ? : “it's not a bug, it's a feature”

Erreurs typiques d'accès à la mémoire



espace inutilisé (vide ou libéré après allocation ou dépilage)
espace utilisé (allocation statique, allocation dynamique ou pile)
page mémoire (taille en pratique de l'ordre de 4K)

☛ lecture/écriture dans une autre variable → erreur possible mais pas systématique

☛ lecture/écriture dans une zone mémoire inutilisée → pas d'erreur visible

☛ lecture/écriture dans une autre variable → erreur possible mais pas systématique

☛ lecture/écriture à un emplacement arbitraire → erreur possible mais pas systématique

☛ lecture/écriture hors page mémoire → interruption et émission d'un signal
(erreur de segmentation, erreur de bus mémoire...
= "segmentation fault", "bus error")

☛ lecture/écriture dans la page mémoire → pas d'interruption
☛ lecture/écriture dans la page mémoire → pas d'interruption

☛ lecture/écriture hors page mémoire → interruption et émission d'un signal

Erreur manifeste vs erreur silencieuse

- **Erreur manifeste**, « incompatible » avec l'exécution
  - ex. déréférence d'un pointeur nul, accès à zone interdite
  - erreur système : segmentation fault (segfault, bus error...)
  - fin brutale de l'exécution, données en traitement perdues

  → **pas de résultat**
- **Erreur silencieuse**, « compatible » avec l'exécution
  - ex. lire/écrire hors des limites d'un tableau si zone permise
  - le programme continue avec une valeur aberrante
  - il se plante/trompe plus loin → bogue très difficile à trouver

  → **résultat potentiellement faux, mais on ne le sait pas**

Stratégies de gestion d'erreur
(forme de tolérance aux fautes)

- **Détection**
  - explicite : test dans le programme
    - hypothèse : on a une idée de ce qui est attendu/normal
      ex. plage de valeurs, type d'objet, cohérence entre valeurs...
    - test de cas simples seulement sinon erreur dans gestion d'erreur...
  - implicite : rattrapage d'exceptions, abonnement à signaux

if (error condition) then action

- **Réaction**
  - signalement de l'erreur ou non ?
  - à qui ? → programmeur ou utilisateur final ?
  - poursuite de l'exécution ou arrêt ?
    - avec valeur par défaut ? → peu sûr : on croise les doigts...
    - avec un véritable traitement alternatif !

Tentative de traitement : détecter, avertir, sauvegarder, terminer

```
int pop()
{
  if (level <= 0) { // If popping from empty stack
    cout << "Trying to pop from empty stack" << endl;
    savePreciousData();
    exit(17);          // Quit execution, indicating specific error code
  }
  return elem[--level] ;
}
```

- message spécifique à l'erreur
- sauvegarde des données précieuses
- terminaison propre
- diagnostic possible à l'extérieur du programme

Tentative de traitement : détecter, avertir, sauvegarder, terminer

```
int pop()
{
  if (level <= 0) { // If popping from empty stack
    cout << "Trying to pop from empty stack" << endl;
    savePreciousData();
    exit(17);          // Quit execution, indicating specific error code
  }
  return elem[--level] ;
}
```

Tout va bien ?
Est-ce pratique ?

- message spécifique à l'erreur
- sauvegarde des données précieuses
- terminaison propre
- diagnostic possible à l'extérieur du programme

Tentative de traitement : détecter, avertir, sauvegarder, terminer

```
int pop()
{
  if (level <= 0) { // If popping from empty stack
    cout << "Trying to pop from empty stack" << endl;
    savePreciousData();
    exit(17);          // Quit execution, indicating specific error code
  }
  return elem[--level] ;
}
```

```
% prog tqPopOK
% echo $?
0
% prog tqPopEmpty
% echo $?
17
```

Non, ce n'est pas pratique ☹

- message spécifique à l'erreur, mais pour qui ? développeur de `stack`, utilisateur de `stack` ou utilisateur final ?
- sauvegarde des données précieuses, mais souvent pas accessibles (pas visibles) depuis `stack`, ou inconnues de ce développeur
- terminaison propre, mais brutale (pas de seconde chance)
- diagnostic possible à l'extérieur du programme, mais difficile

Messages d'erreur (ou d'avertissement)

- À l'attention d'un utilisateur interne (développeur)
  - **canal de sortie** spécifique pour erreurs : **`cerr`** (≠ `cout`)
    - `cerr << "Trying to pop from empty stack" << endl;`
    - `% prog 2>errfile`
    - `% prog 2>&1 | more`
  - écriture dans un **fichier de log** (= journal de bord)
    - plus général que pour les seules erreurs : trace de toute activité
    - ajout toujours en fin de fichier → histoire complète de l'exécution
    - consultable pendant et après exécution, et exécutions multiples
    - ex. Unix : plusieurs fichiers pour différents services, voir /var/log
- À l'attention d'un utilisateur final
  - boîtes de dialogue (interface graphique)

0: entrée standard (stdin, cin)
1: sortie standard (stdout, cout)
2: sortie d'erreur (stderr, cerr)

Messages d'erreur (ou d'avertissement)

- Penser à l'internationalisation :
  - message pour les développeurs → généralement en anglais
    - pour une diffusion large, dans des équipes internationales
  - message pour les utilisateurs finaux → langue paramétrable
    - masque avec trous, spécifiques à chaque langue

```
msg[FRENCH] ="Le bilan est de %d sur %d\n";
msg[ENGLISH]="The balance is %d out of %d\n";
msg[ITALIAN]="Il bilancio è di %d su %d\n";
...
if (...) lang = FRENCH; // Choix de langue
...
printf(msg[lang],bal,tot); // Msg contextuel
```

Terminer proprement

- Terminaison « propre » :
  - fermeture des fichiers ouverts avec vidage (flush) des flux bufferisés
  - effacement des fichiers temporaires
  - contrôle rendu à l'environnement hôte

flux bufferisé (buffered stream): entrées/sorties sur disque différées pour des raisons d'efficacité → écriture de données par bloc

- Terminaison propre automatique avec **exit**

```
#include <cstdlib>
...
exit(1);  // void exit(int status)
```

  - et le statut permet un diagnostic en dehors du programme
    - 0 ou EXIT_SUCCESS : exécution réussie
    - 1 ou EXIT_FAILURE : échec en cours d'exécution
    - toute valeur différente de 0 : différentes formes/raisons d'échec

Nettoyage spécifique au programme lors de la terminaison

- int **atexit** (void (*function) (void))

```
#include <stdlib.h>
void cleanUp1 (void) { cout << "Doing cleanup 1"; … }
void cleanUp2 (void) { cout << "Doing cleanup 2"; … }
int main ()
{
    atexit(cleanUp1);
    atexit(cleanUp2);
    cout << "Doing main work"; ...
    return 0;
}
```

- Appel (en ordre inverse) des fonctions enregistrées
  - Doing main work, Doing cleanup 2, Doing cleanup 1

Tentative de traitement : détecter, avertir, sauvegarder, terminer

```
int pop()
{
  if (level <= 0) { // If popping from empty stack
    cout << "Trying to pop from empty stack" << endl;
    savePreciousData();
    exit(17);          // Quit execution, indicating specific error code
  }
  return elem[--level] ;
}
```

- message spécifique à l'erreur, mais pour qui ?
  développeur de `stack`, utilisateur de `stack` ou utilisateur final ?
- sauvegarde des données précieuses, mais souvent pas accessibles depuis `stack`, ou inconnues du développeur

☛ Meilleure situation **dans l'appelant** (plus de contexte, accès aux données) → **y faire là le traitement d'erreur**

Mécanismes de signalement d'erreur

- Affecter un code d'erreur dans une variable
  - peut être testée et un comportement approprié choisi
- Retourner une valeur impossible (ex. -1 pour une taille)
  - peut être testée et un comportement approprié choisi
- Lancer une exception (∃ dans beaucoup de langages)
  - rattrapable par l'appelant
- Envoyer un signal (y compris ex. segfault)
  - reçu par une fonction définie au préalable pour le traiter

Signalement d'erreur : variable d'erreur

- Variable d'erreur définie par le système : **errno**
  - ex. racine carrée : double sqrt (double x)

    si x < 0, la variable **errno** reçoit une valeur ≠ 0 (EDOM)

```
#include <cerrno>
y = sqrt(x);
if (errno != 0) ...
```

  - ex. ouverture de fichier : FILE* fopen(char* filename,...)

    en cas d'échec, positionne la variable **errno**:
    - EACCES: Permission denied
    - EINVACC: Invalid access mode
    - EMFILE: No file handle available
    - ENOENT: File or path not found ...
  - valeurs possibles : voir `system_error` (~80 valeurs)

Signalement d'erreur : variable d'erreur

- Définition/affectation d'une variable d'erreur
  - par l'appel d'une fonction standard : errno
  - par le programmeur (réutilisation possible de errno)
- **Utilisation très délicate**
  - errno pas remis à 0 à chaque opération
    → peut indiquer une erreur ancienne
  - à tester **immédiatement** après l'appel

```
y = sqrt(x);
afficher(x);
if (errno != 0)
  cout << "sqrt neg";  // Faux si afficher() modifie errno
```

☛ Pratique peu recommandée (lourd, risque d'erreurs)

Signalement d'erreur : retour d'une valeur impossible

- [C] char *strchr (char* str, int ch) // search character
  - retourne pointeur nul si caractère non trouvé
- [Java] int indexOf(int ch)
  - retourne -1 si caractère non trouvé
- [C++] size_t string::find (char c, size_t pos = 0)
  - retourne la plus grande valeur de size_t si caractère non trouvé
- [C++] iterator set::find (key_type &x)
  - retourne set::end si non trouvé (itérateur vers dernier élément)

size_t : type entier ≥ 0 représentant une taille ou une position mémoire

- À tester après l'appel

```
it = s.find(x);
if (it != s.end()) { … }
```

Signalement d'erreur : retour d'une valeur impossible + variable d'erreur

- **Variable d'erreur peu recommandée...**
  mais OK pour qualifier un type d'erreur signalée
  - ex. FILE* fopen(char* filename, char* mode)
  - si échec, retourne un pointeur nul **et** positionne `errno`:
    - EACCES: Permission denied
    - EINVACC: Invalid access mode ...
  - tester après l'appel

```
FILE* fp = fopen("file", "r");    // Essaie d'ouvrir le fichier en lecture
if (!fp) {                        // En cas d'échec (si pointeur nul)
    perror("Cannot open file"); // Affiche message + cause sur cerr
    // Affiche par ex. : "Cannot open file: No such file or directory"
    exit(1) ; }
fscanf(fp,"%d",&n);               // Lit un entier dans le fichier
```

Signalement et rattrapage d'erreur : levée/rattrapage d'exception

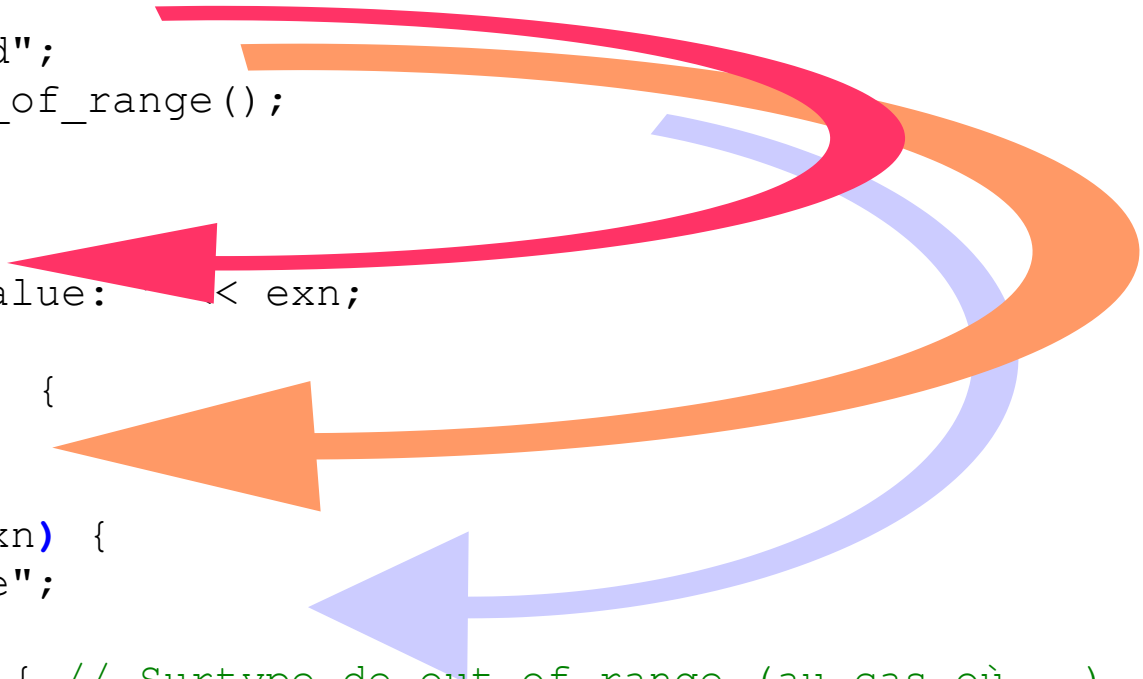
```
try
{ // Bloc d'exécution à l'intérieur duquel des exceptions peuvent
être lancées
  if (x == 0)
    throw "Cannot divide by 0"; // Lancement d'une exception
  y = 1/x;
  ...

  ...

  ...

}
catch (char* exn) // Rattrapage d'une exception de type char*
{
  // Par exemple, avertir de l'erreur
  cerr << exn << endl;
  // Tolérance à la faute : utiliser la plus grande valeur possible
(~ infinity)
  y = FLT_MAX;
}
// Code exécuté dans tous les cas (qu'une exception soit lancée ou
pas)
z = y-3.0;
```

si l'exception est lancée

si l'exception n'est pas lancée

Signalement et rattrapage d'erreur : rattrapage d'exception par type

```
try {
  if (cond1) throw 10;
  if (cond2) throw "Bad";
  if (cond3) throw out_of_range();
  ...
}
catch (int exn) {
  cout << "Exception value: " << exn;
}
catch (const char* exn) {
  cout << exn;
}
catch (out_of_range &exn) {
  cout << "Out of range";
}
catch (exception &exn) { // Surtype de out_of_range (au cas où...)
  cout << "Some exception occurred";
}
catch (...) {              // Attrape toutes les exceptions qui passent
  cout << "Something wrong happened";
}
```



Signalement et rattrapage d'erreur : hiérarchie d'exceptions (ex. STL)

```
class exception {
public:
  exception () noexcept;
  exception (const exception&) noexcept;
  exception& operator= (const exception&) noexcept;
  virtual ~exception() noexcept;
  virtual const char* what() const noexcept;
}

// Définies par #include <stdexcept> :
class logic_error : public exception {
public:
  explicit logic_error (const string& what_arg);
};

class out_of_range : public logic_error {
public:
  explicit out_of_range (const string& what_arg);
};
```

Signalement et rattrapage d'erreur : hiérarchie d'exceptions (ex. STL)

- Exception **logic_error** et sous-classes
  - utilisées pour signaler des erreurs indépendantes des entrées de l'utilisateur, liées à la logique du programme : violation de préconditions, d'invariants...
  - **domain_error**, **invalid_argument**, **length_error**, **out_of_range**, **future_error** (pour les threads)
- Exception **runtime_error** et sous-classes
  - utilisées pour signaler des erreurs causées par les entrées de l'utilisateur, détectable seulement lors d'une exécution
  - **range_error**, **overflow_error**, **underflow_error**, **system_error**

Signalement et rattrapage d'erreur : hiérarchie d'exceptions (ex. STL)

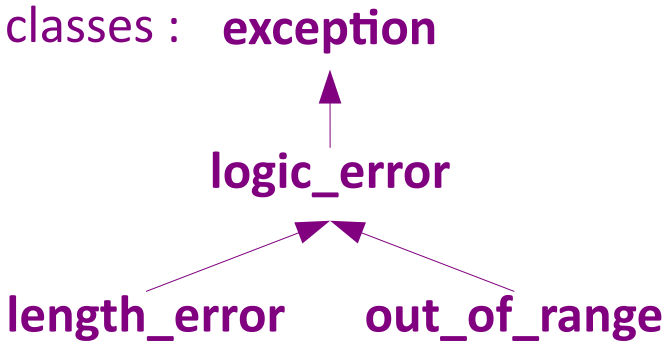
- Exception **logic_error** et sous-classes
  - utilisées pour signaler des erreurs indépendantes des entrées de l'utilisateur, liées à la logique du programme : violation de préconditions, d'invariants...
  - **domain_error**, **invalid_argument**, **length_error**, **out_of_range**, **future_error** (pour les threads)
- Exception **runtime_error** et sous-classes

en pratique :
∃ zone grise

  - utilisées pour signaler des erreurs causées par les entrées de l'utilisateur, détectable seulement lors d'une exécution
  - **range_error**, **overflow_error**, **underflow_error**, **system_error**

Signalement et rattrapage d'erreur : rattrapage d'exception par (sous-)type

Hiérarchie de classes :



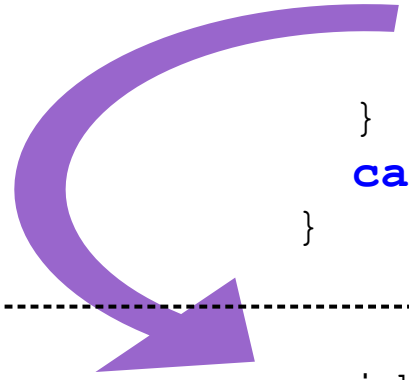

```
try {
  if (cond) throw length_error();
  ...
}
catch (out_of_range &exn) { // Type inapproprié
  cout << "Out of range";
}
catch (exception &exn) {    // Premier surtype testé
  cout << "Exception";
}
catch (logic_error &exn) {  // Meilleur surtype mais testé trop
tard
  cout << "Logic error";    // Jamais exécuté !
}
catch (length_error &exn) { // Type exact mais testé trop tard
  cout << "Length error";   // Jamais exécuté !
}
...
```

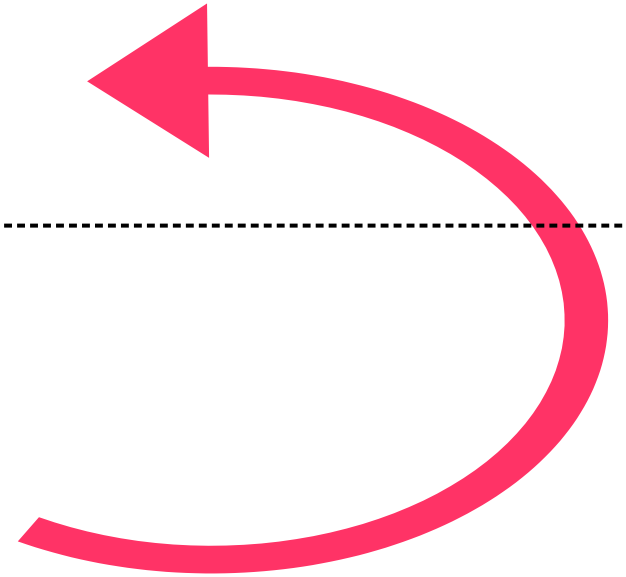
Signalement et rattrapage d'erreur : exceptions emboîtées intraprocédurales

```
try
{
   ...
   try
   {
      if (cond) throw "Bad";
      ...
   }
   catch (int exn)
   {
      ...
   }
   ...
}
catch (char* exn)
{
   ...
}
```

Signalement et rattrapage d'erreur : exceptions emboîtées interprocédurales

```
void f()
{
  try
  {
    ...
    g();
    ...
  }
  catch (char* exn) { ... }
}
```

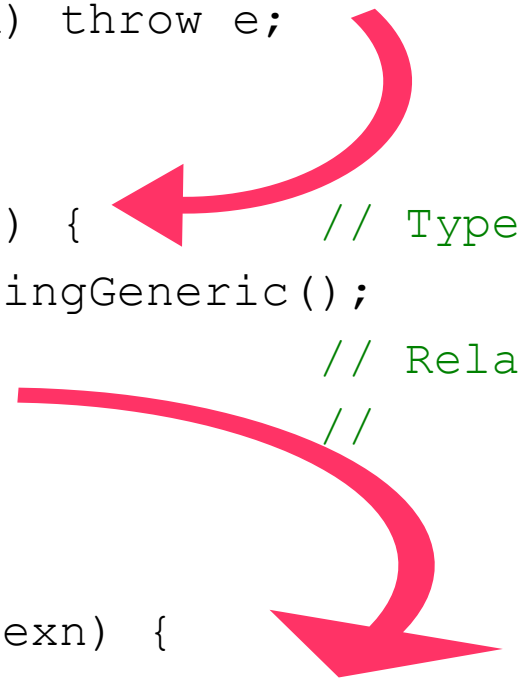




```
void g()
{
  try
  {
    if (cond) throw "Bad";
    ...
  }
  catch (int exn) { ... }
  ...
}
```

Signalement et rattrapage d'erreur : relancement d'exception

```
try {
  ...
  try {
    ...
    if (cond) throw e;
    ...
  }
  catch (...) {          // Type de l'exception quelconque
    doSomethingGeneric();
    throw;               // Relance la même exception
  }                      //      (sans la connaître)
  ...
}
catch (type exn) {
  doSomethingSpecific(exn);
  throw exn;             // Relance la même exception
}                        //      (ici en la réutilisant
explicitement)
```



Ex. gestion des accès aux éléments de vecteurs avec la STL

- Sans vérification d'index: **`v[i]`**
  - même comportement « arbitraire » qu'avec un tableau t[i]
- Avec vérification d'index: **`v.at(i)`**
  - levée d'exception : out_of_range

```
vector<int> v(10);
try {
  v.at(15)=20;
  ...
}
catch (out_of_range &exn) {
  cerr << "Out of range: "
       << exn.what() << endl; // message associé
}
//Ex. Libstdc++6, affiche:
"vector::_M_range_check: __n (which is 15) >= this->size() (which is 10)"
```

Au fait, ayez le réflexe de lire la doc !

public member function

std::vector::operator[]

<vector>

```
      reference operator[] (size_type n);
const_reference operator[] (size_type n) const;
```

Access element

Returns a reference to the element at position *n* in the vector container.

[...]

Exception safety

If the container size is greater than *n*, the function never throws exceptions (no-throw guarantee).
Otherwise, the behavior is undefined.

public member function

std::vector::at

<vector>

```
      reference at (size_type n);
const_reference at (size_type n) const;
```

Access element

Returns a reference to the element at position *n* in the vector.

The function automatically checks whether *n* is within the bounds of valid elements in the vector, throwing an out_of_range exception if it is not (i.e., if *n* is greater than, or equal to, its `size`). This is in contrast with member operator[], that does not check against bounds.

Mieux vaut prévenir que guérir

- Tester qu'une opération est possible avant de la faire
  - ex. toujours tester `isEmpty()` avant d'appeler pop()
- Rendre une opération inaccessible lorsqu'elle est impossible ou n'a pas de sens
  - ex. boutons grisés dans barre d'outils et menus

☛ Robustesse améliorée mais pas garantie

- la fonction `pop()` reste mécaniquement accessible même lorsque la pile est vide

☛ Toujours prévoir le pire cas → rattraper/relancer

Assertion : Gestion d'erreur conditionnelle

```
#include <cassert>
...
assert(level > 0) ; // assert(invariant)
                    //     = condition qui doit
toujours être satisfaite
return elem[--level];
```

- **En phase de mise au point**
  - condition de assert toujours testée : plus sûr, mais plus lent
  - en cas d'insatisfaction, message et terminaison (brutale)
    - assertion failed: *expression*, file *filename*, line *line number*

  [généralement implémenté via des exceptions]
- **Une fois le code mis au point** (ex. à la livraison)
  - test éliminés : pas sûr, mais plus rapide
    - #define NDEBUG avant l'inclusion de cassert
    - ligne de commande du compilateur : /DNDEBUG, -DNDEBUG
    - Automatique en mode Release avec CMake

Quoi utiliser quand ?

- Limites d'utilisation
  - variable d'erreur : toujours utilisable, mais lourd et peu sûr
  - valeur de retour : si ∃ valeurs impossibles, sinon ajout statut d'erreur
    - lourd, avec le type pair de la STL, ex. `pair`(*result*,*error_status*)
    - sauf cas du type `void`, transformé en type *error_status*
  - **exception :** plus souple, moins lourd pour cas courants ➔ **à privilégier**
- Veiller à la cohérence du choix :
  - ex. tout par valeur de retour ou tout par exception
- Assertion
  - OK pour test de la cohérence **interne** d'un programme/bibliothèque
  - pas pour signaler une erreur à un utilisateur
    (idée = suppression du assert à la livraison du code binaire)

Retour à la pile : Implémentation plus simple, plus robuste

```
class stack {
    vector<int> v; // Pour pouvoir agrandir la taille facilement
    int level;
public:
    stack() : v(20), level(0) {}
    // Pas de destructeur explicite : v détruit automatiquement quand
un stack est détruit
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) {
        if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
        v[level++] = i;
    }
    int pop() {
        if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
        return v[--level];
    }
};
```

Retour à la pile : Exemple d'utilisation

```
stack s;
s.push(1); // Empile 2 éléments
s.push(2);
...
```

```
    for (int i = 0; i < 4; i++) // Dépile 4 éléments
        cout << s.pop() << endl;
    ...
```

```
// Affiche (ex. avec libstdc++6.0.25) :
2
1
terminate called after throwing an instance of 'std::length_error'
  what():  EmptyStack
Aborted (core dumped)
```

Retour à la pile : Exemple d'utilisation

```
stack s;
s.push(1); // Empile 2 éléments
s.push(2);
...
try
{
    for (int i = 0; i < 4; i++) // Dépile 4 éléments
        cout << s.pop() << endl;
    ...
}
catch (exception &exn) {
    cerr << "Something bad happened: " << exn.what() << endl;
    cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
}
// Affiche :
2
1
Something bad happened: Empty stack
Trying to continue nonetheless
```

Throw-catch immédiat : ???

```
int pop() {
    try {
        if (level == 0)
            throw length_error("Empty stack");
    }
    catch (length_error e) {
        cerr << "Something bad happened: " << e.what() <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Ça vous va ?

Throw-catch immédiat : pas de sens

```
int pop() {
    try {
        if (level == 0)
            throw length_error("Empty stack");
    }
    catch (length_error e) {
        cerr << "Something bad happened: " << e.what() <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Équivalent

```
int pop() {
    if (level == 0) {
        cerr << "Something bad happened: Empty stack" <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Throw-catch immédiat : pas de sens

```
int pop() {
    try {
        if (level == 0)
            throw length_error("Empty stack");
    }
    catch (length_error e) {
        cerr << "Something bad happened: " << e.what() <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Programmation inutilement lourde

Équivalent

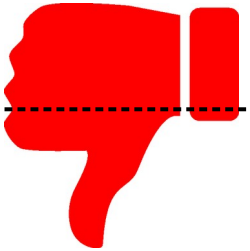
```
int pop() {
    if (level == 0) {
        cerr << "Something bad happened: Empty stack" <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Throw-catch immédiat : pas de sens

```
int pop() {
    try {
        if (level == 0)
            throw length_error("Empty stack");
    }
    catch (length_error e) {
        cerr << "Something bad happened: " << e.what() <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

Programmation inutilement lourde

Équivalent

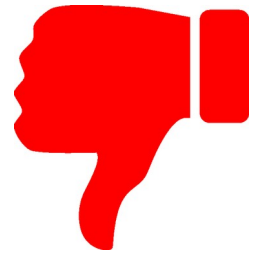


```
int pop() {
    if (level == 0) {
        cerr << "Something bad happened: Empty stack" <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```

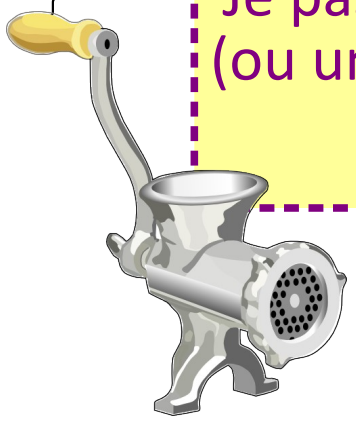
Peu/pas sûr, peu/pas exploitable

Throw-catch immédiat : pas de sens

```
int pop() {
    try {
        if (level == 0)
            throw length_error("Empty stack");
    }
    catch (length_error e) {
        cerr << "Something bad happened: " << e.what() <<endl;
        cerr << "Trying to continue nonetheless" << endl;
        return 0;
    }
    return v[--level];
}
```



Je passe à la moulinette ceux qui me répondront ça (ou un équivalent comme : try { v.at(level) } catch ...) dans l'exercice (TP) à la fin du cours !!!



Oui, il faut lancer une exception, mais qui devra être attrapée (ou non) **dans l'appelant**

Retour à la pile : Implémentation plus simple, plus robuste

Rappel

```
class stack {
    vector<int> v; // Pour pouvoir agrandir la taille facilement
    int level;
public:
    stack() : v(20), level(0) {}
// Pas de destructeur explicite: v détruit automatiquement quand stack détruit
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(int i) {
        if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
        v[level++] = i;
    }
    int pop() {
        if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
        return v[--level];
    }
};
```

Comment améliorer encore ? (fonctionnellement)

Paramétrage, valeurs par défaut

```
template <typename T> // Pile d'objets de type quelconque
class stack {
    vector<T> v;
    int level;
public:
    stack(int size = 20) : v(size), level(0) {}
// Création possible avec taille initiale quelconque, pas juste 20 par défaut
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(T x) {
        if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
        v[level++] = x;
    }
    T pop() {
        if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
        return v[--level];
    }
};
```

Teaser : templates

Paramétrage, valeurs par défaut

```
template <typename T> // Pile d'objets de type quelconque
class stack {
    vector<T> v;
    int level;
public:
    stack(int size = 20) : v(size), level(0) {}
// Création possible avec taille initiale quelconque, pas juste 20 par défaut
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(T x) {
        if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
        v[level++] = x;
    }
    T pop() {
        if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
        return v[--level];
    }
};
```

Comment améliorer encore ?

Paramétrage, valeurs par défaut

```
template <typename T, int initSize = 20, int resizeStep = 10>
class stack {
    vector<T> v;// Pas de retaillage resizeStep paramétré statiquement
    int level;
public:
    stack(int size = initSize) : v(size), level(0) {}
  // Taille initiale statique, mais taille quelconque possible dynamiquement
    bool isEmpty() const { return level == 0; }
    void push(T x) {
        if (level == v.size()) v.resize(v.size()+resizeStep);
        v[level++] = x;
    }
    T pop() {
        if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
        return v[--level];
    }
};
```

Templates (= patrons) pour des structures de données paramétrées

- Arguments
  - type des données élémentaires
  - valeurs codées en dur
  - valeurs par défaut
    - pour cas courants sans besoin d'optimisation particuliers
  - ex. taille des conteneurs
    - tailles initiales, paramètres d'adaptation

      → impact sur le temps d'exécution, pas sur les résultats
- Spécialisations éventuelles
  - ex. vecteur de bool stockés de manière dense

Spécialisation de template en C++

- Définition générique

```
template <typename T> class vector {
    T* vec_data;     // Tableau pour stocker les éléments
    int vec_size;    // Taille du tableau (variable)
    int length; …    // Nombre d'éléments dans le vecteur
```

  - vector<bool> v(100) : 100 mots mémoire de 64 (ou 32) bits

- Définition spécifique (=spécialisée pour un type donné)

```
template <> class vector<bool> {
    unsigned int *vec_data; // Tableau de bits
    int vec_size;           // Taille du tableau
    int length; …           // Nombre de bits
```

  - vector<bool> v(100) : 2 (ou 4) mots mémoire

Type abstrait : données + opérations + encapsulation

- Principe de l'encapsulation (information hiding)
  - interface : opaque, minimale
    - déclaration uniquement de ce qui a besoin d'être public
  - implémentation : complexe, optimisée...
    - organisation en mémoire et traitements
- Avantages
  - implémentation modifiable sans impact sur reste du code
    - ex. remplacement facile de tableau par vector dans stack
  - ni réécriture, ni même recompilation suivant les langages
    - inutile en Java , parfois nécessaire en C++
  - confidentialité : propriété intellectuelle, sécurité...

Type abstrait : données + opérations + encapsulation

en C++

- Principe de l'encapsulation (information hiding)
  - interface : opaque, minimale
    - déclaration uniquement de ce qui a besoin d'être public
  - implémentation : complexe, optimisée...
    - organisation en mémoire et traitements

fichier .h (public)

fichier .cpp (caché)

- Avantages
  - implémentation modifiable sans impact sur reste du code
    - ex. remplacement facile de tableau par vector dans stack
  - ni réécriture, ni même recompilation suivant les langages
    - inutile en Java , parfois nécessaire en C++
  - confidentialité : propriété intellectuelle, sécurité...

Interface : intstack.h

```
class intstack {
private:
    std::vector<int> v;
    int level;
public:
    stack(int size = 20);
    bool isEmpty() const;
    void push(int x);
    int pop();
};
```

**Idéalement à cacher complètement,
mais pas facile à masquer en C++.
Au moins, c'est inaccessible par le programmeur.**

Partie **visible**
pour les utilisateurs
de la structure de données

Implémentation : intstack.cpp

```
stack::stack(int size) : v(size), level(0) {}

bool stack::isEmpty() const { return level == 0; }

void stack::push(int x)
{
    if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
    v[level++] = x;
}

int stack::pop()
{
    if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
    return v[--level];
}
```

Partie **invisible** pour les utilisateurs de la structure de données

Interface : stack.h

```
template <typename T>
class stack {
private:
    vector<T> v;
    int level;
public:
    stack(int size = 20);
    bool isEmpty() const;
    void push(T x);
    T pop();
};
```

**Idéalement à cacher complètement,
mais pas facile à masquer en C++.
Au moins, c'est inaccessible par le programmeur.**

Partie visible
pour les utilisateurs
de la structure de données

Implémentation : stack.h aussi ! (à cause des templates)

```
template <typename T>
stack<T>::stack(int size) : v(size), level(0) {}

template <typename T>
bool stack<T>::isEmpty() const { return level == 0; }

template <typename T>
void stack<T>::push(T x) {
    if (level == v.size()) v.resize(v.size()+10);
    v[level++] = x;
}

template <typename T>
T stack<T>::pop() {
    if (level == 0) throw length_error("Empty stack");
    return v[--level];
}
```

Partie **malheureusement visible** pour les utilisateurs de la structure de données

Le code du template doit rester disponible/visible car il est regénéré à chaque instance du template

Compilation séparée

- Éviter de recompiler tous les fichiers à chaque modification mineure
  - pratique pour les petits projets
  - **indispensable** pour les projets moyens ou gros
- Makefile (derrière CMake)
  - expression des dépendances entre fichiers
  - pas de recompilation si un fichier indépendant est modifié
- Problème
  - réduire les dépendances au minimum

Compilation séparée avec des templates

- Déclaration de cas d'utilisation courants → précompil.
  - ex. fichier stackUsage.cpp

```
#include "stack.h"
template class stack<int>;
template class stack< stack<int> >;
```

- Usage dans un programme
  - ex. fichier main.cpp

```
#include "stack.h"
stack<int> s;
```

Pas beau mais mieux que rien

- Compilation séparée
  - fichiers : stack.h, stack.cpp, stakeUsage.cpp, main.cpp
  - stack<int> pas recompilé si seulement main.cpp est modifié

Type abstrait en C++

- Principe de l'encapsulation (information hiding)
  - interface : opaque, minimale
    - déclaration uniquement de ce qui a besoin d'être public
  - implémentation : complexe, optimisée
    - organisation en mémoire et traitements
- Avantages (**excepté si templates !**)
  - modification de l'implémentation sans impact sur le reste du code
  - confidentialité
- Mais templates très courants... ☹

fichier .h (public)

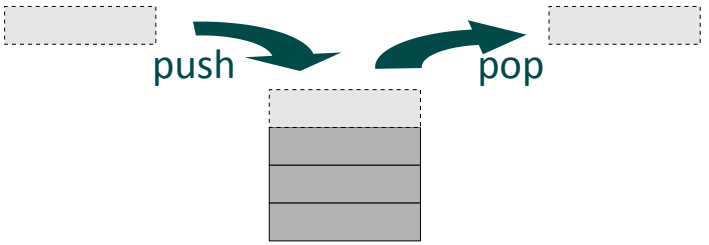
fichier .cpp (caché)
ou fichier .h si template

C++ est très mauvais pour définir des types abstraits (comparer à Objective C, Java...)

Il n'y a pas **une** vérité : il existe toujours **des** variantes

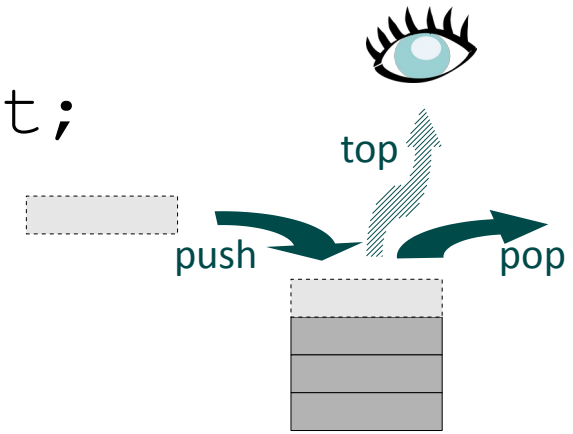
- Exemple de pile 1 :

```
bool isEmpty() const;
void push(T x);
T pop();
```



- Exemple de pile 2 :

```
bool isEmpty() const;
void push(T x);
T top() const;
void pop();
```



Exemple d'implémentation (encore plus simple)

```
template <typename T>
class stack {
    vector<T> v;
public:
    bool isEmpty() const { v.empty(); }
    void push(T x) { v.push_back(x); }
    T    top() const { return v.back(); }
    void pop() { v.pop_back(); }
};
```

// Attention !, pas de signalement d'erreur avec vector::back() ni vector.pop_back()

Exemple d'implémentation (il n'y a pas plus simple !)

```
#include <stack>
```

// Attention !, pas de signalement d'erreur avec stack::top() ni stack::pop()

Moralité

- Chercher d'abord si la structure de données est prédéfinie dans une bibliothèque (ex. STL...)
  - **99% de chance qu'une bibliothèque existe déjà pour vos besoins !**
- Attention : lire la documentation associée
  - **il existe différentes implémentations d'une même fonctionnalité**
    - efficacité, facilité d'utilisation, portage, gestion d'erreur...
    - ex. overflow et underflow généralement non signalées par la STL
      sauf pour certaines fonctions, ex. `v.at(i)` plutôt que `v[i]`
- Si implémentation par soi-même nécessaire
  - faire une **interface minimale** (puis étendre selon besoins)
  - concevoir la **gestion d'erreur** et la **documenter**