Les exceptions

MU4IN501 – DLP : Développement d'un langage de programmation
Master STL, Sorbonne Université

Antoine Miné

Année 2020–2021

Cours 6
3 novembre 2020

Plan général

Développement d'un langage de programmation :
interprète et compilateur.

Par étapes, avec ajout progressif de fonctionnalités.

- **ILP1** : langage de base

  constantes (entiers, flottants, booléens, chaînes),
  opérateurs ($+$, $-$, $\times$, ...),
  appels de primitives (`print`, ...),
  blocs locaux (`let x = ... in ...`),
  alternatives (`if ... then ... else`)

- **ILP2** : ajout des boucles, affectations, fonctions globales
- **ILP3** : ajout des exceptions et fonctions de première classe
- **ILP4** : ajout des classes et des objets

Plan du cours

Ce cours : les exceptions dans ILP3.

Sur le site GitLab, projet `DLP-2020oct / ILP3`, à *fork*er pour le TME 7.

- Les exceptions : rappels et généralités
- Revoir les étapes pour étendre ILP (utile en TME !)
  - Extension de la syntaxe (grammaire, AST)
  - Extension de l'interprète (évaluation directe en Java)
  - Extension du compilateur (génération du C)
  - Extension de la bibliothèque d'exécution (exécution du C)
- Introduire les constructions de contrôle non-locales (au delà du `return`)
- (Re)voir la notion de pile d'appel
- Ajouter des exceptions à un langage qui ne le supporte pas (C)
- Maîtriser `setjmp` et `longjmp` en C

Erreurs et exceptions

Un langage sans exception : le C

Comment gérer les erreurs en C ?

Pas de mécanisme dédié, pas de règle dans le langage,
mais des conventions de bibliothèques :

- Valeur de retour spéciale : `-1` (e.g., `open`), `NULL` (e.g., `malloc`).
  Peu pratique quand toutes les valeurs du type de retour sont déjà utilisées.
- Cas spécial dans les flottants : valeur *Not a Number*, avec des règles de propagation
- Variable contenant un code d'erreur : `errno`.
  Utilisée en combinaison avec une valeur de retour spéciale, pour préciser l'erreur.
- Fonction retournant un code d'erreur : `glGetError()`.
  En théorie, permet une gestion asynchrone des erreurs.

Dans tous les cas : il faut écrire du code pour vérifier la présence d'erreur !
$\Longrightarrow$ coûteux en temps de programmation, et il est facile de se tromper.

Attention à ne pas confondre une valeur « normale » et une valeur d'erreur,
gare aux accès à un pointeur `NULL` après un `malloc` !

Exemples de code C avec gestion des erreurs

lire deux entiers dans un fichier

```
int f = open(name,O_RDONLY);
if (f < 0)                { /* gestion d'erreur ! */ }
if (read(f,&x,4) != 4)    { /* gestion d'erreur ! */ }
if (read(f,&y,4) != 4)    { /* gestion d'erreur ! */ }
if (close(f) < 0)         { /* gestion d'erreur ! */ }
```

fonction "read" sûre

```
int safe_read(int f, char* buf, ssize_t size)
{
    while (size > 0)
    {
        ssize_t r = read(file, buf, size);
        if (r == 0) return 0; // erreur : fichier trop court
        if (r < 0)
        {
            if (errno == EINTR) continue; // pas une erreur ici
            return 0; // là, c'est une erreur
        }
        buf += r; size -= r;
    }
    return 1; // OK !
}
```

Gestion des erreurs avec exceptions, en Java

lecture de fichier en Java

```
try
{
    FileReader r = new FileReader("toto");
    BufferedReader br = new BufferedReader(r);
    String s = br.readLine();
    br.close();
}
catch (IOException e)
{
    /* toutes les erreurs de fichier */
}
```

En cas d'erreur de fichier dans le bloc `try`, les instructions suivantes du bloc sont sautées et le programme commence à exécuter le bloc `catch`.

En l'absence d'erreur, le bloc `catch` n'est pas exécuté.

- les exceptions rompent le flot d'exécution normal du programme ;
- inversion des responsabilités : inutile de tester l'absence d'erreur ; c'est la présence d'une erreur qui est signalée ;
- permet de factoriser le code de gestion des erreurs.

Créer des exceptions

Il est possible de signaler soi-même des exceptions :

```
throw new UnsupportedOperationException("Not implemented yet...")
```

En Java, les exceptions sont des objets d'une classe descendant de `Throwable` ou d'une de ses nombreuses sous-classes.

Il est facile de définir ses propres classes d'exception :

```
public class MyException extends Exception
{
    protected Object data;
    public MyException (String message, Object data)
    { super(message); this.data = data; }
}
```

Le filtrage des exceptions permet de ne capturer que les exceptions qui nous intéressent :

```
catch (MyException | MyOtherException e) ...
```

Typage et exceptions

exemple de clause throws

```
public void f() throws MyException;

public void g() throws MyException
{
    f(); // MyException peut échapper de g
}

public void h() /* rien */ {
    try
    { f(); }
    catch (MyException m)
    { /* MyException n'échapera pas de h */ }
}
```

En Java, les méthodes doivent déclarer avec `throws`
la liste des exceptions que leur appel peut signaler.

- `g` : une exception signalée par `f` peut échapper → il faut le déclarer ;
- `h` : les exceptions de `f` sont traitées → pas besoin de `throws`.

Le compilateur Java vérifie que toutes les exceptions sont bien rattrapées.
Cela évite d'oublier des cas d'erreur !

RunTimeExceptions en Java

Toutes les exceptions ?

Non, pas les exceptions dérivant de `RuntimeException` :

- `ArithmeticException` : division par zéro, etc.
- `ArrayStoreException` :
  erreur de typage lors d'une écriture dans un tableau ;
- `ClassCastException` : erreur de conversion d'objet
- ...

Ces exceptions peuvent être signalées « dans le cours normal de l'exécution de la JVM ».
Elles n'ont pas besoin d'être déclarées par `throws`.
intuitivement : elles peuvent être signalées par toute méthode

Leur bonne gestion n'est pas vérifiée par le compilateur :
pas d'erreur de compilation si elles ne sont pas rattrapées.

try-finally

exemple de finally

```
BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(path));
try
{
    return br.readLine();
}
catch (IOException e)
{
    System.out.println("erreur !");
}
finally
{
    if (br != null) br.close();
}
```

Le bloc `finally` est toujours exécuté, même en cas d'exception :

- cas sans exception : `finally` est exécuté après le bloc `try` ;
- cas exception rattrapée dans le `catch` : `finally` est exécuté à la fin du bloc `catch` correspondant ;
- cas exception non rattrapée dans le `catch` : le bloc `finally` est exécuté, et l'exception est relancée à la fin du bloc `finally`.

$\Longrightarrow$ très utile pour gérer proprement les resources.

Les limites des exceptions (1/2)

Premier vol du lanceur Ariane 5, 4 juin 1996

Le logiciel est programmé en Ada, langage très sûr, avec des exceptions.

Les limites des exceptions (2/2)

Premier vol du lanceur Ariane 5, 4 juin 1996
40 secondes plus tard. . .

Un dépassement de capacité dans une conversion de flottant 64-bit
en entier 16-bit génère une exception.

L'exception n'est pas rattrapée, le calculateur s'arrête.
Il y a redondance, mais les autres calculateurs exécutent le même programme.
Tous les calculateurs s'arrêtent.

La fusée s'autodétruit !

L'erreur qui valait un milliard

Tony Hoare, prix Turing 1980, inventeur de Quicksort, écrit en 2009 :

> *I call it my billion-dollar mistake. It was the invention of the null reference in 1965. At that time, I was designing the first comprehensive type system for references in an object oriented language (ALGOL W). My goal was to ensure that all use of references should be absolutely safe, with checking performed automatically by the compiler. But I couldn't resist the temptation to put in a null reference, simply because it was so easy to implement. This has led to innumerable errors, vulnerabilities, and system crashes, which have probably caused a billion dollars of pain and damage in the last forty years.*

Ce défaut de conception est repris dans Java. (comparer au langage ML)

`NullPointerException` est une `RunTimeException`,
elle échappe donc aux règles de typage de Java.
Il faut se contenter d'annotations, souvent purement décoratives : `@NonNull`.

Tony Hoare est aussi un des pionniers des méthodes formelles, permettant la vérification des logiciels !

Les exceptions dans ILP

ILP3 supporte la construction :

```
try
(
    throw("Help!");
)
catch (e)
(
    /* expression, e est utilisable ici */
)
finally
(
    /* expression */
)
```

ILP étant un langage dynamique, non typé statiquement :

- `throw` peut utiliser toute valeur comme exception ;
- `catch` intercepte toutes les exceptions (pas de filtrage) ;
- inutile de déclarer quelles exceptions peuvent échapper d'une fonction.

Note : ILP est un langage à expressions ; nous utilisons donc les parenthèses pour les blocs (à la ML) au lieu des accolades (à la Java).

Flot de contrôle (1/3)

Problème principal : quelle est la prochaine instruction exécutée ?

Où « saute-t-on » après un `throw` ?
Où « saute-t-on » après la fin d'un bloc `catch` ?
Où « saute-t-on » après la fin d'un bloc `finally` ?

```
try
(
    throw(1);
    print(2);
)
catch(e)
(
    print(e);
)
finally
(
    print(3);
)
```

Résultat : 1 3.

```
try
(
    try
    (
        throw(1);
        print(2);
    )
    finally
    (
        print(3);
    )
    print(4);
)
catch (e)
(
    print(e);
)
```

Résultat : 3 1.

Flot de contrôle (2/3)

```
try
(
    try
    (
        throw(1);
        print(2);
    )
    catch (e)
    (
        throw(10*e);
        print(3);
    )
    print(4);
)
catch (e)
(
    print(e);
)
```

Résultat : 10.

```
try
(
    try
    (
        throw(1);
        print(2);
    )
    catch (e)
    (
        throw(10*e);
        print(3);
    )
    finally
    (
        throw(111);
    )
    print(4);
)
catch (e)
(
    print(e);
)
```

Résultat : 111.

- `throw` dans un `catch`
- `throw` dans un `finally` : une exception peut en masquer une autre

Flot de contrôle (3/3)

exemple

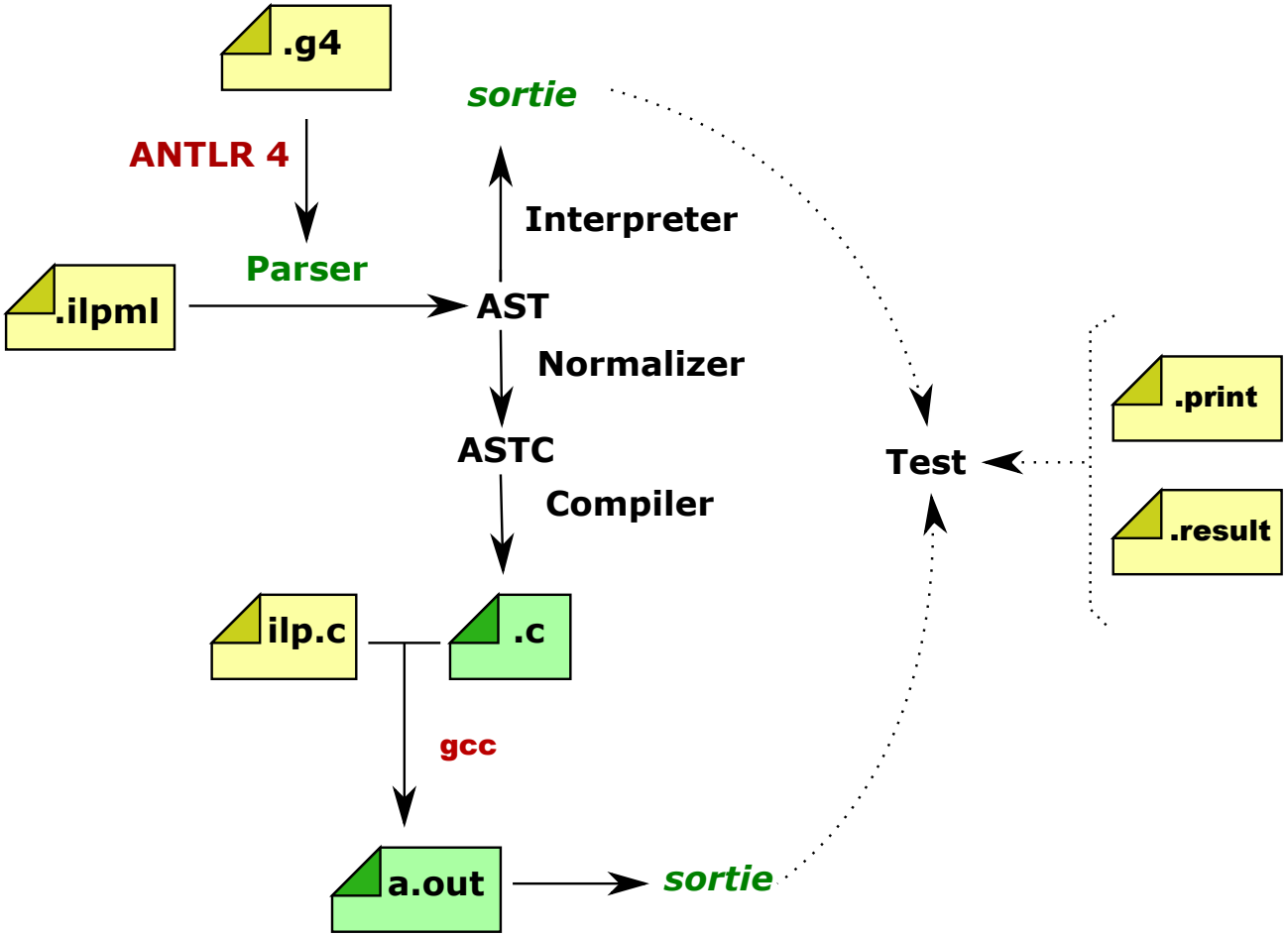
```
function f(x)
(
    if x < 0 then throw("Erreur");
    x + 1;
);

function g(y) (
    try
    (
        f(y);
    )
    catch (e) ()
);

try
(
    g(v);
    f(u);
)
catch (e) ()
```

Exceptions et appels de fonctions :

le gestionnaire d'exception ne peut pas être déterminé statiquement,
il dépend de la pile des appels → c'est une information **dynamique**.

Rappels : extension d'ILP

Structure d'ILP



Rappel : étapes d'une extension

Extension de la syntaxe :

- écrire une grammaire ANTLR 4
- ajouter des nœuds `IAST`, `AST`, `ASTC`, et leurs fabriques ;
- écrire un *Listener* obéissant à l'interface produite par ANTLR.

Extension de la base de tests (`.ilpml`, `.result`, `.print`).

Extension des visiteurs : `IASTvisitor` :

- classes `Interpreter`, `Normalizer`, `Compiler`.

Extension des primitives et opérateurs de l'interprète.

Extension de la bibliothèque d'exécution C :

- type `ILP_Object` dans `ilp.h` ;
- primitives dans `ilp.c`.

Extension des classes de test `InterpreterTest` et `CompilerTest`.

Configuration de l'intégration continue (`.gitlab-ci.yml`), *commit*, *push*, *tag*.

Ces étapes ne sont pas toutes nécessaires pour chaque extension !

Rappel : règles de programmation pour les extensions

En Java :

- **pas de modification du code existant** ;
- nouvelles classes dans des « packages » séparés `com.paracamplus.ilp3...` ;
- réutilisation par héritage ;
- motifs visiteur et composite facilitant l'extensibilité.

En ANTLR 4 :

- difficile d'hériter d'une grammaire `.g4` pour y ajouter des règles ;
- si la grammaire change, la classe *Listener* ne peut pas être réutilisée ;
  (ANTLR génère une nouvelle interface *Listener* sans lien d'héritage avec l'ancienne)

$\Longrightarrow$ copie nécessaire, puis modification de la grammaire et du *Listener*.

En C :

- `ilp.c` et `ilp.h` implantent déjà tout ILP1 à ILP4...
- déclarer et définir les fonctions dans des `.c` et `.h` séparés, si possible ;
- difficile d'étendre un type `struct`
  $\Longrightarrow$ autorisation de modifier (une copie de) `ilp.h` en TME.

Syntaxe des exceptions

Syntaxe concrète

ILPMLgrammar3.g4

```
grammar ILPMLgrammar3;

@header { package antlr4; }

expr returns [com.paracamplus.ilp1.interfaces.IASTexpression node]
    : ...
    | 'try' body = expr
      ( 'catch' '(' var = IDENT  ')' catcher = expr )?
      ( 'finally' finallyer = expr )?                          # Try
    | ...
```

Clause d'expression `try` avec :

- une clause `catch` optionnelle ;
- une clause `finally` optionnelle.

Le `catch` a un argument « nom de variable », c'est un lieur.

comme une variable de bloc ou un argument formel de fonction

Pas de syntaxe spéciale pour `throw` : ce sera une primitive.
Le nœud AST `Invocation` sera donc utilisé, comme pour `print`.

Arbre syntaxique : interface `IASTtry`

IASTtry.java

```
package com.paracamplus.ilp3.interfaces;
public interface IASTtry extends IASTinstruction
{
    IASTexpression getBody ();
    @OrNull IASTlambda getCatcher ();
    @OrNull IASTexpression getFinallyer ();
}
```

- Simple miroir de la grammaire `try...catch...finally ...`
- `com.paracamplus.ilp3.ast.ASTtry` sera un simple conteneur :
  - champs `private` constants pour `body`, `catcher`, `finallyer` ;
  - constructeur `public ASTtry(IASTexpression body, IASTlambda catcher, IASTexpression finallyer)` ;
  - accesseurs `getBody`, etc. (suivant l'interface) ;
  - visiteur `ilp1` avec *cast* en `ilp3`.
    (nous y reviendrons dans quelques transparents)
- `@OrNull` : annotation indiquant que le résultat peut être `NULL`

  informative : c'est une discipline de programmation car Java autorise en fait `NULL` partout, même si c'est dangereux

Arbre syntaxique : interface IASTlambda

IASTlambda.java

```
package com.paracamplus.ilp3.interfaces;
public interface IASTlambda extends IASTexpression {

    IASTvariable[] getVariables();
    IASTexpression getBody();
}
```

- En première approximation, un conteneur pour :
  - un ensemble de variables locales ;
  - une expression utilisant ces variables locales.
- Cette semaine, pour notre utilisation dans IASTtry :
  - getVariables est la variable d'exception (tableau de taille 1) ;
  - getBody est le gestionnaire d'exception utilisant la variable.
- La séance prochaine : utilisation de IASTlambda pour implanter des fonctions de première classe.

À faire également : étendre les fabriques IASTFactory, ASTFactory.

Interprétation des exceptions

Principe d'interprétation

L'interprète est écrit en Java, qui a des exceptions.
Nous en profitons !

- Une exception ILP est implantée par une exception Java.
- `try`, `catch`, `finally` d'ILP sont implantés avec `try`, `catch`, `finally` de Java.

Attention cependant, deux sources d'exceptions :

- les exceptions lancées par l'interprétation de `throw` d'ILP, lancées par un programme ILP et contenant une valeur ILP (entier, chaîne, etc.) ;
- les exceptions en cas d'erreur Java dans l'interprète par la faute du programme ILP (exemple : division par zéro) ou à cause d'un bug dans l'interprète.

Quizz :
un programme ILP peut-il capturer une exception Java de l'interprète ?

Rappel : ajout d'une primitive à l'interprète

Créer une classe `Throw` :

Throw.java (schéma)

```
package com.paracamplus.ilp3.interpreter.primitive;
public class Throw extends UnaryPrimitive
{
    public Throw () { super("throw"); }

    public Object apply (Object value) throws ThrownException {
        // transparent suivant
    }
}
```

et enregistrer la primitive dans `GlobalVariableStuff`.
(dans `com.paracamplus.ilp3.interpreter`, pas `compiler` !)

GlobalVariableStuff.fillGlobalVariables

```
env.addGlobalVariableValue(new Throw());
```

Évaluation de throw

Throw.java (implantation)

```
public class Throw extends UnaryPrimitive
{
    ...
    public Object apply(Object value) throws ThrownException {
        ThrownException exc = new ThrownException(value);
        throw exc;
    }

    public static class ThrownException extends EvaluationException
    {
        private final Object value;
        public ThrownException (Object value) {
            super("Throwing value");
            this.value = value;
        }
        public Object getThrownValue () { return value; }
    }
}
```

La classe `ThrownException` des exceptions ILP est une classe interne à `Throw` ; elle stocke la valeur ILP originale de l'exception (`value`) et l'encapsule dans une exception compatible avec `EvaluationException`.

Extension du visiteur d'interprétation (1/4)

Nouvelle interface visiteur :

IASTvisitor.java

```
package com.paracamplus.ilp3.interfaces;

public interface IASTvisitor<Result, Data, Anomaly extends Throwable>
extends com.paracamplus.ilp2.interfaces.IASTvisitor<Result, Data, Anomaly>
{
    Result visit(IASTtry iast, Data data) throws Anomaly;
    // ...
}
```

Ajout du support pour visiter les nœuds `IASTtry`.

Extension du visiteur d'interprétation (2/4)

ASTtry.java

```
package com.paracamplus.ilp3.ast;
import com.paracamplus.ilp3.interfaces.IASTvisitor;

public class ASTtry extends ASTinstruction
implements IASTtry, IASTvisitable
{
    public <...> Result accept(
        com.paracamplus.ilp1.interfaces.IASTvisitor<...> visitor,
        Data data) throws Anomaly
    {
        return (( IASTvisitor<...>) visitor).visit(this, data);
    }
}
```

- l'argument `visitor` de `accept` doit avoir un type visiteur ILP1
  pour que `ASTtry` implante `IASTvisitable`, programmé dans ILP1
- mais contenir un visiteur ILP3
  pour avoir une méthode `visit(IASTtry)`, nécessaire à visiter un AST ILP3

$\Longrightarrow$ une conversion du type de `visitor` est nécessaire !

Quizz : une `ClassCastException` est-elle possible ?

Extension du visiteur d'interprétation (3/4)

Interpreter.java (début)

```
public Object visit(IASTtry iast, ILexicalEnvironment lexenv)
throws EvaluationException
{
    Object result = Boolean.FALSE;
    IFunction fcatcher = null;
    IASTlambda catcher = iast.getCatcher();
    if (null != catcher) fcatcher = (IFunction) catcher.accept(this, lexenv);
    try
    {
        result = iast.getBody().accept(this, lexenv);
    }
    catch (ThrownException exc)
    {
        if ( null != fcatcher )
        {
            Object value = exc.getThrownValue();
            fcatcher.apply(this, new Object[]{ value });
        }
        else { throw exc; }
    }
    ...
```

Note : `catcher.accept` revoie un objet `IFunction` qui, en s'évaluant avec `apply`, lance l'interprétation du corps du gestionnaire d'erreur.

Cf. fonctions globales de la semaine dernière.

Extension du visiteur d'interprétation (4/4)

Interpreter.java (fin)

```
    ...
    catch (EvaluationException exc)
    {
        if ( null != fcatcher ) {
            fcatcher.apply(this, new Object[]{ exc });
        }
        else { throw exc; }
    }
    catch (Exception exc)
    {
        if ( null != fcatcher ) {
            EvaluationException e = new EvaluationException(exc);
            fcatcher.apply(this, new Object[]{ e });
        }
        else { throw exc; }
    }
    finally
    {
        IASTexpression finallyer = iast.getFinallyer();
        if ( null != finallyer ) {
            finallyer.accept(this, lexenv);
        }
    }
    return result;
}
```

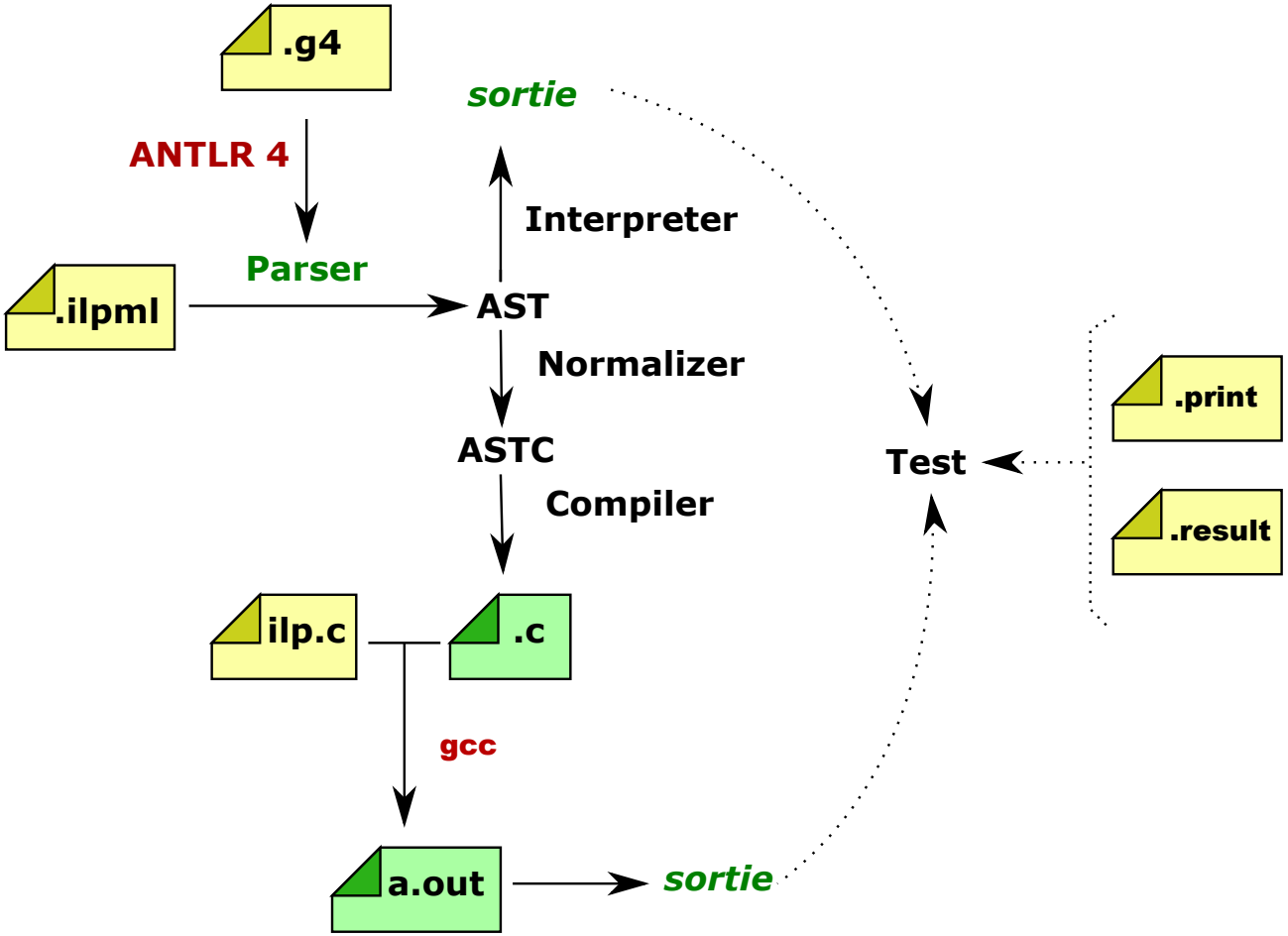
Rappel : extension de la classe de test

InterpreterTest.java

```
package com.paracamplus.ilp3.interpreter.test;
@RunWith(Parameterized.class) public class InterpreterTest
extends com.paracamplus.ilp2.interpreter.test.InterpreterTest {

    protected static String[] samplesDirName = { "SamplesILP3", "SamplesILP2", ... };

    public InterpreterTest(final File file) { super(file); }

    public void configureRunner(InterpreterRunner run) throws EvaluationException {
        IASTfactory factory = new ASTfactory();
        run.setILPMLParser(new ILPMLParser(factory));
        // ...
        StringWriter stdout = new StringWriter();
        run.setStdout(stdout);
        IGlobalVariableEnvironment gve = new GlobalVariableEnvironment();
        GlobalVariableStuff.fillGlobalVariables(gve, stdout);
        IOperatorEnvironment oe = new OperatorEnvironment();
        OperatorStuff.fillUnaryOperators(oe);
        OperatorStuff.fillBinaryOperators(oe);
        Interpreter interpreter = new Interpreter(gve, oe);
        run.setInterpreter(interpreter);
    }

    @Parameters(name = "0") public static Collection<File[]> data() throws Exception
    { return InterpreterRunner.getFileList(samplesDirName, pattern); }
}
```

Compilation des exceptions

Rappel : structure d'ILP



Rappel : normalisation de l'AST

Le compilateur commence par transformer l'AST en ASTC.
Différence essentielle entre AST et ASTC : l'encodage des variables.

Note : il existe trois notions d'égalité entre variables :

- elles ont le même nom, ou
- elles représentent la même variable dans le programme ILP, ou
- elles sont représentées par le même nœud AST : `==` en Java.

Différence entre AST et ASTC :

- deux nœuds ASTvariable `!=` peuvent représenter la même variable ou des variables différentes (même si elles ont le même nom) ;
- deux nœuds ASTCvariable `!=` représentent des variables différentes.

Exemple : `let x = 2 in (let x = 3 in x + 1) * x`

$\Longrightarrow$ ASTC facilite la manipulation d'ensembles de variables et d'environnements
e.g., utilisation de `Set<IASTClocalVariable>` dans `FreeVariableCollector`.

Normalisation des exceptions (1/3)

La classe `Normalizer` se charge de transformer l'AST en ASTC :

- parcours récursif de l'AST avec un visiteur ;
- reconstruction d'un nœud après avoir visité les sous-nœuds ;
- maintient de l'environment : nom de variable $\rightarrow$ `IASTCvariable` dans la classe `INormalizationEnvironment` ;
- la normalisation résout donc la portée lexicale des variables !

Ajouts nécessaires pour le support des exceptions :

- pas de `ASTCtry`, nous réutilisons `ASTtry`,
  mais il faut quand même normaliser les sous-expressions du nœud puis reconstruire le nœud `ASTtry` ;
- `ASTlambda` transformé en `ASTClambda`,
  et mise à jour de l'environnement avec les variables introduites par le nœud.

  `ASTlambda` est un lieur : il introduit des variables et une portée lexicale.

Normalisation des exceptions (2/3)

Normalizer.java (début)

```
package com.paracamplus.ilp3.compiler.normalizer;
public IASTexpression visit(IASTtry iast, INormalizationEnvironment env)
throws CompilationException
{
    IASTexpression newbody = iast.getBody().accept(this, env);
    IASTlambda newcatcher = null;
    IASTlambda catcher = iast.getCatcher();
    if ( catcher != null ) {
        newcatcher = (IASTlambda) catcher.accept(this, env);
    }
    IASTexpression newfinallyer = null;
    IASTexpression finallyer = iast.getFinallyer();
    if ( finallyer != null ) {
        newfinallyer = finallyer.accept(this, env);
    }
    return ((INormalizationFactory)factory).
           newTry(newbody, newcatcher, newfinallyer);
}
```

Normalisation des exceptions (3/3)

Normalizer.java (fin)

```
public IASTexpression visit(IASTlambda iast, INormalizationEnvironment env)
throws CompilationException
{
    IASTvariable[] variables = iast.getVariables();
    IASTvariable[] newvariables = new IASTvariable[variables.length];
    INormalizationEnvironment newenv = env;
    for (int i=0; i<variables.length; i++) {
        IASTvariable variable = variables[i];
        IASTvariable newvariable =
            factory.newLocalVariable(variable.getName());
        newvariables[i] = newvariable;
        newenv = newenv.extend(variable, newvariable);
    }
    IASTexpression newbody = iast.getBody().accept(this, newenv);
    return ((INormalizationFactory)factory).
           newLambda(newvariables, newbody);
}
```

Support pour les exceptions en C

Sauts longs en C

Motif de programmation :

setjmp.h

```
typedef ... jmp_buf;
int setjmp (jmp_buf env);
void longjmp (jmp_buf env, int val);
```

```
#include <setjmp.h>
jmp_buf buf;

if (setjmp(buf) == 0)
{
  // code
  longjmp(buf, 1);
  // non accessible
}
else
{
  // destination du longjmp
}
```

- établissement d'un point de restauration avec `setjmp` ;
- saut avec `longjmp` ;
- la valeur de retour de `setjmp` distingue l'établissement du point (0) de l'arrivée au point depuis `longjmp` ($\neq 0$).

Sauts longs en C : cas inter-procédural (1/2)

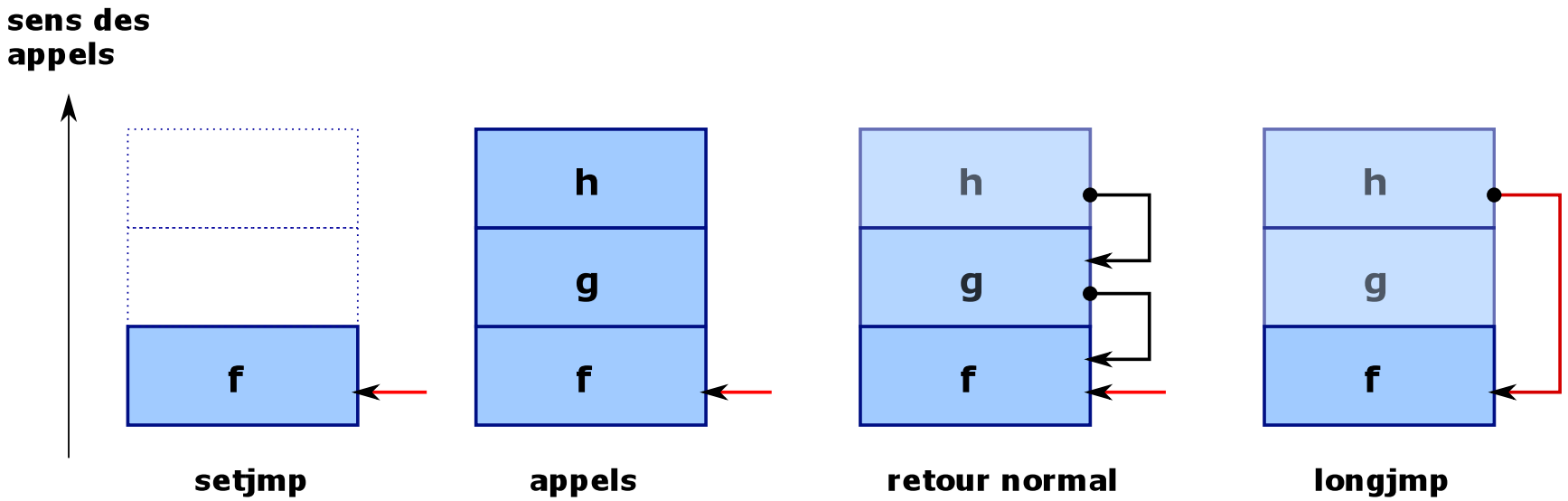
`longjmp` peut aussi traverser les appels de fonctions !

```
jmp_buf buf;

void f() {
  if (setjmp(buf) == 0) {
    g();
    // cas sans erreur (A)
  }
  else {
    // gestion de l'erreur (B)
  }
  // code commun (C)
}
```

```
void g() {
  h();
  // cas sans erreur (D)
}

void h() {
  if (erreur()) {
    longjmp(buf, 1);
  }
  // cas sans erreur (E)
}
```

- flot d'exécution sans erreur : E, D, A, C
- flot d'exécution avec erreur : B, C

Sauts longs en C : cas inter-procédural (2/2)



La pile d'appels

$\Longrightarrow$ parfait pour implanter les exceptions en C !

Complications

- Une valeur `IPL_Object`, à passer du `try` au `catch` ;

  or `longjmp` ne permet de passer qu'un entier
  et la valeur 0 est réservée

  $\Longrightarrow$ une variable globale, `ILP_current_exception`, s'en charge.

- Les blocs `try` peuvent être imbriqués ;

  nécessité de gérer plusieurs gestionnaires `jmp_buf` ;
  `throw` doit ensuite trouver le bon gestionnaire

  $\Longrightarrow$ une liste chaînée de `jmp_buf` est utilisée,
  pointée par la variable globale `ILP_current_catcher`.

  `try` empile / dépile les gestionnaires
  `throw` utilise la tête de liste (le gestionnaire le plus récent).

Motif de code C généré (1/3)

code généré (try)

```
{
    struct ILP_catcher *current_catcher = ILP_current_catcher;
    struct ILP_catcher new_catcher;
    if (0 == setjmp(new_catcher._jmp_buf)) {
       ILP_establish_catcher(&new_catcher);

       /* corps du try */

       ILP_current_exception = NULL;
    }
    ILP_reset_catcher(current_catcher);
    /* fin normale du bloc try, ou exception dans le bloc try */
```

- un bloc allouant un nouveau gestionnaire comme variable locale ;
- empilement du gestionnaire (`ILP_establish_catcher`) ;
- fin du bloc `try` sans exception : `ILP_current_exception` = NULL ;
- saut en fin de bloc `try` par `throw` : `ILP_current_exception` ≠ NULL ;
- dépilement du gestionnaire du `try` (`ILP_reset_catcher`).

Motif de code C généré (2/3)

code généré (catch)

```
if (NULL != ILP_current_exception) {
    if (0 == setjmp(new_catcher._jmp_buf)) {
        ILP_establish_catcher(&new_catcher);
        {
            ILP_Object exc2 = ILP_current_exception;
            ILP_current_exception = NULL;

            /* corps du catch */
         }
    }
    ILP_reset_catcher(current_catcher);
}
/* fin normale du bloc catch ou exception dans le bloc catch */
```

- valeur d'exception `exc2` fournie au corps du `catch` ;
- gestionnaire spécial : en cas d'exception dans le corps du `catch`, on sort du bloc en se souvenant de l'exception dans `ILP_current_exception` ;
- dépilement du gestionnaire du `catch` (`ILP_reset_catcher`).

Motif de code C généré (3/3)

code généré (finally)

```
    /* corps du finally */

    if ( NULL != ILP_current_exception ) {
         ILP_throw(ILP_current_exception);
     }
}
```

- exécution du bloc `finally` ;
- en cas d'exception dans le `catch`,
  l'exception est relancée après avoir executé le bloc `finally` ;
- en cas d'exception dans le bloc `finally`,
  c'est le gestionnaire englobant qui est utilisé.

Bibliothèque d'exécution (1/2)

ilp.h

```
struct ILP_catcher
{
     struct ILP_catcher *previous;
     jmp_buf _jmp_buf;
};

extern struct ILP_catcher *ILP_current_catcher;
extern ILP_Object ILP_current_exception;
```

ilp.c (début)

```
/** Install a new catcher. */
void ILP_establish_catcher (struct ILP_catcher *new_catcher)
{
     new_catcher->previous = ILP_current_catcher;
     ILP_current_catcher = new_catcher;
}

/** Reset an old catcher. */
void ILP_reset_catcher (struct ILP_catcher *catcher)
{
     ILP_current_catcher = catcher;
}
```

Bibliothèque d'exécution (2/2)

ilp.c (suite)

```
static struct ILP_catcher ILP_the_original_catcher = { NULL };

struct ILP_catcher *ILP_current_catcher =
    &ILP_the_original_catcher;

ILP_Object ILP_current_exception = NULL;

/** Raise exception. */
ILP_Object ILP_throw (ILP_Object exception)
{
     ILP_current_exception = exception;
     if ( ILP_current_catcher == &ILP_the_original_catcher )
     {
          ILP_die("No current catcher!");
     }
     longjmp(ILP_current_catcher->_jmp_buf, 1);
     /** UNREACHABLE */
     return ILP_die("longjmp botch");
}
```

Signaler des exceptions dans la bibliothèque d'exécution

ilp.c

```
ILP_Object ILP_domain_error(char *message, ILP_Object o)
{
    snprintf(ILP_the_exception._content.asException.message,
             ILP_EXCEPTION_BUFFER_LENGTH,
             "Domain error: %s\nCulprit: 0x%p\n",
             message, (void*) o);
    fprintf(stderr, "%s",
            ILP_the_exception._content.asException.message);
    ILP_the_exception._content.asException.culprit[0] = o;
    ILP_the_exception._content.asException.culprit[1] = NULL;
    return ILP_throw((ILP_Object) &ILP_the_exception);
}

ILP_Object ILP_make_modulo (ILP_Object o1, ILP_Object o2)
{
     if ( ILP_isInteger(o1) ) {
          /*...*/
     } else {
          return ILP_domain_error("Not an integer", o1);
     }
}
```

Retour sur le compilateur

Rappel : ajout d'une primitive au compilateur

La primitive à un argument `throw` correspond à la fonction `ILP_throw` de la bibliothèque d'exécution C.

Enregistrement nécessaire de la primitive dans `GlobalVariableStuff`
dans `com.paracamplus.ilp3.compiler`

GlobalVariableStuff.fillGlobalVariables

```
env.addGlobalFunctionValue(new Primitive("throw", "ILP_throw", 1));
```

Générateur de code C

Enrichissement du visiteur `Compiler`.

Compiler.java (début)

```
public Void visit(IASTtry iast, Context context)
throws CompilationException
{
    emit("{ struct ILP_catcher* current_catcher = "
         "ILP_current_catcher; \n");
    emit("  struct ILP_catcher new_catcher; \n");
    emit("  if ( 0 == setjmp(new_catcher._jmp_buf) ) { \n");
    emit("      ILP_establish_catcher(&new_catcher); \n");
    iast.getBody().accept(this, context);
    emit("      ILP_current_exception = NULL; \n");
    emit("  }; \n");
    /* suite omise ... */
```

lire le code par vous-même, rien de bien compliqué quand on a compris le motif de code généré

Point d'entrée (*main*) du C généré

code C généré (fixe)

```
static ILP_Object ilp_caught_program() {
    struct ILP_catcher *current_catcher = ILP_current_catcher;
    struct ILP_catcher new_catcher;
    if (0 == setjmp(new_catcher._jmp_buf)) {
        ILP_establish_catcher(&new_catcher);
        return ilp_program();
    }
    return ILP_current_exception;
}

int main(int argc, char *argv[]) {
    ILP_print(ilp_caught_program());
    ILP_newline();
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

Emballe le programme complet dans un gestionnaire d'exception global.

Cela permet au programme C de terminer normalement en cas d'exception non rattrapée (pas de `ILP_die`).

Résumé

Nous avons appris à :

- implanter le contrôle non-local en C, grâce à `setjmp`, `longjmp` ;
- gérer des gestionnaires d'exception imbriqués grâce à une liste.

Nous avons ajouté du code au compilateur et à la bibliothèque d'exécution sans modifier ce qui existe déjà.
Les exceptions sont donc indépendantes du reste du langage.

Bien comprendre la distinction entre statique et dynamique :

- ce qui est fixé à la compilation est statique ;
- ce qui nécessite du travail à l'exécution est dynamique ;

donc :

- la portée lexicale (quelle variable est visible) est statique ;
- la durée de vie des variables est dynamique ;
- quel gestionnaire d'exception est utilisé est dynamique.

Bonus

Efficacité de la gestion des exceptions

Dans notre implantation, l'emploi des exceptions ralentit le programme :

- Lors d'un `throw`.

  Ce n'est pas gênant : signaler une exception est supposé être un évènement rare, exceptionnel.

  Ce coût est sûrement négligeable par rapport à celui du traitement de l'erreur (exécution du `catch`).

- À chaque emploi d'un bloc `try`/`catch`/`finally`.

  Dans ILP : empilement/dépilement de la liste des gestionnaires.

  C'est bien plus gênant !

  Les blocs `try` peuvent (doivent ?) être nombreux, même si le `catch` n'est jamais exécuté.

  Il ne faut pas pénaliser les programmes qui gèrent bien les erreurs.

  Il ne faut pas pénaliser la programmation défensive
  (gérer trop de cas d'erreur, plutôt que pas assez).

Méthode à « coût zéro » (1/2)

La « vraie » pile d'un programme (simplifiée).

```
void main() {
l1: f(99);
l2:
}
void f(int x) {
    try {
l3:     g(x+1);
l4:     /* ... */
    }
    catch {
l5:     /* ... */
    }
l6: g(x+2);
l7: /* ... */
}
void g(int y) {
    throw(y);
}
```

s1:	arguments	x
s2:	adresse de retour	&l2
s3:	pile de l'appelant	&s?
s4:	variables locales	—
s5:	arguments	y
s6:	adresse de retour	&l4
s7:	pile de l'appelant	&s3
s8:	variables locales	—

- `main` empile 99
- `main` empile `&l2`
- `main` saute à `&l3`
- `f` empile le pointeur de pile
- `f` met le pointeur de pile à `s4`
- `f` empile 100 (`x+1`)
- `f` empile `&l4`...

Méthode à « coût zéro » (2/2)

Principe : au moment du `throw`

- remonter dans la pile la séquence des appels (`g`, `f`, `main`) ;
- avec pour chaque appel le site précis (adresse `&l4`, `&l2`) ;
- jusqu'à retrouver un site d'appel ayant un gestionnaire `catch` ;
- inutile donc de maintenir à part une liste des gestionnaires.

Possible en assembleur, mais difficile à implanter en C !

Le compilateur génère une table site d'appel $\rightarrow$ gestionnaire :

- la génération de la table est statique ;
- le recherche dans la table est dynamique.

$\Longrightarrow$ Un bloc `try` a un coût nul à l'exécution.
Un `throw` est un peu plus complexe et coûteux.