

# Résumé de LINFO1104

compilation du 15 avril 2023

Thomas Debelle

Juin 2023

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Les Paradigmes . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Les différents Paradigmes</b>	<b>5</b>
2.1	Functional Programming . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Programmation symbolique</b>	<b>6</b>
3.1	Listes . . . . .	6
3.1.1	Définition formelle . . . . .	6
3.2	Pattern matching . . . . .	6
3.3	Introduction au langage Kernel . . . . .	7
3.4	Les arbres . . . . .	7
3.4.1	Ordered Binary tree . . . . .	7
3.5	Tuples et Records . . . . .	8
3.5.1	Tuples . . . . .	8
3.5.2	Similitude Tuples et liste . . . . .	8
3.5.3	Les Records . . . . .	9
3.5.4	Résumé . . . . .	9
3.6	Sémantique Formelle . . . . .	9
3.6.1	Les environnements . . . . .	9
3.6.2	Sémantique . . . . .	10
3.6.3	Sémantique opérationnelle . . . . .	10
3.6.4	Résumé . . . . .	14
3.7	Rappel procédure sémantique . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Programmation d'ordre supérieur</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Lambda Calcul</b>	<b>16</b>
5.1	Introduction . . . . .	16
5.1.1	Fonctionnement . . . . .	16
5.1.2	Syntaxe . . . . .	16
5.1.3	En Oz . . . . .	17
5.1.4	Sémantique des expressions lambdas . . . . .	17
5.2	Types de données . . . . .	18
5.2.1	Nombres . . . . .	18
5.2.2	Opérations . . . . .	18
5.2.3	Opération logique . . . . .	19
5.2.4	Fonctions récursives . . . . .	20
5.2.5	Théorème de Church-Rosser . . . . .	20
5.2.6	Le lambda calcul et les langages de programmation . . . . .	20
5.2.7	Astuces pour le Lambda Calcul . . . . .	21
5.2.8	Variation et extension . . . . .	21

<b>6</b>	<b>État mutable et abstraction des données</b>	<b>22</b>
6.1	Motivation . . . . .	22
6.2	État explicite . . . . .	22
6.2.1	Exemple . . . . .	23
6.3	Sémantique de cellules . . . . .	23
6.3.1	Programmation impérative . . . . .	23
6.4	Nécessité de l'état mutable . . . . .	24
6.4.1	Comparaison . . . . .	24
6.5	Abstraction des données . . . . .	24
6.5.1	Encapsulation . . . . .	24
6.5.2	Les 2 types . . . . .	25
6.6	Le type de données abstraites . . . . .	25
6.6.1	Encapsulation . . . . .	25
6.6.2	Remarque . . . . .	26
6.7	Les objets . . . . .	26
6.7.1	Remarque . . . . .	26
6.8	Les 4 types d'abstraction de données . . . . .	26
6.8.1	Functional Objects . . . . .	27
6.8.2	Stateful ADT . . . . .	27
6.9	Remarques supplémentaires . . . . .	28
6.10	Conclusion . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Les exceptions</b>	<b>29</b>
7.1	Fonctionnement . . . . .	29
7.1.1	En Oz . . . . .	29
7.1.2	En Java . . . . .	30
7.1.3	Utilisation correcte . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Programmation simultanée</b>	<b>31</b>
8.1	Les bases . . . . .	31
8.2	Deterministic dataflow . . . . .	32
8.3	Threads . . . . .	32
<b>9</b>	<b>Conseils pour la syntaxe d'Oz</b>	<b>34</b>

# Préface

Bonjour à toi !

Cette synthèse recueille toutes les informations importantes données au cours, pendant les séances de tp et est amélioré grâce au note du Syllabus. Elle ne remplace pas le cours donc écoutez bien les conseils et potentielles astuces que les professeurs peuvent vous donner. Notre synthèse est plus une aide qui on l'espère vous sera à toutes et tous utiles.

Elle a été réalisée par toutes les personnes que tu vois mentionné. Si jamais cette synthèse a une faute, manque de précision, typo ou n'est pas à jour par rapport à la matière actuelle ou bien que tu veux simplement contribuer en y apportant ta connaissance ? Rien de plus simple ! Améliore la en te rendant [ici](#) où tu trouveras toutes les infos pour mettre ce document à jour. (*en plus tu auras ton nom en gros ici et sur la page du github*)

Nous espérons que cette synthèse te sera utile d'une quelconque manière ! Bonne lecture et bonne étude.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Les Paradigmes

Une paradigme, est une façon d'approcher et apporter une solution à un problème. De ce fait, chaque langage de programmation utilise 1 voir 2 paradigmes. Ce cours couvrira 5 paradigmes cruciaux qui sont :

1. "Functionnal Programming"
2. "Object Oriented Programming"
3. "Functional DataFlow Programming"
4. "Actor DataFlow Programming or Multi-Agent"
5. "Active Objects"

Et pour découvrir ces paradigmes, nous utiliserons les langages de programmations "[Oz](#)" qui est un langage de recherche multi paradigme ainsi que "[Erlang](#)" à la fin du cours.

## Chapitre 2

# Les différents Paradigmes

### 2.1 Functional Programming

Avec ce paradigme, on impose qu'une variable peut être nommée qu'une seule fois! Donc :  $X = 10$  mais on ne peut pas plus loin dire  $X = 9$ .  $X$  est déjà attribué. On peut penser que cela risque d'être handicapant alors qu'en réalité, cela rend notre code plus simple à déboguer. De plus, nombreux sont les langages et microservices utilisés qui implémentent la programmation fonctionnelle. Formellement, quand on déclare une variable et qu'on l'assigne à une valeur ceci se passe. Une chose importante à noter est que cette façon de programmer peut être réalisée dans n'importe quel langage de programmation. On peut également redéclarer un identificateur. C'est-à-dire écrire " $X = 42$ " et plus loin en ayant redéclaré une variable " $X = 11$ " car ces deux déclarations pointent à deux éléments totalement différents dans la mémoire et ont des *scopes* différents.

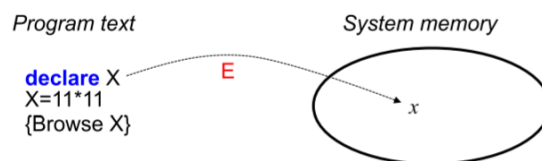


FIGURE 2.1 – Déclaration d'une variable

Un "Scope" ou portée est une propriété centrale en programmation. En effet, c'est le scope qui nous permet d'avoir différentes valeurs pour des variables qui ont le même nom. Naturellement, elle ne représente pas la même chose car elle diffère de leur scope. On peut déterminer le scope d'une variable sans même exécuter le code. Il nous suffit d'analyser le code qui comprend un "**lexical scoping**" ou un "**static scoping**".

```
local  
  X  
in  
  X = 42 {Browse X}  
  local  
    X  
  in  
    X = 11 {Browse X}  
  end  
end  
end
```

FIGURE 2.2 – Exemple de code avec des scopes différents

## Chapitre 3

# Programmation symbolique

### 3.1 Listes

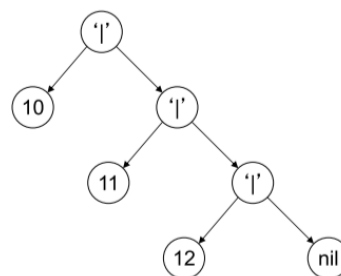
On dit d'une liste est **récursive** si elle se définit par elle-même. C'est-à-dire elle fait appel à elle-même. On utilise la récursion pour les calculs et pour stocker des données. Une liste est soit vide ou soit une pair *d'une valeur suivi par une autre liste*.

#### 3.1.1 Définition formelle

En utilisant la notation **Extended Backus-Naur Form** ou *EBNF* pour les intimes, on écrit une liste comme :  $\langle \text{List } T \rangle ::= \text{nil} \mid T \mid \langle \text{List } T \rangle$ . Une chose importante à noter est le deuxième "ou" qui s'écrit comme  $\mid$  signifiant qu'il n'appartient pas à la définition de List T mais plutôt à l'ensemble T  $\mid \langle \text{List } T \rangle$ . Si on lit ceci, on dirait "Une list d'élément représentant T correspond à un élément vide ou un élément représentant T suivi d'une autre Liste d'élément T".

Donc une List d'entier se définit comme :  $\langle \text{List } \langle \text{Int} \rangle \rangle$ . Une chose importante à remarquer est que j'ai utilisé le mot "représentation" en effet  $\langle \text{Int} \rangle$  n'est pas un entier mais une représentation d'entier.

Pour définir une liste en Oz, on utilise soit la notation [1 2 3] ou 1 | 2 | 3 | nil. (il existe d'autre manière semblable qu'on verra plus loin) C'est 2 déclarations reviennent à la même chose en mémoire. Une utilité des listes est leur facilité à être représenté sous forme d'arbre comme montré ci-contre. La *head* est accessible via [list.1](#) et la *tail* est obtenu via [list.2](#).



### 3.2 Pattern matching

Grâce à cette représentation en arbre, il est facile de voir si une liste est bien une liste. Ci-contre, on voit une fonction classique en Oz qui analyse une liste et détermine si elle est d'une structure correcte. Le `[]` correspond au cas où l'élément `L` est une liste avec une Head et une Tail. On appelle cela une *Clause* et `H|T` est le pattern de la clause. Le premier cas est défini par `of`.

```
fun {Sum L}
  case L
  of nil then 0
  [] H|T then H+{Sum T}
  end
end
```

### 3.3 Introduction au langage Kernel

Le langage Kernel est la première partie de la sémantique formelle d'un langage de programmation. Une règle importante est que tout programme écrit en programmation fonctionnelle *peut être traduit en langage kernel*. Les grands principes du langage Kernel sont :

- Tous les résultats intermédiaires de calculs sont visibles. Donc on a 1 opération par ligne et la déclaration en locale de toutes les variables.
- Toutes les fonctions deviennent des *procédures anonymes* avec un argument en plus. Cet argument donne le résultat de la fonction.
- Les fonctions dans une fonction sont sorties de leur fonction et on leur donne un nouvel identificateur.

Les résultats de la traduction : Les programmes Kernel sont plus longs mais on voit facilement comment un programme s'exécute et on voit si il est *tail-recursive*

### 3.4 Les arbres

Les arbres sont des structures de données extrêmement utiles et utilisées. On peut y stocker des données spécifiques, faire des calculs, ... Les arbres illustrent bien *la programmation orienté but*. Par le standard *EBNF*, on définit un arbre comme suit :  $\langle \text{tree } T \rangle : := \text{leaf} \mid t(T \langle \text{tree } T \rangle \dots \langle \text{tree } T \rangle)$ . Donc un arbre est une feuille ou *leaf* qui est suivie par un ensemble de *sous-arbres* (Il faut noter que le  $t(\dots)$  est une façon d'écrire un *record* de label " $t$ " qui est vu au 3.5.3). Les arbres sont forts similaires au liste si ce n'est que les listes n'ont qu'une sous-listes alors qu'un arbre peut avoir plusieurs sous-arbres.

#### 3.4.1 Ordered Binary tree

Un arbre de ce type a 2 particularités :

- **Binary** : toutes les éléments hors les feuilles possèdent 2 sous-arbres.
- **Ordered** : pour chaque arbre, la clé à gauche est plus petite que la clé de l'arbre et la clé à droite est plus grande.

Ce type d'arbre est très utile pour ; par exemple, effectuer des recherches binaires et permet de facilement et rapidement trouver des données.

#### Lookup K T

Nous permet de trouver une valeur. Ce programme est plutôt simple et il nous suffit de regarder la clé de l'arbre où on est. Puis on compare avec notre recherche, si on est plus grand, on va à droite sinon à gauche. On répète le processus jusqu'à trouver la clé.

Lookup est très efficace car il s'exécute en *log<sub>2</sub>n*, le pire cas est si l'arbre n'est pas équilibré et il ressemble à une liste. Mais en général, en ayant un nombre suffisant de données, il est très rare d'avoir un arbre non équilibré.

#### Insert K W T

Il existe 4 possibilités.

1. remplace une feuille.
2. on remplace un noeud.
3. on remplace un sous-arbre à gauche.
4. on remplace un sous-arbre à droite.

Le premier cas est le plus simple car on crée simplement un nouvel sous-arbre avec 2 feuilles. Si on remplace un noeud, on change la clé et la valeur du noeud. Pour remplacer un sous-arbre, on garde les mêmes clés et valeur de Y pour le noeud mais on change le sous-arbre à gauche ou à droite en fonction.



## Delete K T

Celle-ci est plus compliqué, on a 4 possibilités

1. La valeur qu'on veut supprimer n'existe pas
2. On supprime une feuille.
3. on supprime un sous-arbre à gauche.
4. on supprime un sous-arbre à droite.

TODO

## 3.5 Tuples et Records

### 3.5.1 Tuples

Un tuple est une manière de stocker des données de différents tuples, l'*ordre* est *important* dans un tuple. On doit également donner un nom, un **label**.

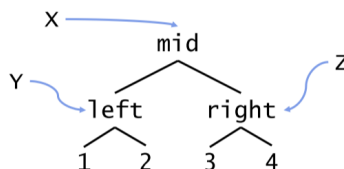
```
X = state (1 b 2)
{Browse {Label X}}
{Browse {Width X}}
```

La première ligne définit un tuple ayant pour *label* "state". La seconde ligne imprime le label du tuple. La dernière affiche sa taille. (c'est donc un entier toujours positif ou 0)

Les champs dans les tuples sont numérotés de 1 à **width X**. On appelle aussi le champ (field) une "*feature*". Un tuple possède toutes ces features de manière consécutives.

On peut donc ainsi construire des structures de données plus compliquées comme des arbres :

```
declare
Y = left (1 2) Z = right (3 4)
X = mid(Y Z)
```



## Comparaison

Il est très simple de comparer des tuples via "=", il faut simplement comparer leur valeur à chaque champ. Attention au *loop* causé par les approches naïves.

### 3.5.2 Similitude Tuples et liste

En effet, une liste qui n'est autre que "H|T" peut facilement être traduit en tuple ']' (H T). Quand on peut déterminer un même élément via différentes manières, on appelle ça du *sucré syntaxique*. Dans le *kernel*, on fait au plus simple donc que des tuples.

```
List1 = [1 2 3]
List2 = (1:1 2:(1:2 2:(1:3 2:nil)))
List1 == List2 //Vrai
```

### 3.5.3 Les Records

Les "records" sont une **généralisation** des tuples. La différence avec les tuples est que le *field* peut être n'importe quel valeur et ne doit pas être consécutif. Donc ceux-ci sont des *records* corrects :

```
X = state(a:1 2:a b:2)
Y = inv(3:a 2:b 1:c)
```

Donc la position d'une valeur et son *field* n'importe plus et on peut déclarer dans le sens qu'on veut. Si on ne nomme pas un *field* dans un *record*, Oz va attribuer un nombre commençant à 1 et qui n'est pas utilisé par un autre champ.

### 3.5.4 Résumé

- Un *atom* est un record de width 0.
- Un tuple est un record avec des champs étant numéroté de manière consécutive de 1 à width  $X$ . (consécutive, donc on skip pas. pas forcément dans l'ordre dans la déclaration)
- Une liste est réalisée avec des *tuples* et des  $(X \ Y)$ .  $X$  étant une donnée et  $Y$  étant une sous-liste de données.
- 1 seule *structure de donnéé* dans le kernel pour rester simple.

## 3.6 Sémantique Formelle

### 3.6.1 Les environnements

Un environnement est une fonction qui passe des *identifieurs* aux *variables en mémoire* autrement dit :  $E_1 = (X \rightarrow x, Y \rightarrow y)$

#### Environnement contextuel

Un *environnement contextuel* d'une fonction contient tous les *identificateurs* qui sont utilisés dans la fonction mais déclarés *en dehors*. Donc ce sont des fonctions qui lorsqu'on appelle une variable va pointer en dehors du scope de la fonction.

#### Stocker une Procédure

Les procédures sont stocker dans la mémoire sous le forme de procédure anonyme symboliser par le "\$".

```
local P Q in
  {Browse 'do something'}
  proc {Q}
    {P}
  end
  {Browse 'another something'}
end
```

Notre "proc Q" sera stocker comme :  $q = (\text{proc}\{\$\}\{P\} \text{ end}, \{P \rightarrow p\})$ . On lit donc, la procédure *anonyme* (\$), fais un appel à P ({P}) et finit (end), son *environnement contextuel* fait que lorsqu'on appelle "P" on va récupérer la valeur "p" en mémoire ( $\{P \rightarrow p\}$ ). Donc on voit que l'*environnement contextuel* est stocké avec le code de procédure.

On appelle également la valeur d'une procédure une "*closure*" ou une "*lexically scoped closure*" car elle ferme les identificateurs libres quand définis.

Donc l'avantage d'un environnement contextuel est d'être sûr qu'on appellera la bonne valeur même si elle est déclaré en dehors de la fonction.

Un *identificateur libre* est un identificateur utilisé dans une *fonction* qui est déclaré *en dehors* de la fonction.

Les arguments d'une procédure **ne sont pas** des identificateurs libres car l'argument définit l'identificateur.

### 3.6.2 Sémantique

Il est important de comprendre le fonctionnement même d'un programme car si on ne comprend pas comment celui-ci fonctionne, il nous domine. *If you do not understand something, then you do not master it – it masters you!*

#### Définition

La *sémantique* d'un langage de programmation est une explication *précise* de comment un programme s'exécute. Nous verrons la sémantique pour tous les paradigmes. Il en existe 4 types :

1. **Sémantique opérationnelle** : explique un programme sur base d'*exécution* sur un PC simplifié appelé *la machine abstraite*. → Fonctionne pour tous les paradigmes.
2. **Sémantique axiomatique** : explique un programme sur base d'*implication*. C'est-à-dire que certaines *propriétés* présentes avant l'exécution, et d'autres seront présentes après. → très utilisé pour la programmation orientée objet comme *Java*.
3. **Sémantique de notation** : explique un programme comme une *fonction* sur un domaine abstrait. Donc simplifie l'analyse mathématique d'un programme. (utilisé dans *Haskell* et *Scheme*)
4. **Sémantique logique** : explique un programme comme étant un *modèle logique* basé sur des *axiomes logiques*. Le résultat est une propriété correcte dérivée des axiomes. (cela est implémenté par exemple dans *Prolog* ou dans la *programmation sous contrainte*)

### 3.6.3 Sémantique opérationnelle

Ce type de sémantique à 2 parties majeures :

- **Langage Kernel** : traduit le programme en langage Kernel.
- **Machine abstraite** : puis exécute le programme sur la machine abstraite.

#### 1. Langage Kernel complet

Pour définir correctement une sémantique, il faut tout d'abord s'intéresser à son langage Kernel complet. On peut également prouver qu'un programme est correct en analysant son kernel. Par exemple, prenons ce code kernel :

```
<s> ::= skip
      | <s>1<s>2
      | local <x> in <s> end
      | <x>1=<x>2
      | <x>=<v>
      | if <x> then <s>1 else <s>2 end
      | {<x> <y>1,...,<y>n}
      | case <x> of <p> then <s>1 else <s>2 end

<v> ::= <number> | <procedure> | <record>
<number> ::= <int> | <float>
<procedure> ::= proc { $ <x>1,...,<x>n } <s> end
<record>, <p> ::= <lit> | <lit>(<f>1:<x>1,...,<f>n:<x>n)
```

donc "<s>" contient le programme exécuté, "<v>" est une structure de donnée contenant différent type de structure de donnée qui sont définis juste en dessous.

## 2. La machine abstraite

Voici ci-dessous comment s'exécute un programme initialement.

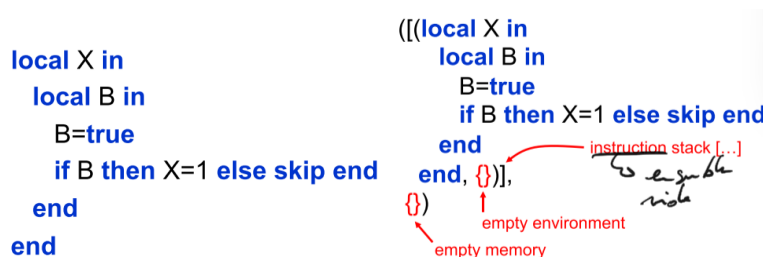


FIGURE 3.1 – à gauche : programme écrit en Oz à droite : état initiale d'exécution

Au début, l'environnement et la mémoire sont vides. L'état d'exécution est écrit typiquement comme :

$([(\langle s \rangle, E)], \sigma)$

Sur la machine abstraite, on va d'instructions en instructions. C'est-à-dire on descend petit à petit. donc on a pour la suite :

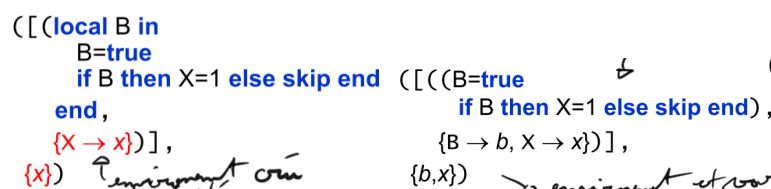


FIGURE 3.2 – à gauche : on descend de 1 cran à droite : on descend encore de 1 cran

On voit que au fur et à mesure qu'on descend, la pile de mémoire et d'environnement s'agrandit. Ensuite on va *séparer la composition séquentielle* comme suit :

$([(B=\text{true}, \{B \rightarrow b, X \rightarrow x\}),$   
 $(\text{if } B \text{ then } X=1$   
 $\text{else skip end}, \{B \rightarrow b, X \rightarrow x\})],$   
 $\{b, x\})$

$([(\text{if } B \text{ then } X=1$   
 $\text{else skip end}, \{B \rightarrow b, X \rightarrow x\})],$   
 $\{b=\text{true}, x\})$

FIGURE 3.3 – à gauche : on sépare en deux à droite : on attribue à b la valeur définie à gauche

Une nouvelle instruction va s'ajouter à cause du "then" de notre condition :

$([(X=1, \{B \rightarrow b, X \rightarrow x\})],$   
 $\{b=\text{true}, x\})$

$([],$   
 $\{b=\text{true}, x=1\})$

FIGURE 3.4 – à gauche : la nouvelle instruction à droite : les instructions sont vides, c'est fini

## 3. Définir la machine abstraite

- Pour chaque instructions dans le langage Kernel, on associe sa règle dans la machine abstraite
- Chaque instructions prends un état d'exécution en entrée et sort un état d'exécution en sortie  $\rightarrow (ST, \sigma)$ .

L'instruction la plus simple est "skip" car il fonctionne comme  $((skip, E), S_2, \dots, S_n, \sigma)$  et renvoie  $([S_2, \dots, S_n], \sigma)$

Instructions	entrée	sortie
skip	1	2
$\langle s \rangle_1 \langle s \rangle_2$	$([S_a S_b], S_2, \dots, S_n, \sigma)$	$([S_a, S_b, S_2, \dots, S_n], \sigma)$
local in $\langle x \rangle$ in $\langle s \rangle$ end	$((local \langle x \rangle in \langle s \rangle end, E), S_2, \dots, S_n, \sigma)$	$((\langle s \rangle, E + \{\langle x \rangle \rightarrow x\}), S_2, \dots, S_n, \sigma)$

Il y a également d'autres types d'instructions dont on détaillera pas le langage en machine abstraite :

- $\langle x \rangle = \langle v \rangle$  (crée et assigne une valeur) : quand  $\langle v \rangle$  est une procédure, on **doit** créer un environnement contextuel.
- if  $\langle x \rangle$  then  $\langle s \rangle_1$  else  $\langle s \rangle_2$  end (condition) : si  $\langle x \rangle$  n'est pas attribué, l'instruction va attendre ("block") jusqu'à ce que  $\langle x \rangle$  soit attribuer à une valeur.
- case  $\langle x \rangle$  of  $\langle p \rangle$  then  $\langle s \rangle_1$  else  $\langle s \rangle_2$  end : Le system de "case" se construit en combinant des structures de données Kernel.
- $\{\langle x \rangle \langle y \rangle_1, \dots, \langle y \rangle_n\}$  : ceci est la base de l'abstraction de donnée

Par ailleurs, voici d'autres concepts de machine abstraite :

- Single-assignment memory  $s = \{x_1 = 10, x_2, x_3 = 20\}$  : Définition d'une variable et la valeur associée.
- Environnement  $E = \{X \rightarrow x, Y \rightarrow y\}$  : Lien entre un identificateur et son lien dans la mémoire
- Instruction sémantique  $\langle s \rangle, E$  : Une instruction avec son environnement.
- Stack Sémantique  $ST = [(\langle s \rangle_1, E_1), \dots, (\langle s \rangle_n, E_n)]$  : Un stack d'instructions sémantiques.
- État d'exécution  $(ST, \sigma)$  : Une paire d'un stack sémantique et sa mémoire.
- Execution  $(ST_1, s_1) \rightarrow (ST_2, s_2) \rightarrow (ST_3, s_3) \rightarrow \dots$  : Une séquence d'état d'exécution.

#### 4. Programme correct

grâce à la sémantique, on sait prouver qu'un programme est correct. On dit qu'un programme produit une solution correcte, on l'appelle une *spécification*.

Donc on prouve qu'un programme satisfait la *spécification* quand on utilise une certaine *sémantique*. La sémantique lie le *programme* à un résultat mathématique appelé *spécification*.

Donc on lie une vérité mathématique à un programme. Et on prouve cela via ces différentes étapes : (exemple avec une factorielle)

1. On commence avec la spécification du programme.
2. Notre programme est *récuratif* donc on va utiliser une preuve mathématique par *induction*.
3. On doit prouver le cas de base et le cas général.
4. On utilise la sémantique pour prouver la véracité de notre programme.

#### 5. Procédures

Les procédures sont la base de toutes **abstractions de données**.

Il y a deux choses importantes dans une *procédure* : sa **définition** et son **appel**.

**Définition** : on crée l'environnement *contextuel*. Puis, on stocke le code de la procédure et son environnement.

**Appel** : on crée un nouvel environnement combinant l'environnement *contextuel* de la procédure et les variables *formelles*. Ensuite, le tout est exécuté.

```

local Z in
  Z=1
  proc{P X Y}Y=X+Z end
end

```

Ici, le seul identificateur *libre* est **Z** qui est donc déclaré en dehors de la *procédure*. Donc à l'exécution de **P**, **Z** est connu donc **Z** fait partie de l'environnement contextuel de la *procédure*.

```

local P in
  local Z in
    Z=1
    proc{P X Y}Y=X+Z end
  end
  local A B in
    A=10
    {P A B}
    {Browse B}
  end
end

```

Ici, à la ligne de la création de la procédure **P**, son environnement contextuel est  $E_c = \{Z \rightarrow z\}$ . On va stocker dans la mémoire notre instruction et son environnement *contextuel* c'est la *semantic rule*. Au moment de l'exécution de **P** avec les valeurs **A** et **B**, on va donc ajouter un environnement qui est de la sorte :  $E_P = \{Y \rightarrow b, X \rightarrow a, Z \rightarrow z\}$ . Donc ce deuxième environnement est stocker dans le *stack sémantique* **pas** dans la mémoire avec le fonction ! Donc en langage *sémantique*, la définition d'une procédure ressemble à cela :

- **Instruction sémantique** :  $(\langle x \rangle = \text{proc}\{\$ \langle x \rangle_1, \dots, \langle x \rangle_n\} \langle s \rangle \text{end}, E)$
- **Arguments formels** :  $\langle x \rangle_1, \dots, \langle x \rangle_n$
- **Identificateurs libres de**  $\langle s \rangle$  :  $\langle z \rangle_1, \dots, \langle z \rangle_k$
- **Environnement contextuel** :  $E_C = E_{|\langle z \rangle_1, \dots, n \langle z \rangle_k}$  (que les identificateurs libres)
- Cela crée une liaison en mémoire de la forme :  $x(\text{proc}\{\$ \langle x \rangle_1, \dots, \langle x \rangle_n\} \langle s \rangle, \text{end}, E_C)$

Maintenant, voyons pour un *appel sémantique* :

- **Instruction sémantique** :  $(\{\langle x \rangle \langle y \rangle_1 \dots \langle y \rangle_n\}, E)$
- Si la condition est *false* donc  $E(\langle x \rangle)$  n'est pas lié.
- Si  $E(\langle x \rangle)$  n'est **pas** une procédure, on a une erreur de *condition*.
- Si  $E(\langle x \rangle)$  est une procédure *mais* avec le mauvais nombre d'argument, on a aussi une erreur de *condition*.

Une chose primordiale à comprendre est comment sont stocké les instructions. Elles sont stocké sur une **pile** (*stack*). Donc on a l'instruction sémantique sur le stack :  $(\{\langle x \rangle \langle y \rangle_1 \dots \langle y \rangle_n\}, E)$  avec la définition de procédure dans la *mémoire* comme cela :  $E(\langle x \rangle) = \text{proc}\{\$ \langle z \rangle_1, \dots, \langle z \rangle_n\} \langle s \rangle \text{end}, E_C$  Ensuite, on met ces instructions sur la *pile*  $(\langle s \rangle, E_C + \{\langle z \rangle_1 \rightarrow E(\langle y \rangle_1), \dots, \langle z \rangle_n \rightarrow E(\langle y \rangle_n)\})$

La machine abstraite fait 2 choses :

1. **Adjonction** :  $E_2 = E_1 + \{X \rightarrow y\}$  Donc ajoute une paire (identificateur  $\rightarrow$  variable) à l'environnement. Ré-écrit par dessus  $E_1$  si existe déjà. Utile pour **local**  $\langle x \rangle$  **in**  $\langle s \rangle$  **end**.
2. **Restriction** :  $E_C = E_{|\{X, Y, Z\}}$  Donc limite les *identificateurs* dans un environnement. On a besoin de cela pour calculer l'environnement *contextuel*.

Une adjonction :

```

local X in
  (E1) X=1
  local X in
    (E2) X=2
    {Browse X}
  end
end

```

```

end
E1 = {Browse → b, X → x}
E2 = E1 + {X → y} = {Browse → b, X → y}

Une restriction :

local A B C AddB in
  A=1 B=2 C=3 (E)
  fun {AddB X} (EC : contextual environment)
    X+B
  end
end
E = {A → a, B → b, C → c, AddB → a' }
EC = E|{B} = {B → b }

```

### 3.6.4 Résumé

Définir la sémantique permet de relier les programmes au mathématique. On donne des instructions *sémantique* au *kernel* pour qu'il sache comment exécuter dans la *machine abstraite*. La sémantique nous permet de prouver qu'un programme est *correct*.

La sémantique est au cœur de la programmation. Une nouvelle librairie est comme si on ajoutait des instructions au programme donc on augmente sa sémantique.

Quand on écrit un programme, il faut comprendre la sémantique (l'utilisateur n'a pas besoin de savoir). La sémantique doit être simple et complète.

On peut voir la sémantique comme le langage de programmation *ultime*.

Il ne faut pas oublier que les pc sont basés sur les mathématiques *discrètes*.

## 3.7 Rappel procédure sémantique

Tout d'abord, en programmation nous avons différentes étapes qui reposent chacune sur les précédentes. Fermeture → Programmation d'ordre supérieur → Abstraction des données → Technologie de l'information.

Rappel sur l'exécution d'un programme :

{Browse {Inc 10}}	#Langage pratique (classique)
-------------------	-------------------------------

---

local M in	#Langage Kernel
------------	-----------------

```

  local N in
    M=10
    {Inc M N}
    {Browse N}
  end
end

```

end

A l'exécution,  $[(\{IncMN\}, \{M \rightarrow m, N \rightarrow n, Inc \rightarrow i, Browse \rightarrow b\}), (\{BrowseN\}, \{M \rightarrow m, N \rightarrow n, Inc \rightarrow i, Browse \rightarrow b\})], \{m = 10, n, i = (proc\{XY\} Y = X + A end, \{A \rightarrow a\}), a = 1, b = (...browsercode...)\}$  et Inc va référencer cela :

$[(Y = X + A, \{A \rightarrow a, X \rightarrow m, Y \rightarrow n\}), (\{BrowseN\}, \{M \rightarrow m, N \rightarrow n, Inc \rightarrow i, Browse \rightarrow b\})], \sigma$

Il est important de remarquer que dans la mémoire, quand on stocke une procédure, on stocke le tout donc avec son environnement contextuel.

## Chapitre 4

# Programmation d'ordre supérieur

Ce concept découle directement du concept d'*environnement contextuel*. Dans un *procédure* ou *fonction* (les mêmes pour un langage kernel) peuvent prendre des valeurs ou des fonctions en arguments.

### Définition

- Une fonction est dit **de premier ordre** si elle ne prend et ne ressort aucune fonction.
- Une fonction est **N+1** si son entrée et sortie prennent en tout  $N$  fonctions en argument.

Nomenclature des différentes fonctions :

- **Une génératrice** est le fait de prendre une fonction en entrée d'une fonction.
- **Une instantiation** est le fait de retourner une fonction en sortie d'une fonction.
- **Une composition de fonctions** est le fait de prendre 2 fonctions en entrée et on retourne leur composition.

### Utilisation

Via la programmation d'ordre supérieure, on peut cacher un accumulateur. On dit qu'on fait une *abstraction d'accumulateur*.

Une fonction type est la fonction **FoldL** (*reduce*). En effet, la fonction FoldL fait :

```
declare
fun {FoldL L F U}
  case L
  of nil then U
  [] H|T then {FoldL T F {F U H}}
  end
end
```

```
{FoldL LIST Function Acc}
```

On peut, un peu dans le même style, faire de l'encapsulation afin de cacher sa valeur à l'intérieur.  
→ C'est la base de *l'abstraction de données*.

Il faut faire attention à l'**exécution retardé**. En effet, si on ne stocke pas le résultat d'une fonction, elle ne sera exécuté que quand on appellera la valeur. Donc cela peut prendre beaucoup de place en mémoire de stocker une fonction plutôt que son résultat.



# Chapitre 5

## Lambda Calcul

1. C'est un modèle de calcul qui est **Turing complete**.
2. **Tous** les types de données peuvent être encodé en lambda calcul.
3. Par le théorème de **Church-Rosser**, le lambda calcul est **confluent**. Même résultat peu importe l'ordre de réduction
4. C'est la base de la programmation ordre supérieur et de la programmation formelle.

### 5.1 Introduction

Le *lambda calcul* est une manière mathématique formelle pour représenter des calculs informatiques. Cela a été créé avant l'arrivée des ordinateurs. Cela ne contient que des **définitions**, **appels** et utilise des **liens de variables** et de la **substitution**.

Le *lambda calcul* est une manière universelle de calcul. On peut l'utiliser pour simuler des **machines de Turing**.

#### 5.1.1 Fonctionnement

Le lambda calcul n'a que des *fonctions anonymes d'un seul argument*. Donc si on veut en avoir plusieurs, il faut combiner les fonctions :

```
sum_square(x,y) = x2 + y2 //fonction classique
(x,y) → x2 + y2 //fonction anonyme
x → (y → x2 + y2) //d'une seul argument
λx.λy.x2 + y2 //en lambda calcul
```

Le fait de combiner et de "*nest*" des fonctions s'appellent le **currying**.

#### 5.1.2 Syntaxe

Les expressions lambdas sont composées de :

- Variables (x,y, ...)
- Du symboles d'abstractions (λ) et de point (.)
- Et des parenthèses

En syntaxe EBNF c'est :

$t ::= x \mid (\lambda x. t) \mid t_1 \ t_2$

$(\lambda x. t)$  : est appelé une abstraction (*définition de fonction*)

$t_1 \ t_2$  : c'est l'appel de fonction.

### 5.1.3 En Oz

1. La définition de fonction  $(\lambda x.t)$

`fun { $ X } T end`

2. L'appel de fonction  $(t_1 \ t_2)$

`{ T1 T2 }`

Le currying en Oz :

1. Définition

`F = fun { $ X } fun { $ Y } T end end`

2. Appel

`{{ F X } Y }`

### 5.1.4 Sémantique des expressions lambdas

Le sens d'une expression lambda dépend de comment on peut la réduire. Il en existe 3 types.

1.  **$\alpha$ -renaming** : change le nom des variables liés
2.  **$\beta$ -reduction** : applique une fonction à un argument
3.  **$\eta$ -reduction** : enlève les variables inutilisés

#### Variables libres et liées

Si nous avons :  $\lambda x.t$  on dit que *l'opérateur*  $\lambda x$  lie la variable  $x$  à  $t$ . Mais la variable  $t$  est libre car n'est lié à *aucune* fonction. Si  $x$  est libre dans  $t$  alors on dit qu'on **capture**  $x$ .

On dénote  $FV(t)$  l'ensemble des variables libres :

- $FV(x) = \{x\}$  où  $x$  est une variable
- $FV(\lambda x.t) = FV(t) \setminus \{x\}$
- $FV((t_1 \ t_2)) = FV(t_1) \cup FV(t_2)$

#### $\alpha$ -renaming

Ainsi, on peut changer le nom d'une variable lié :

$\lambda x. x \rightarrow_{\alpha} \lambda y. y$

Il faut faire attention à ce qu'on ait pas de *conflit de nom* et de *capture de variable*.

Des termes qui diffèrent d'un  $\alpha$ -renaming sont dits  $\alpha$ -équivalents.

#### Substitution

La substitution de  $t_1[x := t_2]$  remplace toutes les occurrences libres de  $x$  dans  $t_1$  par  $t_2$ .

On a parfois recourt à l' $\alpha$ -renaming. En effet, la substitution ne peut pas *capturer* des variables libres. Donc  $(\lambda x.y)[y := x]$  peut être transformé en  $(\lambda z.y)[y := x]$ . La définition :

$$\begin{aligned} x[x := t] &= t & y[x := t] &= y, \text{ if } x \neq y & (t_1 \ t_2)[x := t] &= (t_1[x := t])(t_2[x := t]) \\ (\lambda x.t_1)[x := t_2] &= \lambda x.t_1 & (\lambda y.t_1)[x := t_2] &= \lambda y.(t_1[x := t_2]), & & \text{ if } x \neq y \wedge y \notin FV(t_2) \end{aligned}$$

#### $\beta$ -reduction

C'est une application de fonction et se décrit via la substitution. (cfr 5.1.4)

Définition :  $(\lambda x.t_1)t_2 \rightarrow t_1[x := t_2]$

Exemple :  $(\lambda x.(x \ x))y \rightarrow (y \ y)$

## $\eta$ -reduction

C'est l'idée que 2 fonctions sont les *mêmes* si elles produisent le *même résultat* pour tous les arguments possibles. On appelle cela **extensibilité**. Donc 2 fonctions sont les mêmes si elles ont les mêmes propriétés extérieures.

Définition :  $\lambda x.(t \ x) \rightarrow t$  if  $x \notin FV(t)$

- **$\alpha$ -renaming**  
 $\lambda x.t_1[x] \rightarrow \lambda y.t_1[y]$   
 (change bound vars without capture)
- **$\beta$ -reduction**  
 $(\lambda x.t_1) t_2 \rightarrow t_1[x:=t_2]$   
 (replace free x of  $t_1$  by  $t_2$  without capture)
- **$\eta$ -reduction**  
 $\lambda x.(t \ x) \rightarrow t$  if  $x \notin FV(t)$

FIGURE 5.1 – Résumé

## Convention de notation

Quand on manipule des expression lambda, il est important de suivre quelques règles :

- Enlever les parenthèses les plus extérieur. ex :  $(t_1 \ t_2) \rightarrow t_1 \ t_2$
- Les applications sont associatives depuis la gauche. ex :  $t_1 \ t_2 \ t_3 \rightarrow ((t_1 \ t_2) \ t_3)$
- On étend vers la droite ex :  $\lambda x.t_1 t_2 \rightarrow \lambda x.(t_1 t_2)$
- On peut simplifier les séquences d'abstractions. ex :  $\lambda x.\lambda y.\lambda z.t \rightarrow \lambda xyz.t$

## 5.2 Types de données

Le lambda calcul peut faire tout type de calcul, il est **Turing complete**.

Pour le démontrer, on va encoder des chiffres, opérations, ... en lambda calcul. Donc tous les chiffres, booléens, ... seront encodés en lambda calcul

### 5.2.1 Nombres

On utilise une notation appelée **Church Numerals** :

- $0 \triangleq \lambda f.(\lambda x.x)$
- $1 \triangleq \lambda f.(\lambda x.(f \ x))$
- $2 \triangleq \lambda f.(\lambda x.(f(f \ x)))$
- $3 \triangleq \lambda f.(\lambda x.(f(f(f \ x))))$

On peut remarquer que ces fonctions sont d'ordre supérieur. En effet, elles prennent en argument une fonction et ressortent une fonction. (d'un seul argument)

Le nombre  $n$  retourne donc la fonction qui est une composition de  $n$  fois de  $f$ . Donc on dit que  **$f$  est appliqué  $n$  fois**.

### 5.2.2 Opérations

#### Fonction successeur

Prend le nombre de Church  $n$  et retourne  $n + 1$ .

$$SUCC \triangleq \lambda n.\lambda f.\lambda x.f((n \ f)x) \qquad SUCC \triangleq \lambda n.\lambda f.\lambda x.f(n \ f \ x)$$

#### Addition

Retourne donc la composition de  $m + n$ .

$$PLUS \triangleq \lambda m.\lambda n.\lambda f.\lambda x.(m \ f)((n \ f)x) \qquad PLUS \triangleq \lambda m.\lambda n.\lambda f.\lambda x.m \ f(n \ f \ x)$$

## Multiplication

$$MULT \triangleq \lambda m. \lambda n. \lambda f. m(n \ f) \qquad MULT \triangleq \lambda m. \lambda n. m(PLUS \ n) \ 0$$

La deuxième façon de faire *MULT* est comme si on disait, "fait une somme *m* fois en commençant à 0.

## Exponentielle

$$POW \triangleq \lambda b. \lambda e. e \ b$$

## Prédécesseur

$$PRED \triangleq \lambda n. \lambda f. \lambda x. n(\lambda g. \lambda h. h(gf))(\lambda u. u)$$

## Soustraction

Grâce à la méthode du prédécesseur, on peut définir la soustraction :

$$SUB \triangleq \lambda m. \lambda n. n \ PRED \ m$$

Donc pour  $m - n$  on effectue la fonction prédécesseur  $n$  fois en commençant à  $m$ .

## 5.2.3 Opération logique

### Booléens

$$TRUE \triangleq \lambda x. \lambda y. x \qquad FALSE \triangleq \lambda x. \lambda y. y$$

### Opérateur logique

$$\begin{aligned} AND &\triangleq \lambda p. \lambda q. p \ q \ p & OR &\triangleq \lambda p. \lambda q. p \ p \ q \\ NOT &\triangleq \lambda p. p \ FALSE \ TRUE & IFTHENELSE &\triangleq \lambda p. \lambda a. \lambda b. p \ a \ b \end{aligned}$$

### Prédicat

Ce sont des fonctions qui retournent une valeur booléenne :

$$ISZERO \triangleq \lambda n. n(\lambda x. FALSE) TRUE \qquad LEQ \triangleq \lambda m. \lambda n. ISZERO(SUB \ m \ n)$$

### Paire

Ce sont des tuples de  $width = 2$  et peuvent être définis en terme de booléens :

$$\begin{aligned} PAIR &= (x, y) \text{ le tuple} & PAIR &\triangleq \lambda x. \lambda y. \lambda f. f \ x \ y \\ FIRST &\triangleq \lambda p. p \ TRUE & SECOND &\triangleq \lambda p. p \ FALSE \\ NIL &\triangleq \lambda x. TRUE & NULL &\triangleq \lambda p. p(\lambda x. \lambda y. FALSE) \end{aligned}$$

Ceci nous introduit à l'abstraction de donnée. Une chose cruciale à comprendre est que depuis les 3 principes simples du lambda calcul, (définition de fonction, utilisation de fonction, des variables en arguments) on peut tout réaliser !

## Liste

En sachant qu'une liste est un ensemble de valeur de nil, on sait utiliser des listes en lambda calcul. On peut même les utiliser pour "*simplement*" définir la fonction PRED via SHIFTINC :

$$\begin{aligned} \text{SHIFTINC} &\triangleq \lambda x. \text{PAIR}(\text{SECOND } x)(\text{SUCC}(\text{SECOND } x)) \quad (m, n) \rightarrow (n, n+1) \\ \text{PRED} &\triangleq \lambda n. \text{FIRST}(n \text{ SHIFTINC}(\text{PAIR } 0 \ 0)) \end{aligned}$$

En effet cela fonctionne car le premier élément sera  $n - 1$  par rapport au second.

### 5.2.4 Fonctions récursives

Comme les fonctions sont anonymes, on ne peut pas faire d'appel direct récursif. On va faire en sorte qu'une fonction devient l'argument d'une expression lambda. Par exemple :  $G \triangleq \lambda f. \lambda n. (\text{if } n = 0 \text{ then } 1 \text{ else } n(f \ n-1))$

## Y combinator

Cela nous permet de passer de  $Y(g)$  à  $g(Y \ g)$ . Ainsi, on sait faire des factorielles de manière récursive :

$$Y \triangleq \lambda g. (\lambda x. g(x \ x))(\lambda x. g(x \ x))$$

### 5.2.5 Théorème de Church-Rosser

Ce théorème nous dit que l'**ordre de réduction** n'a pas d'importance. Concrètement, si  $a$  se réduit à  $b$  avec aucune ou plusieurs étapes et que si  $a$  se réduit à  $c$  avec aucune ou plusieurs étapes. Alors, il existe un  $d$  tel que  $b$  et  $c$  peuvent se réduire à ce dernier. Le programme est **confluent** ou possède la *propriété de Church-Rosser*.

### 5.2.6 Le lambda calcul et les langages de programmation

La *programmation fonctionnelle* peut être comprise en terme de lambda calcul.

- Les valeurs de procédures (donc *lexically scope closures*) **sont** des fonctions lambda.
- l'*Eager et lazy evaluation* est sont des stratégies de réduction différentes.

## 2 approches

Eager évaluation méthode de réduction qui commence par l'intérieur donc on exécute un programme comme suit :

```
{Double {Average 5 7}} →
{Double ((5+7)/2)} →
{Double (12/2)} →
{Double 6} →
6+6 →
12
```

La lazy évaluation elle, va calculer que ce qui est nécessaire et réduit si nécessaire pour l'exécution. On va de l'extérieur à l'intérieur

```
{Double {Average 5 7}} →
{Average 5 7}+{Average 5 7} →
((5+7)/2)+{Average 5 7} →
(12/2)+{Average 5 7} →
6+{Average 5 7} →
6+((5+7)/2) →
6+(12/2) →
6+6 →
12
```

## If statement

Dans la plupart des langages de programmation, la condition **if** est réalisé de manière applicative. La partie de l'action **then** est réalisé de manière **lazy**. Donc si une action produit une erreur mais quelle est dans une clause qui ne serait pas atteint, alors le programme ne crashe pas.

### 5.2.7 Astuces pour le Lambda Calcul

Voici quelques astuces pour vous aider à maîtriser le lambda calcul qui peut sembler de prime abord barbare :

1. Ajouter des parenthèse!! Ex :  $\lambda x.\lambda y.x + y \quad 1 \quad 2 \rightarrow (\lambda x.(\lambda y.x + y)1)2$  Cela peut sembler anodin mais cela permet de mieux comprendre et lire les expressions qui peuvent vite devenir lourdes. Aussi, garder les parenthèses ça peut aider à voir plus clair.
2. Utiliser des abréviations. Car on n'a pas toujours besoin de savoir comment cela fonctionne et permet de faire partie par partie une fonction.
3. Pour bien réaliser un  $\eta$ -reduction, commencer par faire une  $\beta$ -reduction. Vous voyez ce qu'il vous reste. Vous faites une  $\alpha$ -renaming pour retrouver une expression qui correspond à une partie de l'expression de base.
4. Cet [article](#) est très utile pour comprendre le  $y$ -combinator et mieux disséquer les opérations en Lambda Calcul.

### 5.2.8 Variation et extension

Le lambda calcul est une base fondamentale dans la théorie de l'informatique. Dans les extensions du lambda calcul, on retrouve :

- **Lambda calcul typé** : donc avec des variables et fonctions
- **System F** : avec des variables de **types**
- **Constructions de calcul** : les types sont les valeurs de classes premières
- **Combinateur logique** : logique sans variables
- **Calcul de combinateur SKI** : comme le lambda calcul mais sans substitution de variables. On utilise les combinateurs S,K et I.
- **Langage Kernel d'OZ** : le lambda calcul avec des variables *dataflow* (une seule attribution), exécution *dataflow*, *threads* et évaluation *lazy* explicite.

## Chapitre 6

# État mutable et abstraction des données

Une chose importante à réaliser, il n'y a pas de notion de temps en programmation. Toutes les fonctions qu'on a sont mathématiques et ne change pas en fonction du temps. Un programme *ne peut observer* son évolution dans le temps sur l'ordinateur.

### 6.1 Motivation

Une des solutions possibles, on définit le temps abstrait comme une suite de valeurs. On appelle cela un **état**.

Formellement, un **state** est une séquence calculé de manière *progressive* et contient les résultats *intermédiaire*. Le paradigme fonctionnel peut utiliser les **états**, ci-dessous la définition de **Sum** comme un état :

fun {Sum Xs A}		
case Xs	Xs	A
of nil then A	[1 2 3 4]	0
[] X Xr then	[2 3 4]	1
{Sum Xr A+X}	[3 4]	3
end	[4]	6
end	nil	10
{Browse {Sum [1 2 3 4] 0}}		

Mais cela n'est pas suffisant. En effet, on voudrait que le programme remarque *lui-même* ses propres changements. Il faut faire une **extensions**, on rentre dans un nouveau **paradigme**.

### 6.2 État explicite

On va essayer de montrer les changements en rendant les états *explicites*. On appelle l'extension une **cellule** ou *cell* (c'est l'équivalent d'un *pointeur* en C).

Donc tout comme en C, on peut changer la référence en changeant le pointeur ou en changeant la valeur pointée.

#### Cell

Une cellule à une **identité** et un **contenu** :

- **identité** : c'est constant et correspond au nom/pointeur de la cellule
- **contenu** : c'est le contenu stocké qui lui peut varier.

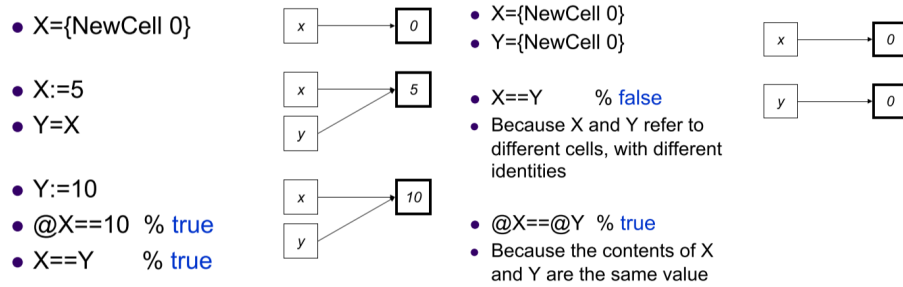
```

A=5; B=6
C={NewCell A}    // on crée une nouvelle cellule
{Browse @C}       // on montre le contenu avec @ ici 5
C:=B              // on ré-attribue le pointeur qui pointe vers B maintenant
{Browse @C}       // vaut 6

```

### 6.2.1 Exemple

Une chose à bien comprendre est que lorsqu'on réalise l'opération  $:=$ , on remplace le contenu de la *box*. Si on lie 2 cell via  $=$  on relie notre variable vers la même cell. Donc on peut modifier le contenu de la box via une des deux variables. (6.2.1)



## 6.3 Sémantique de cellules

On va maintenant étendre la machine abstraite afin d'expliquer comment les *cells* fonctionnent. Tout d'abord, nous avons maintenant **2 types de données**. Les données *immutables* ou *assignement unique* et les *mutables* ou *assignements multiples* (les cellules).

Une cellule est une paire de 2 *variables*.

- Une variable constante qui est lié au nom de la *cell*
- Une variable qui est lié au contenu de la cellule

Quand on assigne du nouveau contenu à une *cell*, on change la paire (seulement la deuxième variable).

Pour stocker le tout, on a 2 parties comme  $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$ .

- **Single assignement** :  $\sigma_1 = \{t, v, x = \xi, y = \zeta\}$
- **Multiple assignement** :  $\sigma_2 = \{x : t, y : w\}$

Quand on réalise l'opération  $X := Z$  on change  $\sigma_2$ .  $x : t \rightarrow x : z$

### 6.3.1 Programmation impérative

La **programmation impérative** est le nom du nouveau *paradigme*. C'est donc le cumul du *functional paradigm* et du concept de cellules.

La programmation impérative est fondamentale en **programmation orienté objet**.

#### Langage Kernel de la programmation impérative

```

<s> ::= skip
      | <s>1 <s>2
      | local <x> in <s> end
      | <x>1=<x>2
      | <x>=<v>
      | if <x> then <s>1 else <s>2 end
      | {<x>, <y>1, ..., <y>n}

```



```

| case <x> of <p> then <s>1 else <s>2 end
| {NewCell <y> <x>}
| <x>:=<y> _____ {Exchange <x> <y> <z>}
| <y>=@<x> _____
<v> ::= <number> | <procedure> | <record>
<number> ::= <int> | <float>
<procedure> ::= proc { $ <x>1, ..., <x>n } <s> end
<record>, <p> ::= <lit> | <lit>(<f>1:<x>1 ... <f>n:<x>n)

```

On remplace souvent l'attribution et l'appel du contenu par la fonction *Exchange* qui est une opération atomique (c'est-à-dire 2 opérations indissociables en 1).

## 6.4 Nécessité de l'état mutable

On dit qu'un programme est modulaire pour une partie si on peut changer cette dernière sans changer le reste du programme. **TODO ajouter plus d'info**

### 6.4.1 Comparaison

Dans la [programmation fonctionnelle](#)

- Un composant **ne change jamais** de comportement (c'est permanent).
- Mettre à jour un composant signifie que sont [interface](#) change et donc on doit mettre à jour d'autres composants.

Dans la [programmation impérative](#)

- Un composant peut être [mis à jour](#) sans changer son interface et donc on ne doit pas tout mettre à jour.
- Un composant peut changer de comportement à cause des actions passées sur une [cellule](#).

On peut avoir le meilleur des 2 mondes, en simplifiant les mises à jour de composants tout en s'assurant que les cellules se comportent comme on le souhaite.

## 6.5 Abstraction des données

C'est une des bases pour construire des logiciels complexes. L'abstraction des données est supportée par *les fonctions d'ordre supérieur, static scoping et l'état explicite*. La première chose à réaliser est l'[encapsulation](#).

### 6.5.1 Encapsulation

C'est le fait de donner à l'utilisateur qu'un nombre *limité* de fonctions et d'instanciations. Par exemple, une TV peut être commandé via une télécommande ayant un nombre limitée de fonction. Son fonctionnement est *encapsulé* dans sa boîte et l'utilisateur ne peut pas faire des modifications (*techniquement*) à l'intérieur.

#### Définition

C'est donc une partie d'un programme qui a une partie *extérieure* (au contact avec l'utilisateur) et une partie *intérieure* (fonctionnement interne). Toutes les opérations à l'intérieur doivent passer par l'interface pour être donné à l'utilisateur.

On limite les *fonctionnalités* et l'utilisateur doit suivre des règles établis de notre interface pour s'assurer que son résultat est bien correct.

L'[encapsulation](#) doit être [supporté](#) par le langage de programmation.

## Avantage

1. On garantit que si on utilise la partie *extérieure*, les résultats sont corrects
2. On simplifie l'utilisation du programme :
  - L'utilisateur **ne doit pas** savoir comment le programme fonctionne.
  - On peut **partitionner** notre programme pour simplifier le développement et l'utilisation
3. On simplifie le développement de grands programmes. Un **développeur** est responsable de **son implémentation** et peut la maintenir.
4. Un développeur ne doit pas connaître tout le code source pour utiliser les interfaces des autres développeurs.

### 6.5.2 Les 2 types

#### Objets

On regroupe dans une même entité les **valeurs et opérations**. Ex : la *télévision*.

#### Type de données abstraites

On sépare les **valeurs et opérations**. Ex : un *distributeur de boisson*  $\rightarrow$  (on utilise un pièce (fonction) et on reçoit un objet)

## 6.6 Le type de données abstraites

Donc cela consiste à un ensemble de *valeurs* et d'*opérations*. Donc par exemple les nombres et les opérations arithmétiques usuelles.

Dans la plupart des *ADT* les valeurs et les opérations n'ont pas **d'états**. Donc valeurs **constante** et les opérations **n'ont pas de mémoire interne**.

Donc par exemple pour un **stack**, on l'instantie via une fonction qui nous retourne le type de données.

### 6.6.1 Encapsulation

Le problème avec cette implémentation vu au-dessus d'un stack est que les données ne sont pas protégées donc peuvent être modifier outre les interfaces.

On va **protéger** les données. On utilisera un **Security Wrapper**. On utilise ça comme suit :

```
{NewWrapper Wrap Unwrap} //crée une nouvelle clé d'encryption
W={Wrap X} //encrypte
X={Unwrap W} //décrypte
```

C'est donc une sorte d'encryption/décryption. Ainsi, on cache et empêche l'accès aux valeurs car on va encrypter les données primaires. L'utilisateur ne peut invoquer les fonctions Wrap et Unwrap. Voici l'implémentation d'un stack :

```
local Wrap Unwrap in
  {NewWrapper Wrap Unwrap}

  fun {NewStack} {Wrap nil} end
  fun {Push W X} {Wrap X|{Unwrap W}} end
  fun {Pop W X} S={Unwrap W} in X=S.1 {Wrap S.2} end
  fun {IsEmpty W} {Unwrap W}==nil end
end
```

### 6.6.2 Remarque

Le premier langage de programmation à implémenter l'ADT est [CLU](#) et précédé de [Simula 67](#) en 1967.

Ces langages supportent également la protection, ... De nombreux langages actuels supportent implicitement l'ADT (par exemple : [JAVA](#), les nombres sont ADT et les objets en java ont des propriétés ADT)

## 6.7 Les objets

Cela représente donc à la fois un ensemble de [valeur et d'opérations](#). Donc au début, on instancie notre stack. Par la suite on réalise des opérations de la sorte :

```
S={NewStack}  
{S push(X)}  
{S pop(X)}  
{S isEmpty(B)}
```

Donc on voit que notre  $S$  est une sorte de fonction et instance, les deux à la fois. Concrètement, on implémente un objet pour un Stack comme ci-dessous :

```
fun {NewStack}  
  C={NewCell nil}  
  proc {Push X} C:=X|@C end  
  proc {Pop X} S=@C in C:=S.2 X=S.1 end  
  proc {IsEmpty B} B=(@C=nil) end  
in  
  proc {$ M}  
    case M of push(X) then {Push X}  
    [] pop(X) then {Pop X}  
    [] isEmpty(B) then {IsEmpty B} end  
  end  
end
```

Chaque appel à NewStack va donc créer un nouvel [objet](#). Pour réaliser ses procédures, on passe 1 seul argument à notre objet. Pas besoin de Wrapper car on ne peut accéder à ces fonctions que via la création de l'objet stack. On le dissimule donc via le [dynamic scoping](#).

### 6.7.1 Remarque

De nos jours, les objets sont *omniprésents* en programmation. Ils sont apparus avec [simula67](#) et a inspiré la plupart des langages actuels. Cependant, la plupart des langages orientés objets sont en réalité des ADT même s'ils incorporent les deux (*ils ont en plus les modules et composants*).

## 6.8 Les 4 types d'abstraction de données

Les 2 à ajouter sont :

1. Les types de données abstraites **avec état** (*stateful ADT*)
  - (a) Très utilisé en C mais sans l'*encapsulation* puisqu'impossible en C.
  - (b) On les retrouve dans les classes Java avec des attributs *statiques*.

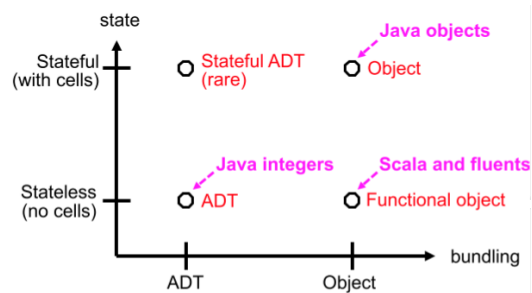


FIGURE 6.1 – Résumé de l'abstraction des données

2. Les objets **sans état** (*functional objects*) :
  - (a) Les objets sont **immutables** Donc appeler un objet, retourne un **nouvel** objet avec une **nouvelle** valeur
  - (b) Plus en plus à la mode (*oue oue Scala #EPFL*)

### 6.8.1 Functional Objects

#### Constructions

Un *objet fonctionnel* n'a pas de sécurité (pas de cellules ni de wrappers) cela utilise que de la programmation **d'ordre supérieur**.

```
local
  fun {StackObject S}
    fun {Push E} {StackObject E|S} end
    fun {Pop S1}
      case S of X|T then S1={StackObject T} X end end
    fun {IsEmpty} S==nil end
  in
    stack(push:Push pop:Pop isEmpty:IsEmpty)
  end
in
  fun {NewStack} {StackObject nil} end
end
```

#### En Scala

C'est une sorte de forme hybride entre programmation fonctionnel et orienté objet. Scala supporte les 2 *paradigmes*.

En Scala, on peut définir des objets immutables qui retournent, *eux-mêmes*, des objets immutables. Les objets immutables sont des objets *fonctionnels*(*donc pas de changement*).

### 6.8.2 Stateful ADT

Voici l'implémentation d'un stack en *stateful ADT* :

```
local Wrap Unwrap
  {NewWrapper Wrap Unwrap}
  fun {NewStack} {Wrap {NewCell nil}} end
  proc {Push S E} C={Unwrap S} in C:=E|@C end
  fun {Pop S} C={Unwrap S} in
    case @C of X|S1 then C:=S1 X end end
  fun {IsEmpty S} @C={Unwrap S}==nil end
in
  Stack=stack(new:NewStack push:Push pop:Pop isEmpty:IsEmpty)
end
```

On utilise donc à la fois une **cellule** et un **wrapper**. Pour mettre à jour un stack, on n'utilise pas de *wrapper* car on va utiliser des *cellules* (ex : pour *Push*, *Pop* et *IsEmpty*)

## 6.9 Remarques supplémentaires

- Java est destiné pour supporter les abstractions de données :
  1. True data abstraction (encapsulation, garbage collector)
  2. Tout entité en Java est un objet ou un **ADT**
  3. Supporte les principes de design orienté objet.
- Scala a 2 grands principes :
  1. Séparation entre les états mutables et immutables (programmation fonctionnelle)
  2. Tout est un objet (même les fonctions)

Scala, en plus de fonctionner sur la JVM, est un successeur important de Java et est très versatile via sa puissance expressive.

## 6.10 Conclusion

L'abstraction des données est un concept **nécessaire** pour construire des programmes plus *complexes*.

- L'abstraction des données est construite sur : *la programmation d'ordre supérieure, le static scoping, les états explicites, les records et les clés secrètes*
- L'abstraction des données est définie via ces concepts. Ainsi, on connaît la sémantique de l'abstraction de donnée.

Il existe 4 types d'abstraction des données orientées selon 2 axes :

1. Objet et ADTs sur un axe
2. Stateful et Stateless

Il existe 2 types d'abstraction des données qui sont dominantes mais les 2 dernières sont toujours utiles pour certains types d'abstraction.

Quasi tous les langages de programmation modernes supportent l'abstraction. Ils supportent généralement **plusieurs** types. Ils sont souvent plus des langages "*orientés abstractions des données*" que simplement "*objet orienté*".

# Chapitre 7

## Les exceptions

Une exception est lorsqu'un programme ne se comporte pas comme prévu ou que les inputs ne peuvent pas être utilisé (*par exemple* : division par zéro, fichier non-existant, ...)  
Ainsi, on peut faire fonctionner le programme même si il rencontre une erreur car celle-ci peut être "intercepté" via une **exception**.

### 7.1 Fonctionnement

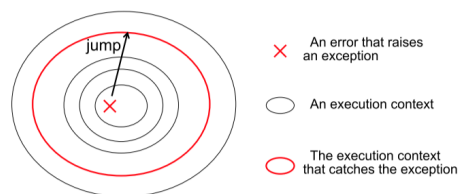
On voudrait donc que le programme ne cesse pas quand il rencontre un soucis et on veut qu'une erreur impacte *au minimum* le programme.  
On utilise le principe du **confinement**.

#### Le confinement

Donc notre programme est un **ensemble imbriqué de contexte d'exécution**.

Donc si une erreur apparaît, elle influence le contexte et pas tout le programme.

On protège chaque exécution par des *exceptions handlers* qui sont comme des "douaniers" entre chaque zone de contexte. Ainsi, on s'assure que l'erreur est contenu et minimisée.



#### 7.1.1 En Oz

On a les *try* et *raise* qui sont deux nouvelles instructions :

```
try <s1> catch <y> then <s2> end      #On crée l'intercepteur  
raise <x> end                        #On établit une erreur
```

#### Try et Raise

Le *try* met un *marker* sur le stack et puis exécute l'instruction *< S1 >*.

Si il n'y a aucune erreur, l'instruction s'exécute normalement et le *marker* est enlevé à la fin.

Si *raise* est appelé pour signifier une erreur, le stack d'instructions est vidé jusqu'au *marker*. Ensuite, on exécute *< s2 >*. Dans notre exemple, *< y >* est la même erreur que *< x >*. De plus, la portée de *< y >* est couvre exactement jusqu'à *< s2 >*.

## Finally

En plus de ces deux instructions, on peut rajouter une instruction s'appelant *finally* qui comporte des étapes à exécuter peu importe si une erreur arrive ou pas.

### 7.1.2 En Java

C'est un objet hérité de la class des *Exceptions* (elle-même sous-classe des *Throwable*) et il existe 2 types d'exceptions :

- **Checked exceptions** : le compilateur vérifie que les méthodes ne *throw* que des exceptions déclaré pour la classe
- **Unchecked exceptions** : pour gérer les exceptions que le compilateur ne peut pas vérifier (*les rayons cosmiques*). Elles héritent des *RuntimeException* et *Error*.

Donc en tant que développeur on check les erreurs *checked*.

### 7.1.3 Utilisation correcte

On n'utilise pas une exception pour un comportement **attendu ou prévisible**. C'est-à-dire que, par exemple, on ne lit pas un fichier jusqu'au moment d'une erreur. Non, le fait que le fichier se finisse est prévisible et ne demande pas d'exception.

## Chapitre 8

# Programmation simultanée

On a besoin de la *programmation simultanée* car notre monde progresse avec le [temps](#) et chaque chose progresse indépendamment des autres.

### Simultanéité en programmation

1. [Système distribuée](#) : relié les pc entre eux par un réseau (data center, ...)
  - (a) Une activité en simultanée est appelée un *noeud de calcul*.
  - (b) Chaque *noeud de calcul* a ses propres ressources (CPU, mémoire, ...).
2. [Système d'exploitation](#) : le controle d'un pc
  - (a) Une activité en simultanée est appelée un *processus*.
  - (b) Tous les *processus* partagent les mêmes ressources mais ont des espaces allouées de mémoires distincts.
3. [Processus](#) : l'exécution d'un seul programme
  - (a) Une activité en simultanée est appelée un *thread*.
  - (b) Les *threads* partagent le même espace mémoire.

Ce principe est très naturel car est présent tout autour de nous. Une activités indépendante est donc [simultanée](#). Cependant, cela doit être supporté par le langage lui-même.

## 8.1 Les bases

On peut avoir des événements qui progressent en même temps mais certaines activités doivent pouvoir [communiquer](#) entre elle et se [synchroniser](#).

### Complexité

On peut faire face à de nombreux soucis en utilisant des *threads* : nondeterminism, race conditions, reentrancy, deadlocks, livelocks, fairness, consistency, shared data.

Mais, on peut faire en sorte que la *programmation simultanée* soit aussi simple que la [programmation séquentielle](#).

Il faut que le paradigme soit correctement choisi. On verra donc le [deterministic dataflow](#) qui est une forme de programmation fonctionnelle.



## 8.2 Deterministic dataflow

Les 3 grands paradigmes de la programmation simultanée :

1. **Deterministic dataflow** : (*le plus simple et meilleur*)
  - Aussi appelé le *functional dataflow*.
  - Supporte toutes les techniques de la programmation fonctionnelle.
2. **Message-passing concurrency** : (Erlang et Scala)
  - Les activités envoient des messages entre eux.
3. **Shared-state concurrency** : (moniteurs Java)
  - Les activités partagent les mêmes données et essaient de travailler ensemble.
  - Plutôt compliqué et encore fort utilisé aujourd'hui.

### Variable non-liée

C'est quand on crée une variable dans la mémoire sans qu'elle soit liée à une valeur.

En Oz, quand on veut afficher une variable qui n'est pas encore déclarée, Oz va attendre jusqu'à ce qu'on déclare la variable. Donc ci-dessous, Oz va s'attendre juste avant l'addition de  $X$  :

```
local X Y in
  Y=X+1
  {Browse Y}
end
```

Donc, un Thread peut interagir sur ce code si il attribue une valeur à  $X$ . C'est en cela que correspond le [dataflow execution](#)

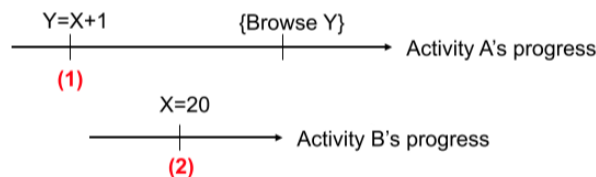


FIGURE 8.1 – Exemple d'exécution

L'activité A attend à (1) jusqu'à ce que l'activité B arrive à (2).

## 8.3 Threads

C'est donc cela qui nous permet d'implémenter la programmation simultanée en Oz. C'est donc un *fil* d'exécution qui s'exécute en même temps.

Chaque *Threads* fonctionnent de manière [séquentielle](#) et sont [indépendants](#) l'un de l'autre.

Cependant il faut bien comprendre quelques détails :

- Il n'y a aucun ordre spécifique pour l'exécution des Threads.
- Le système exécute tous les threads en même temps en utilisant l'[interleaving semantics](#). Donc on a un thread qui exécute un à un les threads et change continuellement.
- Le système garantit que chaque Thread reçoit les ressources égales et nécessaires.

Les Threads peuvent *communiquer* entre eux si ils partagent une variable.

### Oz

En Oz, créer des Threads est très peu "énergivores" donc on peut se permettre d'en créer un grand nombre.

De plus, on écrit un Thread comme :

```
thread <s> end
```

Donc on peut créer ce programme :

```
declare X
thread {Browse X+1} end
thread {X=1} end
```

Il y a donc 2 façons que les Threads se lancent : ligne 2  $\rightarrow$  ligne 3 ou ligne 3  $\rightarrow$  ligne 2. Cependant, le même résultat est le même, 2 est affiché.

### **Le Browser**

Le *Browser* en Oz s'exécute avec son propre Thread.

Pour chaque variable non-liée qui est affiché, on crée un thread dans le *Browser* qui attend jusqu'à ce qu'on lui attribue une valeur.

Cependant, cela ne fonctionne pas avec les *cellules*. Le Browser utilise le paradigme "*functional dataflow*" et il ne regarde donc pas l'intérieur de la cellule.

## Chapitre 9

# Conseils pour la syntaxe d'Oz

Voici une liste d'astuces et de choses importantes à savoir sur Oz :

- Déclarer vos fonctions et variables avec une **majuscule** au début !
- Une procédure est une fonction qui ne retourne **rien**.
- Pour retourner une valeur dans une fonction, on écrit une ligne où on ne fait *aucune* assignation ou opération, ... (Ex : on veut retourner *X* on écrit sur une ligne *X* tout seul)
- Pour éviter d'avoir des surprises, toujours bien terminer sa liste par un *|nil*
- On peut toujours utiliser une fonction récursive avec **accumulateur** pour une fonction récursive. C'est même conseillé !
- On peut écrire en langage Kernel directement en oz
- On peut faire des listes de procédures via la notation Kernel d'une procédure
- Une liste est un tuple de type (1 :Num 2 :(1 :Num 2 :nil))
- Pour être plus "opti" utiliser les local in.
- Si notre code est le même que celui du voisin mais que vous avez des résultats différents, *relancez emacs ou VScode*. Nettoyer le buffer et feed tout le code dedans.
- Pour être plus *productif*, télécharger "Powertoys" sur Windows et activer l'option "**toujours afficher**" (**always on top**).