



# Interprétation et compilation

## Chapitre 8 Analyse lexicale



Pablo Rauzy <pr@up8.edu>  
pablo.rauzy.name/teaching/ic

# Analyse lexicale

---

- ▶ L'*analyse lexicale* est la première étape de la lecture d'un code source.
- ▶ La plupart des langages de programmation ont un code source textuel.
- ▶ C'est à dire qu'au niveau des données brutes, le code source est une chaîne de caractères.
- ▶ Le rôle de l'analyse lexicale est de découper cette chaîne *unités lexicales*.

- ▶ Une *unité lexicale* est en quelques sortes un “mot” du langage de programmation.
- ▶ Par la suite, l’analyse syntaxique vérifiera que ces “mots” sont utilisés pour former des phrases grammaticalement correctes.
- ▶ Après ça, l’analyse sémantique vérifiera que ces phrases ont effectivement un sens.

- Quand on parle d'*unité lexicale* on peut parler de quatre choses :
- un *lexème* : "+", "foo", "bar", "42", "if", "==", "=", "true" ;
  - un *type* d'unité : **Plus**, **Ident**, **Ident**, **Number**, **If**, **Equal**, **Assign**, **True** ;
  - une *valeur* : soit une fonction "built-in", soit une référence à une table d'identifiants, soit directement une valeur (comme pour les nombres).
  - un *modèle* qui sert à spécifier l'unité lexicale : le lexème directement pour les mots clefs, "une suite de chiffre" pour les nombres entiers positifs, etc.

- ▶ On va donc avoir besoin d'au moins deux choses :
  1. spécifier les modèles,
  2. reconnaître ces modèles.
  
- ▶ Quel outil pourrait-on mettre en œuvre pour la première étape ?

- ▶ Une *expression régulière*, ou “*regex*”, est une notation qui décrit un ensemble de chaîne de caractères.
- ▶ On va s’en servir pour spécifier nos modèles de lexèmes.

# Alphabets

- ▶ Un *alphabet* est un ensemble fini de symboles.
- ▶ On le note souvent  $\Sigma$ .
- ▶ Exemple :  $\Sigma = \{a, b\}$ .



## Mots

- ▶ Un *mot* sur un alphabet  $\Sigma$  est une suite finie de symboles de  $\Sigma$ .
- ▶ On note  $\varepsilon$  le mot vide.
- ▶ Exemple :  $\varepsilon, a, b, ab, aaaaa, ababababababab, bbba$ .

## Langages

- ▶ Un *langage* sur un alphabet  $\Sigma$  est un ensemble de mot sur  $\Sigma$ .
- ▶ On note  $\emptyset$  le langage vide (qui ne contient aucun mot).
- ▶ Exemple :  $\emptyset$ ,  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{a, aa, aaa, aaaa, aaaaa\}$ ,  $\{a, b, ab, ba\}$ .

# Opérations

- ▶ On peut utiliser des *opérations* sur les langages pour en construire de nouveaux.
- ▶ On distingue trois opérations :
  - le produit (ou concaténation),
  - la somme (ou l'union),
  - l'étoile de Kleene (ou fermeture de Kleene).

## Concaténation

- ▶ Soit  $L$  et  $M$  deux langages sur un alphabet  $\Sigma$ .
- ▶ Le produit  $LM$  correspond au langage obtenu en concaténant deux à deux les éléments de  $L$  et  $M$ .
- ▶ Formellement,  $LM = \{xy \mid x \in L \wedge y \in M\}$ .

## Union

- ▶ Soit  $L$  et  $M$  deux langages sur un alphabet  $\Sigma$ .
- ▶ La somme  $L \cup M$  correspond à l'union des deux langages  $L$  et  $M$ .
- ▶ Formellement,  $L \cup M = \{x \mid x \in L \vee x \in M\}$ .

## Étoile

- ▶ Soit  $L$  un langage sur un alphabet  $\Sigma$ .
- ▶ L'étoile  $L^*$  correspond à l'ensemble de concaténations possibles de mots de  $L$ .
- ▶ Formellement,  $L^* = \{x_1 x_2 \cdots x_n \mid x_i \in L, n \geq 0 \in \mathbb{N}\}$ .

1. Donnez l'alphabet et le langage des nombres écrits en binaire.
2. Soit  $\Sigma$  un alphabet et  $L$  le langage de tous les mots de un symbole.
  - Donnez le langage des mots d'exactly 3 symboles.
  - Donnez le langage des mots d'au moins 2 symboles.
  - Donnez le langage des mots de 2 ou 3 symboles.

- ▶ En pratique on utilise des notations similaires à celles des regexps dans les langages de programmation.
  - $\epsilon$  note le langage  $\{\epsilon\}$ ,
  - Si  $a \in \Sigma$ , alors  $a$  note le langage  $\{a\}$ ,
  - Si  $x$  et  $y$  sont deux regexps qui définissent respectivement les langages  $L$  et  $M$ , alors :
    - $(x)|(y)$  note le langage  $L \cup M$ ,
    - $(x)(y)$  note le langage  $LM$ ,
    - $(x)^*$  note le langage  $L^*$ ,
    - $(x)$  note le langage  $L$ , c'est à dire que les parenthèses ne changent rien.
  - L'ordre de priorité des opérateurs est  $*$  puis concaténation puis  $|$ , et ils sont associatifs à gauche.



## Raccourcis

- Si  $x$  est une regexp qui définit le langage  $L$ , alors :
- $(x)^n$ , raccourci pour  $xx \cdots x$  ( $n$  fois), définit  $L^n$  ;
  - $(x)^+$ , raccourci pour  $xx^*$ , définit  $LL^*$  ;
  - $(x)^?$ , raccourci pour  $x|\epsilon$ , définit  $L \cup \{\epsilon\}$ .

- Soit  $\Sigma$  l'ensemble des 26 lettres minuscules de l'alphabet latin. Donnez les expressions régulières les plus courtes possibles qui reconnaissent exactement :
1. "non", "noon", "nooon", "nooooo", etc.
  2. "oui", "ouioui", "ouiouioui", etc.
  3. "oui", "non", et "nan"
  4. "banane" et "patate".

## Langages réguliers

- ▶ En théorie des langages formels, les langages réguliers sont ceux qu'on peut spécifier avec une expression régulière.
- ▶ Étant donné un alphabet  $\Sigma$ , l'ensemble des langages réguliers sur cet alphabet est le plus petit stable pour les opérations régulières et qui contient le langage vide  $\emptyset$ , les langages singleton du mot vide  $\varepsilon$  et de chaque symbole de  $\Sigma$ .

# Langages non-réguliers

- ▶ Pouvez-vous donner un exemple de langage qui ne soit pas régulier ?

## Langages non-réguliers

- ▶ Pouvez-vous donner un exemple de langage qui ne soit pas régulier ?
- ▶ Les *langages de Dyck* sont l'ensemble des mots bien parenthésés sur un alphabet composé de parenthèses ouvrantes et fermantes.
  - Soit l'alphabet  $D = \{ (, ) \}$ .
  - $(( ))()$  est bien parenthésé, c'est un mot de Dyck.
  - $())(($  ne l'est pas.
- ▶ Ils ne sont pas réguliers : intuitivement on a besoin d'un "compteur" (d'une pile) pour les spécifier.
- ▶ Pourtant ce type de langage est assez important, en particulier pour la compilation, voyez-vous pourquoi ?

## Langages non-réguliers

- ▶ Pouvez-vous donner un exemple de langage qui ne soit pas régulier ?
- ▶ Les *langages de Dyck* sont l'ensemble des mots bien parenthésés sur un alphabet composé de parenthèses ouvrantes et fermantes.
  - Soit l'alphabet  $D = \{ (, ) \}$ .
  - $(( ))()$  est bien parenthésé, c'est un mot de Dyck.
  - $()(($  ne l'est pas.
- ▶ Ils ne sont pas réguliers : intuitivement on a besoin d'un "compteur" (d'une pile) pour les spécifier.
- ▶ Pourtant ce type de langage est assez important, en particulier pour la compilation, voyez-vous pourquoi ?
- ▶ On a besoin de vérifier la syntaxe des langages de programmation !
- ▶ Ce genre de problème se règlera donc lors de l'analyse syntaxique.

# Hiérarchie de Chomsky

- ▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).
- ▶ Elle définit quatre types de grammaire :

# Hiérarchie de Chomsky

- ▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).
- ▶ Elle définit quatre types de grammaire :
  - type 0, pour les langages récursivement énumérables

Machines de Turing



# Hiérarchie de Chomsky

- ▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).
- ▶ Elle définit quatre types de grammaire :
  - type 0, pour les langages récursivement énumérables
  - type 1, pour les langages contextuels

Machines de Turing  
Automates linéairement bornés

# Hiérarchie de Chomsky

▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).

▶ Elle définit quatre types de grammaire :

- type 0, pour les langages récursivement énumérables
- type 1, pour les langages contextuels
- type 2, pour les langages algébriques

Machines de Turing  
Automates linéairement bornés  
Automates à pile (non déterministes)

# Hiérarchie de Chomsky

▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).

▶ Elle définit quatre types de grammaire :

- type 0, pour les langages récursivement énumérables
- type 1, pour les langages contextuels
- type 2, pour les langages algébriques
- type 3, pour les langages réguliers

Machines de Turing  
Automates linéairement bornés  
Automates à pile (non déterministes)  
Automates finis

# Hiérarchie de Chomsky

- ▶ La *hiérarchie de Chomsky* est une classification des *grammaires formelles* (et donc les langages formels engendrés par ces grammaires).
- ▶ Elle définit quatre types de grammaire :
  - type 0, pour les langages récursivement énumérables
  - type 1, pour les langages contextuels
  - type 2, pour les langages algébriques
  - type 3, pour les langages réguliers
- ▶ Ce sont ces derniers, les moins puissants, qui nous intéressent aujourd'hui.

Machines de Turing  
Automates linéairement bornés  
Automates à pile (non déterministes)  
Automates finis

- ▶ Maintenant qu'on est capable de spécifier des modèles d'unités lexicales, on voudrait être capable de les reconnaître.
- ▶ Les conditions sont les suivantes :
  - on lit le code source un caractère à la fois,
  - on lit toujours autant qu'on peut (on est glouton),
  - on a le droit de regarder un caractère d'avance sans le consommer.

# Diagrammes de transition

- ▶ Un travail préliminaire à l'implémentation de notre analyseur lexical est la réalisation de ce qu'on appelle un diagramme de transition.
- ▶ Le diagramme se présente sous forme de graphe :
  - les sommets correspondent à des états,
  - les arêtes (orientées) correspondent à des lectures de caractères, et sont étiquetées par ceux-ci,
  - un des états est l'état initial,
  - les états correspondant à la reconnaissance complète d'une unité lexicale sont finaux,
  - une étiquette spéciale  $\star$  correspond à un joker (qui lit n'importe quel caractère, auquel cas on a seulement regardé le caractère sans le consommer).

## TD : Exemple

- ▶ Admettons qu'on ait un langage dans lequel on a :
  - les symboles `0`, `1`, `&&`, `||`, `!`, `(`, `)` ;
  - des noms de variables (que des lettres).
  
- ▶ Dessinez un diagramme de transition pour les symboles.

# Implémentation

- ▶ Regardons ensemble une implémentation “à la main” d’un analyseur lexical pour ce petit langage (fichier `hand.ml`).



## Encodage sous forme d'automates

- Un *automate fini* est défini par :
- un ensemble fini d'états  $E$ ,
  - un alphabet  $\Sigma$ ,
  - une fonction de transition  $tr : E \times \Sigma \rightarrow E$ ,
  - un état initial  $s \in E$ ,
  - un ensemble d'états finaux  $F \subseteq E$ .

## Encodage sous forme d'automates

- ▶ Un *automate fini* est défini par :
  - un ensemble fini d'états  $E$ ,
  - un alphabet  $\Sigma$ ,
  - une fonction de transition  $tr : E \times \Sigma \rightarrow E$ ,
  - un état initial  $s \in E$ ,
  - un ensemble d'états finaux  $F \subseteq E$ .
  
- ▶ On peut représenter un automate sous forme de graphe :
  - chaque sommet correspond à un état,
  - il y a une arête de  $e_1$  à  $e_2$  ssi  $\exists c \in \Sigma, tr(e_1, c) = e_2$ .

## Encodage sous forme d'automates

- ▶ Un *automate fini* est défini par :
  - un ensemble fini d'états  $E$ ,
  - un alphabet  $\Sigma$ ,
  - une fonction de transition  $tr : E \times \Sigma \rightarrow E$ ,
  - un état initial  $s \in E$ ,
  - un ensemble d'états finaux  $F \subseteq E$ .
  
- ▶ On peut représenter un automate sous forme de graphe :
  - chaque sommet correspond à un état,
  - il y a une arête de  $e_1$  à  $e_2$  ssi  $\exists c \in \Sigma, tr(e_1, c) = e_2$ .
  
- ▶ Cela correspond exactement à nos diagrammes de transition !

# Implémentations

- ▶ Il y a différentes façons d'implémenter un automate fini, plus ou moins efficace.
- ▶ On peut bien sûr l'implémenter comme on l'a fait précédemment, "en dur".
- ▶ On peut aussi choisir d'implémenter une fonction de transition générique qui travaille avec une structure représentant la table des transitions.
- ▶ Si cette fonction est très simple, l'exécution de l'automate sera plus efficace.
- ▶ Comme d'habitude en *complexité*, il y a un compromis entre *temps* et *espace*.
  
- ▶ Regardons ensemble une implémentation d'analyseur lexical sous forme d'automate (fichier `auto.ml`).

- ▶ Comme vous avez pu le constater, construire la table de transition est long et fastidieux.
- ▶ L'outil `lex` a été créé pour ça en 1975 par Mike E. Lest et Eric Schmidt.
- ▶ Il s'agit à l'origine d'un outils propriétaire pour le langage C.
- ▶ Depuis, il y a une version libre développée par GNU (`flex`), et des implémentations ont été écrites pour virtuellement tous les autres langages.

- ▶ <https://ocaml.org/manual/lex yacc.html>
- ▶ Regardons ensemble comment créer des lexers avec OCaml (fichier `lexer.mll`).