

Rappels et compléments de compilation  
Analyses lexicale et syntaxique  
Cours de Compilation Avancée (MI190)

Benjamin Canou  
Université Pierre et Marie Curie

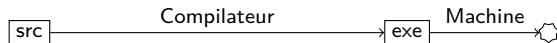
Année 2012/2013 – Semaine 1

# Rappels

# Qu'est-ce que la compilation ?

Principe de base de la compilation :

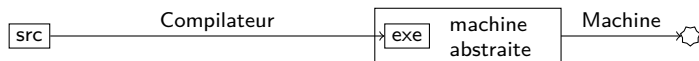
Traduction du **code source** vers du **code machine** (*code natif*).



# Qu'est-ce que la compilation ?

Compilation pour une machine virtuelle (VM):

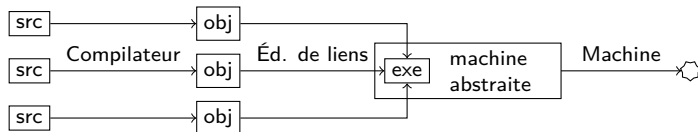
Production de **code-octet** (*bytecode*) interprété ou compilé à la volée vers du code machine.



# Qu'est-ce que la compilation ?

Compilation séparée :

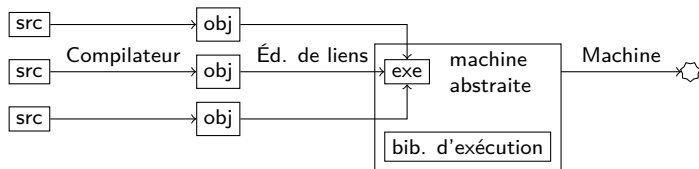
Liaison de **fichiers objet**, un fichier objet par **unité de compilation** du langage (*classe, module, package, etc.*).



# Qu'est-ce que la compilation ?

Utilisation d'une **bibliothèque d'exécution** (*runtime*) :  
pour le support des langages de haut niveau (*gestion mémoire, entrées/sorties, chargement dynamique, appels de méthodes, continuations, etc.*).

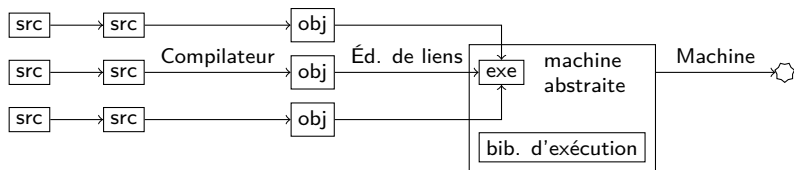
- ▶ **VM** : intégré dans la machine virtuelle
- ▶ **Code natif** : lié dans l'exécutable



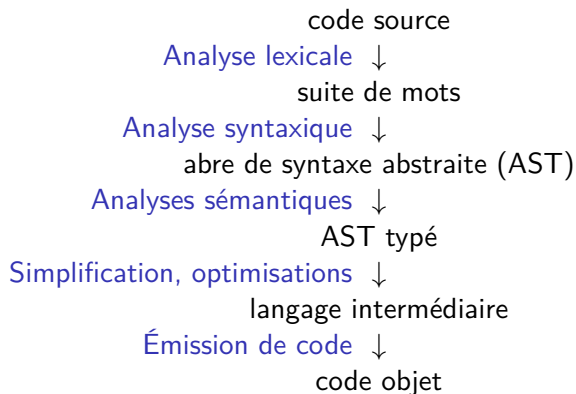
# Qu'est-ce que la compilation ?

Transformations source-à-source :

- ▶ **Préprocesseur** : même langage de sortie, pour nettoyer, appliquer des macros, etc.
- ▶ **Traduction (compilation)** : utilisation d'un langage existant comme cible. Comme pour une VM, il faut éventuellement une bibliothèque d'exécution.



# Chaîne de compilation classique





# Informations sur le cours

## Première partie :

Cours par **Benjamin Canou**, TD/TME par **Philippe Trebuchet**

- ▶ Cours 1 : Rappels, analyseurs
- ▶ Cours 2 et 3 : Machines virtuelles et bibliothèques d'exécution
- ▶ Cours 4 : Modèles mémoire
- ▶ Cours 5 : Contrôle de haut niveau, parallélisme

## Deuxième partie :

Cours et TD/TME par **Karine Heydemann**

- ▶ Mémoire cache et optimisation pour la hiérarchie mémoire.
- ▶ Architecture matérielle basée sur le parallélisme d'instructions.
- ▶ Ordonnancement et optimisation pour le parallélisme d'instructions.

## Notation :

- ▶ Un examen 60%
- ▶ Un projet par partie (20% + 20%)

# Analyses lexicale et syntaxique

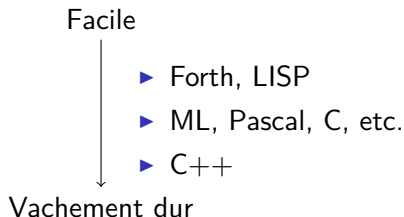
# Syntaxe d'un langage

Les langages de programmation sont plus simples que les langues humaines, mais sont décrits de la même façon.

- ▶ **Langage** : ensemble des phrases possibles.
- ▶ **Phrase** : suite de mots correcte par rapport à une grammaire.
- ▶ **Mot** : élément d'un dictionnaire fini.

# Classification des langages (1/4)

Suivant la complexité de la grammaire, il peut être plus ou moins difficile de vérifier qu'une phrase appartient au langage.



Plus une grammaire est difficile, plus

- ▶ la complexité (temps et espace) des algorithmes pour la traiter augmente,
- ▶ les **automates** permettant de les reconnaître sont compliqués,
- ▶ le nombre de propriétés indécidables augmente,
- ▶ les messages d'erreur des **parseurs** sont illisibles.

## Classification des langages (2/4)

Notation formelle d'une grammaire :

- ▶  $T$  et  $N$  : **symboles terminaux** et **non terminaux**.
- ▶  $R$  : Ensemble de **règles** :  $\text{Seq}(T \cup N) \rightarrow \text{Seq}(T \cup N)$ 
  - ▶ lecture  $\rightarrow$  : production (énumération)
  - ▶ lecture  $\leftarrow$  : parsing (reconnaissance)
- ▶  $S$  : un symbole de départ.

Exemple 1 :

- ▶  $T = \{a, b, c, d\}$ ,  $N = \{S, X\}$
- ▶  $R = \left\{ \begin{array}{llll} S \rightarrow aS, & S \rightarrow bS, & S \rightarrow cX, & S \rightarrow dX, \\ X \rightarrow cX, & X \rightarrow dX, & X \rightarrow \epsilon, & S \rightarrow \epsilon \end{array} \right\}$
- ▶ Productions valides :
  - ▶  $S \rightarrow \epsilon$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aS \rightarrow aaS \rightarrow aacX \rightarrow aacdX \rightarrow aacd$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aS \rightarrow adX \rightarrow ad$ , etc.
- ▶ Langage :  $[ab]^* [cd]^*$

## Classification des langages (2/4)

Notation formelle d'une grammaire :

- ▶  $T$  et  $N$  : **symboles terminaux** et **non terminaux**.
- ▶  $R$  : Ensemble de **règles** :  $\text{Seq}(T \cup N) \rightarrow \text{Seq}(T \cup N)$ 
  - ▶ lecture  $\rightarrow$  : production (énumération)
  - ▶ lecture  $\leftarrow$  : parsing (reconnaissance)
- ▶  $S$  : un symbole de départ.

Exemple 2 :

- ▶  $T = \{a, b, c\}$ ,  $N = \{S\}$
- ▶  $R = \{S \rightarrow c, S \rightarrow aSb\}$
- ▶ Productions valides :
  - ▶  $S \rightarrow c$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aSb \rightarrow acb$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aacbb$ , etc.
- ▶ Langage :  $a^n cb^n$

## Classification des langages (2/4)

Notation formelle d'une grammaire :

- ▶  $T$  et  $N$  : **symboles terminaux** et **non terminaux**.
- ▶  $R$  : Ensemble de **règles** :  $\text{Seq}(T \cup N) \rightarrow \text{Seq}(T \cup N)$ 
  - ▶ lecture  $\rightarrow$  : production (énumération)
  - ▶ lecture  $\leftarrow$  : parsing (reconnaissance)
- ▶  $S$  : un symbole de départ.

Exemple 3 :

- ▶  $T = \{a, b, c\}$ ,  $N = \{S\}$
- ▶  $R = \{S \rightarrow aSb, aSb \rightarrow aaSbb, aSb \rightarrow c\}$
- ▶ Productions valides :
  - ▶  $S \rightarrow aSb \rightarrow c$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow acb$ ,
  - ▶  $S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aaSbbb \rightarrow aacbb$ , etc.
- ▶ Langage :  $a^n cb^n$  (plus difficile à voir)

# Classification des langages (3/4)

Hiérarchie de Chomsky :

Grammaires rationnelles

$\subset$

Grammaires hors-contexte

$\subset$

Grammaires contextuelles

$\subset$

Grammaires générales



# Classification des langages (3/4)

Hiérarchie de Chomsky :

Grammaires rationnelles  
Automate fini

$\subset$

Grammaires hors-contexte  
Automate à pile

$\subset$

Grammaires contextuelles  
Machine de turing à mémoire bornée

$\subset$

Grammaires générales  
Machine de turing

# Classification des langages (3/4)

Hiérarchie de Chomsky :

Grammaires rationnelles

Automate fini

Règles de la forme :  $N \rightarrow t, N \rightarrow tN$

$\subset$

Grammaires hors-contexte

Automate à pile

Règles de la forme :  $N \rightarrow s, s \in \text{Seq}(T \cup N)$

$\subset$

Grammaires contextuelles

Machine de turing à mémoire bornée

Règles de la forme :  $s_1 N s_2 \rightarrow s_1 s s_2, (s, s_1, s_2) \in \text{Seq}(T \cup N)^3$

$\subset$

Grammaires générales

Machine de turing

Règles de la forme : sans restriction

## Classification des langages (4/4)

Notation courante : **BNF** (*Backus–Naur Form*)

- ▶ Règles de la forme  $\langle \text{non-term} \rangle ::= \text{expression}$
- ▶ Expressions : séquence  $(e_1 e_2)$ , alternative  $e_1 \mid e_2$
- ▶ Terminaux littéraux fixes : "alors"
- ▶ Ensembles de terminaux :  $\langle \text{integer} \rangle$

Exemple (opérations complètement parenthésées) :

```
 $\langle \text{expr} \rangle ::= "(" \langle \text{expr} \rangle \langle \text{op} \rangle \langle \text{expr} \rangle "$ 
            $| \langle \text{integer} \rangle$ 
            $| \langle \text{prim} \rangle "(" \langle \text{args} \rangle "$ 
            $| "si" \langle \text{expr} \rangle "alors" \langle \text{expr} \rangle "sinon" \langle \text{expr} \rangle$ 
 $\langle \text{op} \rangle ::= "+" \mid "-" \mid "/" \mid "*"$ 
 $\langle \text{args} \rangle ::= \langle \text{expr} \rangle "," \langle \text{args} \rangle$ 
            $| \langle \text{expr} \rangle$ 
 $\langle \text{prim} \rangle ::= "sqrt" \mid "cos" \mid "sin" \mid "tan"$ 
```

# Classification des langages : langages de programmation

Pour les langages de programmation, on utilise les deux classes les plus simples de grammaires

1. *Analyse lexicale (lexing)* : On définit la grammaire des **lexèmes** du langage, dont les **terminaux** sont les caractères.  
Assez simple  $\Rightarrow$  grammaire rationnelle.
2. *Analyse grammaticale (parsing)* : On définit ensuite la grammaire des expressions, en utilisant les lexèmes déjà reconnus comme terminaux.  
Plus compliqué  $\rightarrow$  grammaire hors-contexte.

Une fois la grammaire définie, on utilise un **générateur d'analyseur** qui vérifie la grammaire, et engendre un analyseur.

# Analyse lexicale

Générateur d'analyseur lexical : `lex`, `ocamllex`, `ulex`, etc.

Prend en entrée :

- ▶ Un ensemble d'expressions rationnelles
- ▶ Pour chaque expression, du code appelé lorsque celle-ci a permis de reconnaître un mot

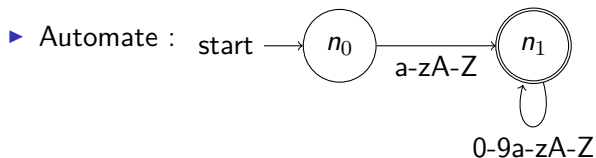
On fait la liaison avec l'analyse grammaticale grâce à :

- ▶ Un ensemble fini de lexèmes
- ▶ Les types de données associées le cas échéant  
ex: `BEGIN` `END` `INT<int>` `IDENT<string>` ...
- ▶ Le code de chaque expression devra produire un de ces lexèmes.

# Exemples d'expressions (1/2)

## Identifiants :

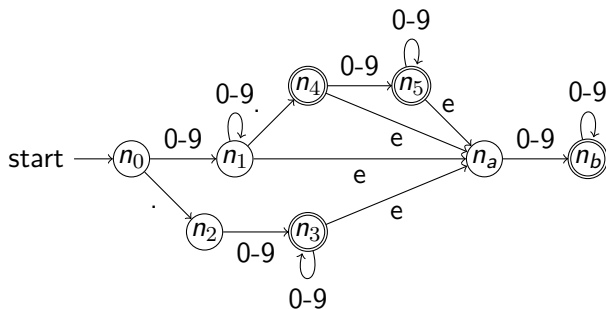
- ▶ Exemples : azerty aZER\_TY29 a44\_
- ▶ Expression :  $[a-zA-Z][0-9a-zA-Z_]^*$



## Exemples d'expressions (2/2)

Flottants :

- ▶ Exemples : .25 0. 0.22e17 3e8
- ▶ Expression : **en exercice**
- ▶ Automate :



# Exemple d'analyseur lexical pour C : lex / flex

## Format du source

```
<DEF> <regexp>  
%{ <code C apparaissant avant> %}
```

```
%%
```

```
<regexp> <action>
```

```
%%
```

```
<code C apparaissant après>
```

Cf. manuel de flex.



# Exemple d'analyseur lexical pour C : lex / flex

## Exemple

```
%{
#include <stdio.h>
%}
%%
[a-z]          printf("%c", ((yytext[0]-'a'+13)%26)+'a');
[\\r\\n]|(\\r\\n) {printf("%s", yytext); fflush(stdout);}
.              printf("%c", yytext[0]);
%%
int main () {
    yyin = stdin;
    yylex();
}
```

compil: flex rot13.lex && gcc lex.yy.c -lfl -o rot13

# Exemple d'analyseur lexical pour ocaml : ocamllex

## Format du source

```
{
  <code OCaml exécuté avant>
}

let <nom> = <regexp>

rule <nom> = parse
  <regexp>          { <code associé> }
| <regexp>          { <code associé> }
| <regexp>          { <code associé> }
| <regexp>          { <code associé> }

{
  <code OCaml exécuté après>
}
```

# Exemple d'analyseur lexical pour ocaml : ocamllex

## Utilisation autonome

```
{ open Printf open Char }

rule rot13 = parse
  | [ 'a'-'z' ] as c
    { printf "%c" (chr (((code c - code 'a' + 13) mod 26)
                        + code 'a')) }
  | [ '\n' '\r' ] | "\r\n" as s { printf "%s%!" s }
  | eof                          { raise Exit }
  | _ as c                       { printf "%c" c }
{ try
  let chan = Lexing.from_channel stdin in
  while true do
    rot13 chan
  done
with Exit -> () }
```

```
compil: ocamllex rot13.mll && ocamlpt rot13.ml -o
```

# Exemple d'analyseur lexical pour ocaml : ocamllex

Utilisation avec un parseur

```
{
open Parser
(* Parser définit
   type token = INT of int | OP of string
               | OPAR | CPAR *)
}

rule expr = parse
  [ ' ' '\t' ]           { expr lexbuf }
| eof                   { END }
| [ '0'-'9' ]+ as s     { INT (int_of_string s) }
| [ '+' '-' '*' '/' ] as s { OP s }
```

# Analyse lexicale et conflits

**Attention** : les analyseurs lexicaux ne préviennent en général pas des conflits entre les règles.

```
{ open Printf }  
rule expr = parse  
  | [ 'a'-'z' ]+ as s      { printf "lu %s\n%!" s }  
  | "toto"                { printf "ne doit pas arriver" }
```

# Analyse grammaticale

Générateur d'analyseur lexical : ex. yacc, menhir, antlr, javacc

Deux types principaux, correspondant à deux restrictions des grammaires algébriques (hors-contexte) :

1.  $LL(k)$  : calcule la **dérivation gauche**  
(ré-écriture du non terminal le plus à gauche)
2.  $LR(k)$  : calcule la **dérivation droite**  
(ré-écriture du non terminal le plus à droite)

Le  $k$  donne le nombre de lexème que l'analyseur doit tester pour prendre chaque décision.

# Ambiguïtés

En général, on veut une grammaire **non-ambigüe** : une phrase correspondant à un seul arbre de dérivation.

- ▶ Différents analyseurs → même arbre
- ▶ Mieux acceptées par les générateurs d'analyseurs

Il faut souvent réécrire la grammaire :

- ▶ Formatage dépendant du générateur d'analyseur
- ▶ La grammaire ne représente plus la structure
- ▶ Perte en modularité (explicitation manuelle des cas)

# Analyseur LL( $k$ )

LL(1) : Approche utilisée pour écrire un parseur à la main, sous forme de fonctions mutuellement récursives.

- ▶ On analyse le flot lexème par lexème,
- ▶ il suffit de regarder un lexème pour choisir la fonction à appeler,
- ▶ on peut plus facilement donner des messages intelligibles,
- ▶ il faut par contre **vérifier sa grammaire** avant l'implantation.

Restrictions :

- ▶ Récursion gauche interdite (boucle infinie)
- ▶ Pas d'expansions commençant par le même symbole (choix)  
→ factorisation du début dans une règle intermédiaire

**NB:** Il n'est pas possible d'analyser les expressions arithmétiques en LL(1).



# Analyseur LL( $k$ )

Exemple de réécriture LL(1) d'une grammaire :

- ▶ Récursion gauche  $\{E \rightarrow E + E, E \rightarrow x\}$   
donne  $\{E \rightarrow xZ, Z \rightarrow +xZ, Z \rightarrow \epsilon\}$
- ▶ Factorisation du début  $\{E \rightarrow AB, E \rightarrow AC\}$   
donne  $\rightarrow \{E \rightarrow AX, X \rightarrow B, X \rightarrow C\}$
- ▶ Ambiguïté terminal/non terminal  $\{E \rightarrow Za, Z \rightarrow a, Z \rightarrow \epsilon\}$   
donne  $\rightarrow \{E \rightarrow a, E \rightarrow aa\}$

# Analyseur LR( $k$ )

LR(1) : Approche utilisée par la plupart des générateurs d'analyseurs.

- ▶ Grammaires plus souples  $LL(1) \subset LR(1)$ ,
- ▶ détection des ambiguïtés et les conflits,
- ▶ messages d'erreurs plus difficiles à implanter,
- ▶ nécessite en général une machinerie.

Restrictions : conflits SHIFT/REDUCE (cf. suite)

## Analyseur LR(1) : fonctionnement

On empile les lexèmes (SHIFT), et on décide quand on reconnaît une règle au sommet, et on réécrit le sommet de pile (REDUCE).

Exemple :  $\{S \rightarrow (E), E \rightarrow E; X, E \rightarrow X, X \rightarrow a, X \rightarrow b, \}$

Pile	Flux	
	( a ; b ; a )	S
(	a ; b ; a )	S
( a	; b ; a )	R
( X	; b ; a )	R
( E	; b ; a )	S
( E ;	b ; a )	S
( E ; b	; a )	R
( E ; X	; a )	R
( E	; a )	S
( E ;	a )	S
( E ; a	)	R
( E ; X	)	R
( E	)	S
( E )		R
S		-

# Analyseur LR(1) : conflits

- ▶ **REDUCE/REDUCE** : l'analyseur pourrait réduire le sommet de pile en deux non terminaux différent.

## **Solutions :**

- ▶ **Erreur/ambigüité** : grammaire à revoir
  - ▶ **Trop peu d'avance** : factoriser
  - ▶ **Ambigüité simple** : règles de l'analyseur
- ▶ **SHIFT/REDUCE** : l'analyseur pourrait réduire le sommet de pile ou continuer à empiler.

## **Solutions :**

- ▶ factoriser le début, comme pour LL(1)
- ▶ utiliser les règles d'assoc. et de distrib. du générateur

Les générateurs d'analyseurs sont plus ou moins loquaces sur les erreurs de grammaires, ne pas hésiter à en changer si une grammaire est difficile à reformater.

# Analyseur LR(1) : menhir

## Format du source

```
(* déclaration des tokens *)
%token<type> <TOK1> ...
(* déclaration des règles typées *)
%start<type> <règle1> ...
(* triche *)
%<nonassoc|left|right> <TOK> ... (* faible prio *)
%<nonassoc|left|right> <TOK> ... (* haute prio *)

%%
règle:
  | TOK ; TOK ; TOK { <code>}
  | TOK ; n = TOK ; TOK { <code utilisant n>}
  | TOK ; n = règle ; TOK { <code utilisant n>}
%%

<code>
```

# Analyseur LR(1) : menhir

exemple

```
%token<int> INT
%token PLUS TIMES
%start<int> expr
```

```
%%
```

```
expr:
```

```
| i = INT { i }
```

```
| e = expr ; PLUS; f = expr    { e + f }
```

```
| e = expr ; TIMES; f = expr   { e * f }
```

# Analyseur LR(1) : menhir

Réécriture LR possible

```
%token<int> INT
%token PLUS TIMES
%start<int> expr
```

```
%%
```

```
expr:
| e = sexpr                { e }
| e = sexpr ; TIMES; f = expr { e * f }
sexpr:
| i = INT                  { i }
| e = INT ; PLUS; f = sexpr { e + f }
```

# Analyseur LR(1) : menhir

Sans réécriture, avec les règles de priorité

```
%token<int> INT
%token PLUS TIMES
%left PLUS
%left TIMES
%start<int> expr
```

```
%%
```

```
expr:
```

```
| i = INT { i }
| e = expr ; PLUS; f = expr    { e + f }
| e = expr ; TIMES; f = expr   { e * f }
```



## Retour sur les règles de priorité

- ▶ **%left** : on réduit avant d'empiler  
 $E + E + E \rightarrow (E + E) + E$
- ▶ **%right** : empile avant de réduire  
 $E + E + E \rightarrow E + (E + E)$
- ▶ priorité inférieure (apparaît avant), on continue d'empiler  
 $\text{prio}(+) < \text{prio}(*): E + E * \dots \rightarrow E + E * \dots$
- ▶ priorité supérieure (apparaît après), on réduit  
 $\text{prio}(* > \text{prio}(+): E * E + \dots \rightarrow (E * E) + \dots$

# Références

- ▶ Pages Wikipédia **en anglais** sur les langages  
(celles sur les analyseurs sont moins bonnes)
- ▶ Livre *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*
- ▶ Manuel de menhir :  
<http://gallium.inria.fr/~fpottier/menhir/>
- ▶ Manuel de flex :  
<http://flex.sourceforge.net/manual/>