

Traitement Automatique du Langage

Cours 3 - Syntaxe

Antoine Rozenknop
antoine.rozenknop@lipn.univ-paris13.fr

8 octobre 2008

Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami
Principes de l'algorithme CYK
Complexité pire cas

Algorithme de Earley
Fondements
Interprétation
Un exemple très simple

Analyse syntaxique

Intérêt des CFG : existence d'algorithmes efficaces de production de dérivations/arbres d'analyse.

efficace — complexité pire cas $\mathcal{O}(n^3)$

Les deux algorithmes les plus usuels :

- ▶ algorithme **CYK** (Cocke-Younger-Kasami) (milieu des années 60)
- ▶ algorithme **Earley** (1970)

Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami
Principes de l'algorithme CYK
Complexité pire cas

Algorithme de Earley
Fondements
Interprétation
Un exemple très simple

Algorithme CYK

L'algorithme CYK est un algorithme **tabulaire ascendant** présentant deux avantages :

- ▶ sa complexité pire cas est optimale ($\mathcal{O}(n^3)$);
- ▶ très simple à comprendre et implémenter

Il présente cependant deux inconvénients :

- ▶ Nécessite la mise de la CFG sous forme normale de Chomsky
- ▶ Reste $\mathcal{O}(n^3)$ sur des grammaires de complexité inférieure (par ex. régulières)

Algorithme CYK : principes

CYK est un analyseur tabulaire (« **chart-parser** ») : calcul efficace (en espace et en temps) de **toutes les interprétations** possibles de **toutes les sous-séquences** de la séquence à analyser).

L'efficacité du calcul est fondée sur la propriété suivante :

Si la grammaire est sous forme normale, le calcul des interprétations d'une séquence W de longueur l nécessite seulement l'exploration de toutes les décompositions de W en deux sous-séquences exactement.

Le nombre de paires de sous-séquences à explorer est donc $l - 1$.

Idée : mettre les analyses des sous-séquences dans une table.

Algorithme CYK : principes (2)

L'analyse syntaxique d'une séquence de n mots $W = w_1 \dots w_n$ est représentée dans une table triangulaire de cellules $C_{i,l}$ ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq l \leq n - i + 1$).

La cellule $C_{i,l}$ contient **tous les non-terminaux pouvant dériver** la sous-séquence $w_i \dots w_{i+l-1}$ (la séquence de l mots commençant au i^{e} mot de W).

Remplissage de bas en haut

On reconsidère la grammaire mise sous CNF :

Règles de la grammaire originale	Grammaire sous forme normale
R1 : $S \rightarrow SN SV$	R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
	R1.2 : $S \rightarrow SN V$
R2 : $SN \rightarrow Det N$	R2 : $SN \rightarrow Det N$
R3 : $SN \rightarrow Det N SNP$	R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
	R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$
R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$	R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
R5 : $SV \rightarrow V$	
R6 : $SV \rightarrow V SN$	R6 : $SV \rightarrow V SN$
R7 : $SV \rightarrow V SN SNP$	R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
	R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2								
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN							
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN, X_1							
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN, X ₁			SN				
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN, X_1			SN, X_1				
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN\ SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN\ V$
 R2 : $SN \rightarrow Det\ N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1\ SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det\ N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep\ SN$
 R6 : $SV \rightarrow V\ SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2\ SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3								
2	SN, X_1			SN, X_1			SN, X_1	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3	S							
2	SN, X_1			SN, X_1			SN, X_1	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3	S		SV					
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN, X ₁	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3	S		SV, X_2					
2	SN, X_1			SN, X_1			SN, X_1	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6								
5								
4								
3	S		SV, X ₂			SNP		
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN, X ₁	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5	S							
4								
3	S		SV, X ₂			SNP		
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN, X ₁	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8								
7								
6								
5	S			SN				
4								
3	S		SV, X ₂			SNP		
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN, X ₁	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	<i>S</i>	→	<i>SN SV</i>
R1.2 :	<i>S</i>	→	<i>SN V</i>
R2 :	<i>SN</i>	→	<i>Det N</i>
R3.1 :	<i>SN</i>	→	<i>X₁ SNP</i>
R3.2 :	<i>X₁</i>	→	<i>Det N</i>

R4 :	<i>SNP</i>	→	<i>Prep SN</i>
R6 :	<i>SV</i>	→	<i>V SN</i>
R7.1 :	<i>SV</i>	→	<i>X₂ SNP</i>
R7.2 :	<i>X₂</i>	→	<i>V SN</i>

8								
7								
6			SV					
5	<i>S</i>			SN				
4								
3	<i>S</i>		<i>SV, X₂</i>			<i>SNP</i>		
2	<i>SN, X₁</i>			<i>SN, X₁</i>			<i>SN, X₁</i>	
1	<i>Det</i>	<i>N</i>	V	<i>Det</i>	<i>N</i>	<i>Prep</i>	<i>Det</i>	<i>N</i>
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6			SV					
5	S			SN				
4								
3	S		SV, X_2			SNP		
2	SN, X_1			SN, X_1			SN, X_1	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

R1.1 :	S	$\rightarrow$	$SN\ SV$
R1.2 :	S	$\rightarrow$	$SN\ V$
R2 :	SN	$\rightarrow$	$Det\ N$
R3.1 :	SN	$\rightarrow$	$X_1\ SNP$
R3.2 :	X_1	$\rightarrow$	$Det\ N$

R4 :	SNP	$\rightarrow$	$Prep\ SN$
R6 :	SV	$\rightarrow$	$V\ SN$
R7.1 :	SV	$\rightarrow$	$X_2\ SNP$
R7.2 :	X_2	$\rightarrow$	$V\ SN$

8								
7								
6			SV, X_2					
5	S			SN				
4								
3	S		SV, X_2			SNP		
2	SN, X_1			SN, X_1			SN, X_1	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

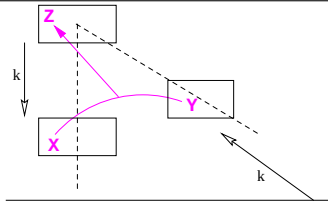
R1.1 : $S \rightarrow SN SV$
 R1.2 : $S \rightarrow SN V$
 R2 : $SN \rightarrow Det N$
 R3.1 : $SN \rightarrow X_1 SNP$
 R3.2 : $X_1 \rightarrow Det N$

R4 : $SNP \rightarrow Prep SN$
 R6 : $SV \rightarrow V SN$
 R7.1 : $SV \rightarrow X_2 SNP$
 R7.2 : $X_2 \rightarrow V SN$

8	S							
7								
6			SV, X ₂					
5	S			SN				
4								
3	S		SV, X ₂			SNP		
2	SN, X ₁			SN, X ₁			SN, X ₁	
1	Det	N	V	Det	N	Prep	Det	N
l/i	1	2	3	4	5	6	7	8
	le	chat	mange	la	souris	dans	le	jardin

Algorithme formel

```
pour tout  $2 \leq i \leq n$  (ligne) faire  
  pour tout  $1 \leq j \leq n - i + 1$  (colonne) faire  
    pour tout  $1 \leq k \leq i - 1$  (décomposition) faire  
      pour tout  $X \in C[i - k][j]$  faire  
        pour tout  $Y \in C[k][j + i - k]$  faire  
          pour tout  $Z \rightarrow X Y \in \mathcal{R}$  faire  
            Ajouter  $Z$  à  $C[i][j]$ 
```



Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami

Principes de l'algorithme CYK

Complexité pire cas

Algorithme de Earley

Fondements

Interprétation

Un exemple très simple

Complexité (1)

- Le calcul des interprétations d'une cellule $C_{i,j}$ nécessite $(i - 1)$ explorations de paires de cellules ($1 \leq k \leq i - 1$), le nombre total d'explorations est donc :

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{n-i+1} (i - 1) = \sum_{i=1}^n (n - i + 1) \cdot (i - 1) \sim \mathcal{O}(n^3).$$

Complexité (1)

- Le calcul des interprétations d'une cellule $C_{i,j}$ nécessite $(i-1)$ explorations de paires de cellules ($1 \leq k \leq i-1$), le nombre total d'explorations est donc :

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{n-i+1} (i-1) = \sum_{i=1}^n (n-i+1).(i-1) \sim \mathcal{O}(n^3).$$

- Une cellule contient au plus $|\mathcal{NT}|$ interprétations (nombre de non-terminaux de la grammaire)

Complexité (1)

- ▶ Le calcul des interprétations d'une cellule $C_{i,j}$ nécessite $(i - 1)$ explorations de paires de cellules ($1 \leq k \leq i - 1$), le nombre total d'explorations est donc :

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{n-i+1} (i - 1) = \sum_{i=1}^n (n - i + 1) \cdot (i - 1) \sim \mathcal{O}(n^3).$$

- ▶ Une cellule contient au plus $|\mathcal{NT}|$ interprétations (nombre de non-terminaux de la grammaire)
- ▶ le coût de l'exploration croisée d'une paire de cellules est d'au plus $|\mathcal{NT}|^2$ accès à la grammaire.

Complexité (2)

D'où la complexité :

$$\mathcal{O}(n^3 |\mathcal{NT}|^2).$$

Inconvénient de la forme normale, qui augmente la taille de $\mathcal{NT}$.

Remarque : une fois la table remplie, on peut extraire un arbre d'analyse en $\mathcal{O}(\backslash)$.

Algorithme de Earley

Algorithme **top-down** (prédicatif).

3 avantages :

- ▶ meilleure complexité pire cas connue (de même que CYK) ;
- ▶ s'adapte à des langages moins complexes (par ex. les langages réguliers) ;
- ▶ ne requière pas une forme particulière de grammaire (pas de CNF).

deux inconvénients :

- ▶ pas très intuitif ;
- ▶ pas moyen de corriger / reconstruire des phrases incorrectes syntaxiquement, ni d'en donner des analyses partielles.

Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami
Principes de l'algorithme CYK
Complexité pire cas

Algorithme de Earley
Fondements
Interprétation
Un exemple très simple

Algorithme de Earley (2)

Idée : binarisation dynamique (en cours d'analyse) de la grammaire

Règle pointée : Objet de la forme

$$X \rightarrow X_1 \dots X_k \bullet X_{k+1} \dots X_m$$

où $X \rightarrow X_1 \dots X_m$ est une règle de la grammaire.

Earley item : une règle pointée et un entier i (avec $0 \leq i \leq n$, n : taille de la phrase).

☞ représente la portion d'une règle compatible avec le segment de phrase commençant à la position $i + 1$.

Exemple : $(SV \rightarrow V \bullet SN, 2)$ et $(SV \rightarrow V \bullet SN \text{ } SNP, 2)$ sont des items pour la chaîne initiale :

le	chat	mangea	la	souris.
1	2	3	4	5

Algorithme de Earley (3)

Principe de l'algorithme : Construction en parallèle de toutes les règles pointées compatibles avec des sous-chaînes de plus en plus grandes de la phrase à analyser.

👉 construction d'**ensembles d'items** E_j tels que :

$$(X \rightarrow \alpha \bullet \beta, i) \in E_j \iff \exists \gamma, \delta : \begin{cases} S \Rightarrow^* \gamma X \delta \\ \gamma \Rightarrow^* w_1 \dots w_i \\ \alpha \Rightarrow^* w_{i+1} \dots w_j \end{cases}$$

Exemple : dans l'exemple précédent, $(SV \rightarrow V \bullet SN, 2) \in E_3$.

👉 une phrase est **syntactiquement correcte** s'il existe au moins un $(S \rightarrow X_1 \dots X_m \bullet, 0)$ dans E_n

Algorithme d'Earley (4)

❖ Initialisation : Construction de E_0

1. Pour toute règle $S \rightarrow X_1 \dots X_n$:
ajouter $(S \rightarrow \bullet X_1 \dots X_n, 0)$ à E_0 .
2. Pour tous les items $(X \rightarrow \bullet Y \beta, 0)$ dans E_0 , et pour toute règle $Y \rightarrow \gamma$:
ajouter $(Y \rightarrow \bullet \gamma, 0)$ à E_0 .
3. Répéter (2) jusqu'à stabilisation de E_0 .

Algorithme d'Earley (5)

✚ **Itérations** : Construction des E_j ($1 \leq j \leq n$) :

1. Pour tout $(X \rightarrow \alpha \bullet w_j \beta, i) \in E_{j-1}$:
ajouter $(X \rightarrow \alpha w_j \bullet \beta, i)$ à E_j .

Algorithme d'Earley (5)

✚ **Itérations** : Construction des E_j ($1 \leq j \leq n$) :

1. Pour tout $(X \rightarrow \alpha \bullet w_j \beta, i) \in E_{j-1}$:
ajouter $(X \rightarrow \alpha w_j \bullet \beta, i)$ à E_j .
2. Pour tout $(X \rightarrow \gamma \bullet, i)$ de E_j
et tout $(Y \rightarrow \alpha \bullet X \beta, k)$ de E_i :
ajouter $(Y \rightarrow \alpha X \bullet \beta, k)$ à E_j .

Algorithme d'Earley (5)

✚ **Itérations** : Construction des E_j ($1 \leq j \leq n$) :

1. Pour tout $(X \rightarrow \alpha \bullet w_j \beta, i) \in E_{j-1}$:
ajouter $(X \rightarrow \alpha w_j \bullet \beta, i)$ à E_j .
2. Pour tout $(X \rightarrow \gamma \bullet, i)$ de E_j
et tout $(Y \rightarrow \alpha \bullet X \beta, k)$ de E_i :
ajouter $(Y \rightarrow \alpha X \bullet \beta, k)$ à E_j .
3. Pour tous les $(X \rightarrow \alpha \bullet Y \beta, i) \in E_j$
et toute règle $Y \rightarrow \gamma$:
ajouter $(Y \rightarrow \bullet \gamma, j)$ à E_j .

Algorithme d'Earley (5)

✚ **Itérations** : Construction des E_j ($1 \leq j \leq n$) :

1. Pour tout $(X \rightarrow \alpha \bullet w_j \beta, i) \in E_{j-1}$:
ajouter $(X \rightarrow \alpha w_j \bullet \beta, i)$ à E_j .
2. Pour tout $(\cancel{X} \rightarrow \gamma \bullet, i)$ de E_j
et tout $(Y \rightarrow \alpha \bullet \cancel{X} \beta, k)$ de E_i :
ajouter $(Y \rightarrow \alpha X \bullet \beta, k)$ à E_j .
3. Pour tous les $(X \rightarrow \alpha \bullet Y \beta, i) \in E_j$
et toute règle $Y \rightarrow \gamma$:
ajouter $(Y \rightarrow \bullet \gamma, j)$ à E_j .
4. Répéter (2) et (3) jusqu'à stabilisation de E_j .

Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami
Principes de l'algorithme CYK
Complexité pire cas

Algorithme de Earley
Fondements
Interprétation
Un exemple très simple

Algorithme d'Earley (Interprétation)

❖ **Itérations** : Construction des interprétations de $w_1 \dots w_n$ (E_j)

1. Ancrage vers les mots :

Introduire le mot w_j si on a une interprétation de $w_1 \dots w_{j-1}$ qui peut « consommer » w_j (c.-à-d. « un $\bullet$ avant le symbole w_j »)

2. Progression dans l'interprétation :

Si le non-terminal X a été produit depuis w_{i+1} et si on a une interprétation terminant en w_i qui peut « consommer » X , alors le faire !

3. Prédiction (des choses utiles) :

Si on cherche à consommer Y pour la suite de l'analyse, alors introduire toutes les règles susceptibles de produire (plus tard) Y .

Plan

Algorithme Cock -Younger-Kasami
Principes de l'algorithme CYK
Complexité pire cas

Algorithme de Earley
Fondements
Interprétation
Un exemple très simple

Algorithme d'Earley (Exemple complet)

analyse de la phrase « *Je pense* » avec la grammaire suivante :

$S \rightarrow SN\ SV$	$Pron \rightarrow Je$
$SN \rightarrow Pron$	$V \rightarrow pense$
$SN \rightarrow Det\ N$	
$SV \rightarrow V$	
$SV \rightarrow V\ S$	
$SV \rightarrow V\ SN$	

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN \text{ } SV, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet \text{ SN SV}, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet \text{ Pron}, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet \text{ SN SV}, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet \text{ Pron}, 0) \quad (SN \rightarrow \bullet \text{ Det N}, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet \text{Pron}, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet \text{Det } N, 0)$

$(\text{Pron} \rightarrow \bullet \text{Je}, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$

$(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet \text{Pron}, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet \text{Det } N, 0)$

$(\text{Pron} \rightarrow \bullet \text{Je}, 0)$

E_1

$(\text{Pron} \rightarrow \text{Je } \bullet, 0)$

$(SN \rightarrow \text{Pron } \bullet, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet \text{ SN SV}, 0)$

$(\text{SN} \rightarrow \bullet \text{ Pron}, 0) \quad (\text{SN} \rightarrow \bullet \text{ Det N}, 0)$

$(\text{Pron} \rightarrow \bullet \text{ Je}, 0)$

E_1

$(\text{Pron} \rightarrow \text{Je} \bullet, 0)$

$(\text{SN} \rightarrow \text{Pron} \bullet, 0) \quad (S \rightarrow \text{SN} \bullet \text{ SV}, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Pron, 0) \quad (SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$

$(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$

$(SN \rightarrow Pron \bullet, 0) \quad (S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$

$(SV \rightarrow \bullet V, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Pron, 0) \quad (SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$

$(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$

$(SN \rightarrow Pron \bullet, 0) \quad (S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$

$(SV \rightarrow \bullet V, 1) \quad (SV \rightarrow \bullet V S, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$

$(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$

$(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$

$(SV \rightarrow \bullet V, 1)$

$(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$

$(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$

$(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 0)$

$(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det\ N, 0)$

$(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je\ \bullet, 0)$

$(SN \rightarrow Pron\ \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN\ \bullet\ SV, 0)$

$(SV \rightarrow \bullet\ V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet\ V\ S, 1)$

$(SV \rightarrow \bullet\ V\ SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet\ pense, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det\ N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je\ \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron\ \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN\ \bullet\ SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V\ S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V\ SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet\ pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense\ \bullet, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet SN, 1)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet SN, 1)$ $(S \rightarrow SN SV \bullet, 0)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det\ N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je\ \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron\ \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN\ \bullet\ SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V\ S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V\ SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense\ \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V\ \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V\ \bullet\ S, 1)$
 $(SV \rightarrow V\ \bullet\ SN, 1)$ $(S \rightarrow SN\ SV\ \bullet, 0)$
 $(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 2)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet SN, 1)$ $(S \rightarrow SN SV \bullet, 0)$
 $(S \rightarrow \bullet SN SV, 2)$ $(SN \rightarrow \bullet Pron, 2)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet SN, 1)$ $(S \rightarrow SN SV \bullet, 0)$
 $(S \rightarrow \bullet SN SV, 2)$ $(SN \rightarrow \bullet Pron, 2)$
 $(SN \rightarrow \bullet Det N, 2)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det\ N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je\ \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron\ \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN\ \bullet\ SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V\ S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V\ SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense\ \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V\ \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V\ \bullet\ S, 1)$
 $(SV \rightarrow V\ \bullet\ SN, 1)$ $(S \rightarrow SN\ SV\ \bullet, 0)$
 $(S \rightarrow \bullet SN\ SV, 2)$ $(SN \rightarrow \bullet \text{Pron}, 2)$
 $(SN \rightarrow \bullet Det\ N, 2)$ $(Pron \rightarrow \bullet Je, 2)$

E_0

$(S \rightarrow \bullet SN SV, 0)$
 $(SN \rightarrow \bullet Pron, 0)$ $(SN \rightarrow \bullet Det N, 0)$
 $(Pron \rightarrow \bullet Je, 0)$

E_1

$(Pron \rightarrow Je \bullet, 0)$
 $(SN \rightarrow Pron \bullet, 0)$ $(S \rightarrow SN \bullet SV, 0)$
 $(SV \rightarrow \bullet V, 1)$ $(SV \rightarrow \bullet V S, 1)$
 $(SV \rightarrow \bullet V SN, 1)$ $(V \rightarrow \bullet pense, 1)$

E_2

$(V \rightarrow pense \bullet, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet, 1)$ $(SV \rightarrow V \bullet S, 1)$
 $(SV \rightarrow V \bullet SN, 1)$ $(S \rightarrow SN SV \bullet, 0)$
 $(S \rightarrow \bullet SN SV, 2)$ $(SN \rightarrow \bullet Pron, 2)$
 $(SN \rightarrow \bullet Det N, 2)$ $(Pron \rightarrow \bullet Je, 2)$