

# Introduction aux langages

OPTION INFORMATIQUE - TP n° 3.7 - Olivier Reynet

## À la fin de ce chapitre, je sais :

- ✎ utiliser le lemme de Levi
- ✎ manipuler un alphabet, un langage et ses puissances,
- ✎ programmer en OCaml des outils pour manipuler les langages.

## A Mots, alphabets et lemme de Levi

On considère une alphabet  $\Sigma$  contenant au moins deux éléments.

- A1. Soit  $\Sigma$  un alphabet. Soient  $a$  et  $b$  deux **lettres** de  $\Sigma$ . Montrer que  $\forall u \in \Sigma^*, ua = bu \implies a = b$  et  $u \in \{a\}^*$ . On utilisera la définition inductive des mots.

**Solution :** On procède par induction en utilisant la définition inductive des mots.

**(Cas de base)** Soit  $u = \epsilon \in \Sigma$ . Alors  $ua = \epsilon a = a$  et  $bu = b\epsilon = b$ . Si  $ua = bu$  alors on a  $a = b$ . De plus, comme  $\epsilon \in \{a\}^*$ , la propriété est vérifiée.

**(Pas d'induction)** On suppose maintenant qu'on dispose d'un mot  $u$  vérifiant la propriété  $\mathcal{P}$  :  $ua = bu \implies a = b$  et  $u \in \{a\}^*$ . On cherche à construire  $v$  un mot à partir de  $u$  et à montrer que ce mot  $v$  vérifie également  $\mathcal{P}$ . Soit  $c$  une lettre de  $\Sigma$ . On peut construire un mot par la droite d'après la définition inductive des mots : soit  $v = uc$ . Alors on a  $va = uca$ . De même,  $bv = buc$ . Supposons que  $va = bv$ , c'est à dire  $uca = buc$ . Comme les lettres sont des éléments atomiques et la décomposition des mots uniques sur  $\Sigma$ , on a donc nécessairement :  $a = c$  et  $uc = bu$ , c'est à dire  $ua = bu$ . Or, d'après notre hypothèse,  $u$  vérifie la propriété  $\mathcal{P}$  et donc ceci implique de  $a = b$  et  $u \in \{a\}^*$ . On a alors  $va = uca = uaa$  et on en déduit que  $v \in \{a\}^*$ .

**(Conclusion)** Quelque soit le mot  $u$  de  $\Sigma^*$ , la propriété  $\mathcal{P}$  est vérifiée.

- A2. Soient  $r, s, u, v$  et  $w$  quatre mots de  $\Sigma^*$  tels que  $w = ur$  et  $w = vs$ . Montrer que  $u$  est un préfixe de  $v$  ou que  $v$  est un préfixe de  $u$ .

**Solution :** D'après le lemme de Levi, comme  $ur = vs$ , il existe un unique mot  $z \in \Sigma^*$  tel que :

- soit  $v = zu$
- soit  $u = vz$

Quoiqu'il en soit,  $v$  est préfixe de  $u$  ou le contraire.

A3. Soient  $u$  et  $v$  deux mots de  $\Sigma^*$  qui vérifient  $uv = vu$ . Montrer que :

$$\exists w \in \Sigma^*, \exists n, m \in \mathbb{N}, u = w^n \text{ et } v = w^m$$

**Solution :** On procède par induction sur la définition d'un mot. La propriété à vérifier est :

$$\mathcal{P} : \forall u, v \in \Sigma^*, uv = vu \implies \exists w \in \Sigma^*, \exists n, m \in \mathbb{N}, u = w^n \text{ et } v = w^m$$

**(Cas de base)** Ce sont les cas où l'on considère le mot vide.

1. Si  $u = v = \epsilon$  alors  $w = \epsilon$ ,  $n = m = 1$  conviennent.
2. Si  $u = \epsilon$  et  $v \in \Sigma^*$ , alors  $w = v$ ,  $n = 0$  et  $m = 1$  conviennent.
3. Si  $v = \epsilon$  et  $u \in \Sigma^*$ , alors  $w = u$ ,  $n = 1$  et  $m = 0$  conviennent.

**(Pas d'induction)** On suppose qu'on dispose de deux mots  $u$  et  $v$  qui vérifient  $\mathcal{P}$ . On construit un mot  $t$  à partir de  $u$  et on cherche à montrer que  $t$  vérifie  $\mathcal{P}$ .

Supposons que  $uv = vu$ . Par hypothèse d'induction, il existe donc deux entiers  $n$  et  $m$  tels que  $u = w^n$  et  $v = w^m$ . Soit une lettre  $c$  de l'alphabet  $\Sigma$ . On peut construire par induction un mot  $t = cu$  par la gauche. Supposons que  $tv = vt$ . Alors on a  $cuv = vcu$ . ce qui s'écrit  $cw^{n+m} = w^m cw^n$ . On peut simplifier par la droite par  $w^n$ . On obtient alors  $cw^m = w^m c$  ce qui n'est possible que si  $w = c$ . On a donc  $t = cu = w^{n+1}$ . Le couple  $t$  et  $v$  vérifient la propriété  $\mathcal{P}$ . À partir de n'importe quel mot vérifiant  $\mathcal{P}$ , on peut construire un autre mot la vérifiant.

**(Conclusion)** La propriété  $\mathcal{P}$  est vérifiée pour tout mots  $u$  et  $v$  de  $\Sigma^*$ .

A4. Soient deux mots  $u$  et  $v$  de  $\Sigma^*$ . Montrer que :

$$\exists p, q \in \mathbb{N}, u^p = v^q \iff \exists w \in \Sigma^*, \exists n, m \in \mathbb{N}, u = w^n \text{ et } v = w^m$$

**Solution :**

( $\Leftarrow$ ) Soit  $p$  et  $q$  deux entiers. On a donc  $u^p = w^{n+p}$  et  $v^q = w^{m+q}$ . Il suffit donc de choisir  $p = m$  et  $q = n$  pour vérifier  $u^p = v^q$ .

( $\Rightarrow$ ) On a  $u^p = uu^{p-1} = vv^{q-1} = v^q$ . On applique le lemme de Lévi. Il existe alors un mot  $z$  de  $\Sigma^*$  tel que  $uz = u^{p-1}$  et  $zv = v^{q-1}$ . On en déduit que  $zuv = uvz$ . D'après l'exercice précédent, il existe un mot  $w$  et deux entiers  $r$  et  $s$  tels que :  $z = w^r$  et  $uv = w^s$ . Et donc il existe deux entiers  $n$  et  $m$  tels que  $u = w^n$  et  $v = w^m$ .

A5. On définit les mots de Fibonacci sur l'alphabet  $\Sigma = \{a, b\}$  par :

$$w_0 = \epsilon \tag{1}$$

$$w_1 = a \tag{2}$$

$$w_2 = b \tag{3}$$

$$w_n = w_{n-1} w_{n-2}, \forall n > 2 \tag{4}$$

- (a) On suppose  $n > 2$ . Montrer que le suffixe de longueur deux de  $w_n$  est  $ba$  si  $n$  est impair et  $ab$  sinon.

**Solution :** Démonstration par récurrence sur  $n$ .

- (b) On suppose  $n > 3$  et on définit le mot  $v_n$  comme le préfixe de  $w_n$  obtenu en supprimant les deux dernières lettres. Montrer que  $v_n$  est un palindrome.

**Solution :** Par récurrence et en remarquant que  $w_{n+1} = w_n w_{n-1} = v_n x y v_{n-1} y x$  avec  $x = a$  et  $y = b$  si  $n$  est pair, l'inverse sinon.

Le cœur de la démonstration s'appuie sur, si  $n$  est pair :

$$w_n = v_n ab = v_{n-1} b a v_{n-2} ab \quad (5)$$

$$w_{n+1} = w_n w_{n-1} = (v_{n-1} b a v_{n-2} a b v_{n-1}) b a \quad (6)$$

Comme par hypothèse de récurrence  $v_{n-1}$  et  $v_{n-2}$  sont des palindromes, alors  $(v_{n-1} b a v_{n-2} a b v_{n-1})$  est un palindrome.

- (c) Écrire une fonction OCaml de signature `is_palindrome : string -> bool` qui permet de tester si une chaîne de caractères est un palindrome. Le pattern matching sur le type `string` n'est pas possible en OCaml car, contrairement aux listes, ce n'est pas type défini inductivement.

**Solution :**

```
1 let rec is_palindrome str =
2   let n = String.length str in
3   match n with
4   | 0 | 1 -> true
5   | _ -> if str.[0] = str.[n-1]
6           then is_palindrome (String.sub str 1 (n-2))
7           else false
8   ;;
9
10 is_palindrome("non");;
11 is_palindrome("pas");;
12 is_palindrome("essayasse");;
13 is_palindrome("girafarig");;
14 is_palindrome("esope reste ici et se repose");;
15 is_palindrome("esoperesteicietse repose");;
```

- (d) Écrire quatre versions de la fonction signature `fib_word : int -> string` qui renvoie le  $n$ ème mot de Fibonacci. Ces quatre versions correspondent à :

1. une version à récursivité multiple,
2. une version à récursivité terminale,
3. une version itérative (programmation dynamique par le bas)
4. une version avec mémoïsation (programmation dynamique récursive).

Vérifier le résultat de la question b.

**Solution :**

```

1  let rec rec_fib_word n =
2      match n with
3      | 0 -> ""
4      | 1 -> "a"
5      | 2 -> "b"
6      | _ -> rec_fib_word (n - 1) ^ rec_fib_word (n - 2);;
7
8  let ite_fib_word n =
9      let u1 = ref "a" and u2 = ref "b" in
10         match n with
11         | 0 -> ""
12         | 1 -> "a"
13         | 2 -> "b"
14         | _ -> for _ = 3 to n do
15                     let tmp = !u2 in
16                     u2 := !u2 ^ !u1; u1 := tmp;
17                 done;
18                 !u2;;
19
20 let term_rec_fib_word n =
21     let rec aux u2 u1 k = if k < n
22                           then aux (u2 ^ u1) u2 (k + 1)
23                           else u2 ^ u1
24     in match n with
25     | 0 -> ""
26     | 1 -> "a"
27     | 2 -> "b"
28     | _ -> aux "b" "a" 3
29     ;;
30
31 let memo_fib_word n =
32     let memo = Hashtbl.create n in
33     let rec aux k = match k with
34     | 0 -> ""
35     | 1 -> "a"
36     | 2 -> "b"
37     | _ -> if Hashtbl.mem memo k
38             then Hashtbl.find memo k
39             else ((aux (k - 1)) ^ (aux (k - 2)))
40     in aux n;;
41
42
43
44 for i=0 to 9 do
45     Printf.printf "rec_fib_word %i -> %s\n" i (rec_fib_word i);
46     Printf.printf "term_rec_fib_word %i -> %s\n" i (term_rec_fib_word i)
47     ;
48     Printf.printf "ite_fib_word %i -> %s\n" i (ite_fib_word i);
49     Printf.printf "memo_fib_word %i -> %s\n" i (memo_fib_word i);
50     assert ((rec_fib_word i) = (ite_fib_word i));
51     assert ((rec_fib_word i) = (term_rec_fib_word i));
52     assert ((rec_fib_word i) = (memo_fib_word i));
53 done;;

```

```

54   for i=4 to 9 do
55       let result = memo_fib_word i in
56       Printf.printf "Fibonacci word -> %s -> %b\n" result (is_palindrome(
           String.sub result 0 ((String.length result) - 2)));
57       assert (is_palindrome(String.sub result 0 ((String.length result) -
           2)));
58   done;;

```

## B Langage et concaténation

B1. Soit  $\mathcal{L}$  un langage sur  $\Sigma$ . Démontrer que  $\mathcal{L}.\emptyset = \emptyset.\mathcal{L} = \emptyset$ .

**Solution :** On utilise la définition de la concaténation d'un langage.

$$\mathcal{L}.\emptyset = \{vw, v \in \mathcal{L} \wedge w \in \emptyset\} \quad (7)$$

$$= \emptyset \text{ car } w \in \emptyset \text{ est impossible par définition} \quad (8)$$

On procède de la même manière pour l'autre expression.

B2. Soit  $\Sigma$  un alphabet. Que vaut le cardinal de  $\Sigma^n$  en fonction du cardinal de  $\Sigma$ ? (S'appuyer sur la définition inductive de la puissance d'un langage)

**Solution :** On cherche à montrer que le cardinal de la puissance  $n$  d'un langage est le cardinal de ce langage à la puissance  $n$ . On fait donc l'hypothèse que  $|\Sigma^n| = |\Sigma|^n$ . On la démontre par induction en utilisant la définition inductive de la puissance d'un langage.

- Cas de base : pour  $n = 0$ ,  $|\Sigma^0| = |\{\epsilon\}| = 1 = |\Sigma|^0$
- Pas d'induction : pour  $n \in \mathbb{N}^*$ , on suppose que  $|\Sigma^n| = |\Sigma|^n$ . Considérons maintenant :

$$|\Sigma^{n+1}| = |\Sigma.\Sigma^n| \quad (9)$$

$$= |\{vw, v \in \Sigma \wedge w \in \Sigma^n\}| \quad (10)$$

Or, il n'y a que  $|\Sigma|$  choix possible pour  $v$ . Il y a  $|\Sigma|^n$  choix possibles pour  $w$ , par hypothèse d'induction. Donc, on a :

$$|\Sigma^{n+1}| = |\Sigma| \times |\Sigma|^n = |\Sigma|^{n+1} \quad (11)$$

B3. On se donne l'alphabet `let sigma = ["a"; "b"; "c"]`, c'est à dire qu'on l'implémente par une liste. Écrire une fonction OCaml de signature `sigma_k : 'a list -> int -> 'a list list` qui génère le langage  $\Sigma^k$  sous la forme d'un liste de liste. Les éléments de cette liste seront les mots. Par exemple, `sigma_k sigma 2` renvoie :

```

1  [["a"; "a"]; ["a"; "b"]; ["a"; "c"]; ["b"; "a"]; ["b"; "b"]; ["b"; "c"]; ["c";
    "a"]; ["c"; "b"]; ["c"; "c"]]

```

**Solution :**

```
1  let sigma = ["a"; "b"; "c"];; (* Sigma *)
2
3  let rec sigma_k alphabet k =
4      match k with
5      | 0 -> []
6      | 1 -> List.map (fun letter -> [letter]) alphabet
7      | k -> List.fold_left
8          (fun words letter ->
9              words@(List.map (fun word -> letter::word) (sigma_k
10                  alphabet (k - 1))))
10         [] alphabet;;
11  sigma_k sigma 5;;
```

B4. Peut-on représenter  $\Sigma^*$  avec cette implémentation?

**Solution :** Non, car le nombre d'éléments d'une liste est fini et  $\Sigma^*$  est un infini dénombrable.