Théorie des Langages 1

Cours 7 : Propriétés de fermeture

L. Rieg (*thanks* M. Echenim)

Grenoble INP - Ensimag, 1re année

Année 2020-2021

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$ qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$
qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$ qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

- $s^*(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$ qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

- $s^*(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$
- $s^*(aw) = s(a).s^*(w)$

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$ qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

- $s^*(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$
- $s^*(aw) = s(a).s^*(w)$

On étend s^* aux langages : $\overline{s} : \mathcal{P}(V^*) \to \mathcal{P}(W^*)$.

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$
qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

- $s^*(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$
- $s^*(aw) = s(a).s^*(w)$

On étend s^* aux langages : $\overline{s} : \mathcal{P}(V^*) \to \mathcal{P}(W^*)$.

$$\forall L \subseteq V^*,\ \overline{s}(L) = \bigcup_{w \in L} s^*(w)$$

Substitution régulière

Définition

Soit V et W deux vocabulaires.
Une substitution régulière est une fonction $s : V \to \mathcal{P}(W^*)$ qui à tout $a \in V$ associe un langage régulier $s(a) \subseteq W^*$.

On étend s aux mots par induction : $s^* : V^* \to \mathcal{P}(W^*)$

- $s^*(\varepsilon) = \{\varepsilon\}$
- $s^*(aw) = s(a).s^*(w)$

On étend s^* aux langages : $\overline{s} : \mathcal{P}(V^*) \to \mathcal{P}(W^*)$.

$$\forall L \subseteq V^*,\ \overline{s}(L) = \bigcup_{w \in L} s^*(w)$$

On pourra noter s au lieu de s^* ou $\overline{s}$.

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{aligned} L &= \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} \\ s(a) &= \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} \\ s(b) &= \{cd\} \end{aligned}$$

Alors $s(L) =$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} \\ s(a) & = & \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} \\ s(b) & = & \{cd\} \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\}$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{aligned} L &= \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) &= \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} \\ s(b) &= \{cd\} \end{aligned}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\}$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{aligned} L &= \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) &= \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} = c^* \\ s(b) &= \{cd\} \end{aligned}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\}$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} = c^* \\ s(b) & = & \{cd\} = cd \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\}$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{aligned} L &= \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) &= \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} = c^* \\ s(b) &= \{cd\} = cd \end{aligned}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\} = c^*(cd)^*$

Propriété de fermeture

Exemple

Soient $V = \{a, b\}$ et $W = \{c, d\}$. On pose :

$$\begin{aligned} L &= \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) &= \left\{c^i \mid i \geq 0\right\} = c^* \\ s(b) &= \{cd\} = cd \end{aligned}$$

Alors $s(L) = \left\{c^i(cd)^j \mid i, j \geq 0\right\} = c^*(cd)^*$

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par substitution régulière.

Autrement dit, si L est un langage régulier et s est une substitution régulière, alors $s(L)$ est un langage régulier.

Preuve du théorème

Étapes :

1. On étend les substitutions régulières aux expressions régulières :
$$\forall \text{ ER } E \text{ sur } V,\ s(E) \stackrel{\mathsf{def}}{=} s(\mathcal{L}(E)).$$

2. On prouve que si E est une expression régulière sur V, alors il existe une expression régulière E' sur W telle que $s(E) = \mathcal{L}(E')$.

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s *une substitution régulière. Pour tous* $u, v \in V^*$, *on a*

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base $\quad s^*(\varepsilon.v)$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)\ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base $\quad s^*(\varepsilon.v) \quad = \quad s^*(v)$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{array}{rcr} s^*(\varepsilon.v) & = & s^*(v) \\ & = & \{\varepsilon\}.s^*(v) \end{array}$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{aligned} s^*(\varepsilon.v) &= s^*(v) \\ &= \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ &= s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{aligned}$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{aligned} s^*(\varepsilon.v) &= s^*(v) \\ &= \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ &= s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{aligned}$$

Induction $s^*(au'.v)$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

$$\text{Base} \quad \begin{array}{rcr} s^*(\varepsilon.v) & = & s^*(v) \\ & = & \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ & = & s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{array}$$

$$\text{Induction} \quad s^*(au'.v) \quad = \quad s^*(a(u'.v))$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)\ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{array}{rcl} s^*(\varepsilon.v) & = & s^*(v) \\ & = & \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ & = & s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{array}$$

Induction
$$\begin{array}{rcl} s^*(au'.v) & = & s^*(a(u'.v)) \\ & = & s(a).s^*(u'.v) \end{array}$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)\ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{array}{rcl} s^*(\varepsilon.v) & = & s^*(v) \\ & = & \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ & = & s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{array}$$

Induction
$$\begin{array}{rcll} s^*(au'.v) & = & s^*(a(u'.v)) & \\ & = & s(a).s^*(u'.v) & \\ & = & s(a).(s^*(u').s^*(v)) & \text{(HI)} \end{array}$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)\ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{aligned} s^*(\varepsilon.v) &= s^*(v) \\ &= \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ &= s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{aligned}$$

Induction
$$\begin{aligned} s^*(au'.v) &= s^*(a(u'.v)) \\ &= s(a).s^*(u'.v) \\ &= s(a).(s^*(u').s^*(v)) && \text{(HI)} \\ &= (s(a).s^*(u')).s^*(v) \end{aligned}$$

Lemme intermédiaire sur les mots

Proposition

Soit s une substitution régulière. Pour tous $u, v \in V^*$, on a

$$s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v) \ .$$

Preuve : Soit $v \in V^*$. On prouve que pour tout $u \in V^*$ on a $s^*(u.v) = s^*(u).s^*(v)$ par induction structurelle sur u.

Base
$$\begin{aligned} s^*(\varepsilon.v) &= s^*(v) \\ &= \{\varepsilon\}.s^*(v) \\ &= s^*(\varepsilon).s^*(v) \end{aligned}$$

Induction
$$\begin{aligned} s^*(au'.v) &= s^*(a(u'.v)) \\ &= s(a).s^*(u'.v) \\ &= s(a).(s^*(u').s^*(v)) && \text{(HI)} \\ &= (s(a).s^*(u')).s^*(v) \\ &= s^*(au').s^*(v) \end{aligned}$$

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{array}{lcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{array}{rcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{array}{rcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.
  Comme $v \in E.E'$, il existe $u \in E$ et $u' \in E'$ tels que $v = u.u'$.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s *une substitution régulière, et soient* E *et* E' *des expressions régulières sur* V*. Alors*

$$\begin{array}{rcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.
  Comme $v \in E.E'$, il existe $u \in E$ et $u' \in E'$ tels que $v = u.u'$.
  Donc $w \in s(u.u') = s(u).s(u')$.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{array}{rcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.
  Comme $v \in E.E'$, il existe $u \in E$ et $u' \in E'$ tels que $v = u.u'$.
  Donc $w \in s(u.u') = s(u).s(u')$.
  Comme $s(u) \subseteq s(E)$ et $s(u') \subseteq s(E')$, on a le résultat.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{array}{rcl} s(E.E') & = & s(E).s(E') \\ s(E+E') & = & s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) & = & s(E)^* \end{array}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.
  Comme $v \in E.E'$, il existe $u \in E$ et $u' \in E'$ tels que $v = u.u'$.
  Donc $w \in s(u.u') = s(u).s(u')$.
  Comme $s(u) \subseteq s(E)$ et $s(u') \subseteq s(E')$, on a le résultat.

  Exercice : Vérifier que $s(E).s(E') \subseteq s(E.E')$.

Lemme intermédiaire sur les ER

Lemme

Soit s une substitution régulière, et soient E et E' des expressions régulières sur V. Alors

$$\begin{aligned} s(E.E') &= s(E).s(E') \\ s(E+E') &= s(E) \cup s(E') \\ s(E^*) &= s(E)^* \end{aligned}$$

Preuve.

- Prouvons que $s(E.E') \subseteq s(E).s(E')$.

  Soit $w \in s(E.E')$. Il existe $v \in E.E'$ tel que $w \in s(v)$.
  Comme $v \in E.E'$, il existe $u \in E$ et $u' \in E'$ tels que $v = u.u'$.
  Donc $w \in s(u.u') = s(u).s(u')$.
  Comme $s(u) \subseteq s(E)$ et $s(u') \subseteq s(E')$, on a le résultat.

  Exercice : Vérifier que $s(E).s(E') \subseteq s(E.E')$.

- Idem pour $E + E'$ et E^*. (plus facile)

Preuve du théorème

Étapes :

1. On étend les substitutions régulières aux expressions régulières :
$$\forall \text{ ER } E \text{ sur } V,\ s(E) \stackrel{\text{def}}{=} s(\mathcal{L}(E)).$$

2. On prouve que si E est une expression régulière sur V, alors il existe une expression régulière E' sur W telle que $s(E) = \mathcal{L}(E')$.

Preuve du théorème

Étapes :

1. On étend les substitutions régulières aux expressions régulières :
$$\forall \text{ ER } E \text{ sur } V,\ s(E) \stackrel{\mathsf{def}}{=} s(\mathcal{L}(E)).$$
2. On prouve que si E est une expression régulière sur V, alors il existe une expression régulière E' sur W telle que $s(E) = \mathcal{L}(E')$.

Preuve du théorème de l'étape 2.
Par induction structurelle :

Preuve du théorème

Étapes :

1. On étend les substitutions régulières aux expressions régulières :
   $$\forall \text{ ER } E \text{ sur } V,\ s(E) \stackrel{\text{def}}{=} s(\mathcal{L}(E)).$$

2. On prouve que si E est une expression régulière sur V, alors il existe une expression régulière E' sur W telle que $s(E) = \mathcal{L}(E')$.

Preuve du théorème de l'étape 2.
Par induction structurelle :

Base Pour $E \in \{\varnothing, \epsilon, a\}$, OK : $\emptyset$, $\{\varepsilon\}$ et $s(a)$
($s(a)$ régulier donc représentable par ER)

Preuve du théorème

Étapes :

1. On étend les substitutions régulières aux expressions régulières :
$$\forall \text{ ER } E \text{ sur } V,\ s(E) \stackrel{\text{def}}{=} s(\mathcal{L}(E)).$$

2. On prouve que si E est une expression régulière sur V, alors il existe une expression régulière E' sur W telle que $s(E) = \mathcal{L}(E')$.

Preuve du théorème de l'étape 2.

Par induction structurelle :

Base Pour $E \in \{\varnothing, \epsilon, a\}$, OK : $\emptyset$, $\{\varepsilon\}$ et $s(a)$
($s(a)$ régulier donc représentable par ER)

Induction Pour $E \in \{E_1.E_2,\ E_1 + E_2,\ {E_1}^*\}$, cf lemme précédent

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \{ab^i \mid i \geq 0\} \\ s(a) & = & \{cdc\} \\ s(b) & = & \{dc\} \end{array}$$

Alors $s(L) = \{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\}$

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \{ab^i \mid i \geq 0\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} \\ s(b) & = & \{dc\} \end{array}$$

Alors $s(L) = \{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\}$

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} = cdc \\ s(b) & = & \{dc\} \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\right\}$

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} = cdc \\ s(b) & = & \{dc\} = dc \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\right\}$

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} = cdc \\ s(b) & = & \{dc\} = dc \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\right\} = cdc(dc)^* = c(dc)^+$

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} = cdc \\ s(b) & = & \{dc\} = dc \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\right\} = cdc(dc)^* = c(dc)^+$

Corollaire

La classe des langages réguliers est fermée par homomorphisme.

Homomorphismes

Définition

Une substitution régulière qui à tout $a \in V$ associe un singleton est un homomorphisme.

Exemple

$$\begin{array}{rcl} L & = & \left\{ab^i \mid i \geq 0\right\} = ab^* \\ s(a) & = & \{cdc\} = cdc \\ s(b) & = & \{dc\} = dc \end{array}$$

Alors $s(L) = \left\{cdc(dc)^i \mid i \geq 0\right\} = cdc(dc)^* = c(dc)^+$

Corollaire

La classe des langages réguliers est fermée par homomorphisme.
(et par homomorphisme inverse, voir poly §2.3)

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*
- *complémentation*

Complémentation

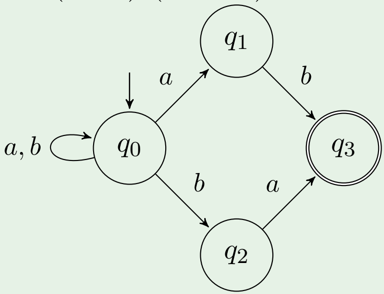
Question : si L est un langage régulier, peut-on construire un automate qui reconnaît $\overline{L}$?

Complémentation

Question : si L est un langage régulier, peut-on construire un automate qui reconnaît $\overline{L}$?

Exemple

$L = (a+b)^*(ab+ba)$

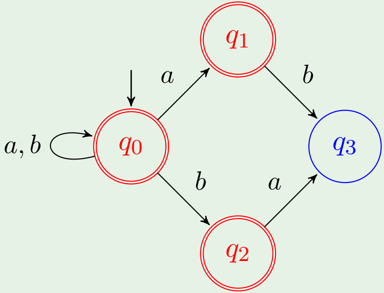


Complémentation

Question : si L est un langage régulier, peut-on construire un automate qui reconnaît $\overline{L}$?

Exemple

$L = (a+b)^*(ab+ba)$

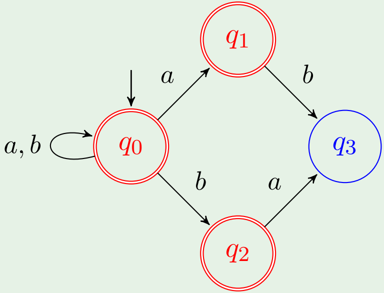


Complémentation

Question : si L est un langage régulier, peut-on construire un automate qui reconnaît $\overline{L}$?

Exemple

$L = (a+b)^*(ab+ba)$



$\mathcal{L}(A') = (a+b)^*$

perdu...

Complémentation (suite)

Problème : on ne peut pas intervertir F et $Q \setminus F$ car
il peut y avoir deux chemins de même trace dans unAFND,
et si l'un mène en F mais pas l'autre on accepte...

Complémentation (suite)

Problème : on ne peut pas intervertir F et $Q \setminus F$ car
il peut y avoir deux chemins de même trace dans unAFND,
et si l'un mène en F mais pas l'autre on accepte...
Solution : On déterminise...

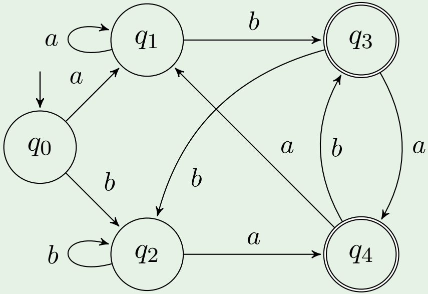
Complémentation (suite)

Problème : on ne peut pas intervertir F et $Q \setminus F$ car
il peut y avoir deux chemins de même trace dans unAFND,
et si l'un mène en F mais pas l'autre on accepte...

Solution : On déterminise...

Exemple

$L = (a + b)^*(ab + ba)$

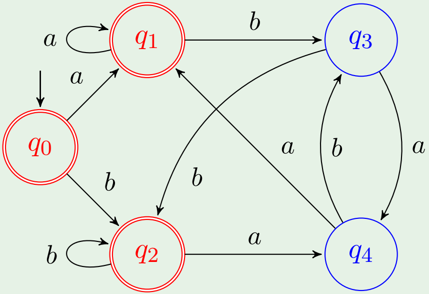


Complémentation (suite)

Problème : on ne peut pas intervertir F et $Q \setminus F$ car
il peut y avoir deux chemins de même trace dans unAFND,
et si l'un mène en F mais pas l'autre on accepte...
Solution : On déterminise...

Exemple

$L = (a+b)^*(ab+ba)$

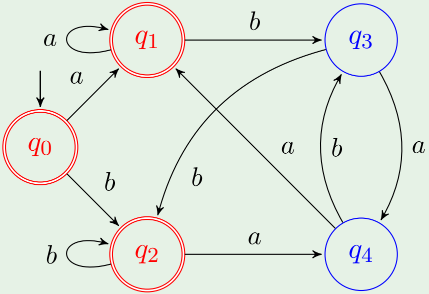


Complémentation (suite)

Problème : on ne peut pas intervertir F et $Q \setminus F$ car
il peut y avoir deux chemins de même trace dans unAFND,
et si l'un mène en F mais pas l'autre on accepte...
Solution : On déterminise...

Exemple

$L = (a+b)^*(ab+ba)$



Gagné !

Exercice : déterminer l'ER associée à cet automate

Complémentation (fin)

Proposition

La classe des langages réguliers est fermée par complémentation.

Complémentation (fin)

Proposition

La classe des langages réguliers est fermée par complémentation.

Preuve. Soit L un langage régulier et considérons $A = \langle Q, V, \delta, \{q_0\}, F\rangle$ un automate fini déterministe complet tel que $\mathcal{L}(A) = L$.

Complémentation (fin)

Proposition

La classe des langages réguliers est fermée par complémentation.

Preuve. Soit L un langage régulier et considérons $A = \langle Q, V, \delta, \{q_0\}, F \rangle$ un automate fini déterministe complet tel que $\mathcal{L}(A) = L$.

Posons $A' \stackrel{\text{def}}{=} \langle Q, V, \delta, \{q_0\}, Q \setminus F \rangle$.
A' étant déterministe complet, on a :

$$w \in \mathcal{L}(A') \;\Leftrightarrow\; \delta^*(q_0, w) \in Q \setminus F \;\Leftrightarrow\; \delta^*(q_0, w) \notin F \;\Leftrightarrow\; w \notin \mathcal{L}(A)$$

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*
- *complémentation*

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*
- *complémentation*
- *intersection*
- *différence*

Stabilité des langages réguliers

Théorème

La classe des langages réguliers est fermée par :

- *union, concaténation et concaténation itérée (cf. cours 3)*
- *substitution régulière et homomorphisme*
- *complémentation*
- *intersection*
- *différence*

Preuve :

$$\begin{aligned} L \cap M &= \overline{\overline{L} \cup \overline{M}} \\ L \setminus M &= L \cap \overline{M} \end{aligned}$$

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?

Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?
Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Idée : Utiliser des propriétés de fermeture

Supposons donné un langage M dont on connaît la non-régularité.

Pour prouver que L n'est pas régulier, on peut procéder par l'absurde :

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?
Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Idée : Utiliser des propriétés de fermeture

Supposons donné un langage M dont on connaît la non-régularité.

Pour prouver que L n'est pas régulier, on peut procéder par l'absurde :

1. On suppose que L est régulier.

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?
Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Idée : Utiliser des propriétés de fermeture

Supposons donné un langage M dont on connaît la non-régularité.

Pour prouver que L n'est pas régulier, on peut procéder par l'absurde :

1. On suppose que L est régulier.
2. On exhibe une série de transformations qui préservent la régularité et qui permettent de passer de L à M.

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?
Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Idée : Utiliser des propriétés de fermeture

Supposons donné un langage M dont on connaît la non-régularité.

Pour prouver que L n'est pas régulier, on peut procéder par l'absurde :

1. On suppose que L est régulier.
2. On exhibe une série de transformations qui préservent la régularité et qui permettent de passer de L à M.
3. Contradiction : l'hypothèse que L était régulier est fausse.

Langages non-réguliers

Question : comment prouver qu'un langage n'est pas régulier ?
Autrement dit : Étant donné un langage L, comment prouver que pour tout automate fini A, $\mathcal{L}(A) \neq L$?

Idée : Utiliser des propriétés de fermeture

Supposons donné un langage M dont on connaît la non-régularité.

Pour prouver que L n'est pas régulier, on peut procéder par l'absurde :

1. On suppose que L est régulier.
2. On exhibe une série de transformations qui préservent la régularité et qui permettent de passer de L à M.
3. Contradiction : l'hypothèse que L était régulier est fausse.

Cette technique de preuve est appelée réduction : on réduit le problème de la régularité de L à celle de M. (*cf.* TL2)

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*, |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*, |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

1. Supposons que L est régulier.

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*, |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

1. Supposons que L est régulier.
2. Alors $L' \stackrel{\text{def}}{=} L \cap a^*cb^* = L \cap \{a^p cb^q \mid p, q \geq 0\} = \{a^p cb^p \mid p \geq 0\}$ est nécessairement régulier.

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*, |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

1. Supposons que L est régulier.
2. Alors $L' \stackrel{\text{def}}{=} L \cap a^*cb^* = L \cap \{a^p cb^q \mid p, q \geq 0\} = \{a^p cb^p \mid p \geq 0\}$ est nécessairement régulier.

2'. Soit l'homomorphisme h défini par :

$$h : \begin{cases} a & \rightarrow & 0 \\ b & \rightarrow & 1 \\ c & \rightarrow & \varepsilon \end{cases}$$

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*, |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

1. Supposons que L est régulier.
2. Alors $L' \stackrel{\text{def}}{=} L \cap a^*cb^* = L \cap \{a^p cb^q \mid p, q \geq 0\} = \{a^p cb^p \mid p \geq 0\}$ est nécessairement régulier.

2'. Soit l'homomorphisme h défini par :

$$h : \begin{cases} a & \to & 0 \\ b & \to & 1 \\ c & \to & \varepsilon \end{cases}$$

Le langage $h(L')$ est nécessairement régulier.

Exercice

On admet que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Montrer que $L = \{wcw' \mid w, w' \in \{a,b\}^*,\ |w|_a = |w'|_b\}$ n'est pas régulier.

1. Supposons que L est régulier.
2. Alors $L' \stackrel{\text{def}}{=} L \cap a^* c b^* = L \cap \{a^p c b^q \mid p, q \geq 0\} = \{a^p c b^p \mid p \geq 0\}$ est nécessairement régulier.

2'. Soit l'homomorphisme h défini par :

$$h : \left\{ \begin{array}{ccc} a & \to & 0 \\ b & \to & 1 \\ c & \to & \varepsilon \end{array} \right.$$

Le langage $h(L')$ est nécessairement régulier.

3. Mais $h(L') = M$, contradiction.

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

- **Question :** comment prouver que M n'est pas régulier ?

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

- **Question :** comment prouver que M n'est pas régulier ?
- En se servant d'une condition nécessaire sur les langages réguliers qui permettra de refaire un raisonnement par l'absurde

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

- **Question :** comment prouver que M n'est pas régulier ?
- En se servant d'une condition nécessaire sur les langages réguliers qui permettra de refaire un raisonnement par l'absurde
- On va supposer qu'il existe un automate fini A tel que $\mathcal{L}(A) = M$ et tenter d'aboutir à une contradiction

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

- **Question :** comment prouver que M n'est pas régulier ?
- En se servant d'une condition nécessaire sur les langages réguliers qui permettra de refaire un raisonnement par l'absurde
- On va supposer qu'il existe un automate fini A tel que $\mathcal{L}(A) = M$ et tenter d'aboutir à une contradiction
- La condition nécessaire la plus standard est donnée par le **lemme de l'étoile**

Un premier langage non-régulier

Pour utiliser les propriétés de fermeture, il faut connaître au moins un langage M non-régulier.

- **Question :** comment prouver que M n'est pas régulier ?
- En se servant d'une condition nécessaire sur les langages réguliers qui permettra de refaire un raisonnement par l'absurde
- On va supposer qu'il existe un automate fini A tel que $\mathcal{L}(A) = M$ et tenter d'aboutir à une contradiction
- La condition nécessaire la plus standard est donnée par le **lemme de l'étoile**

  (lemme de pompage, de la pompe, *pumping lemma*)

Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.

Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.

Principe du lemme de l'étoile

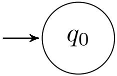
Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq m$ et $q_j = q_k$

Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$

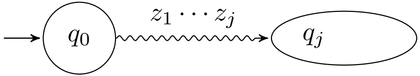
Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



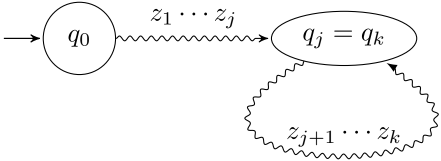
Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



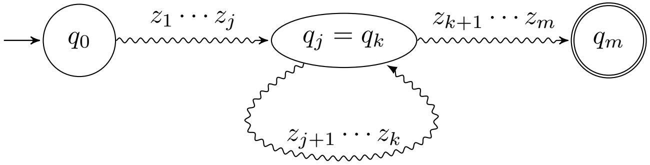
Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



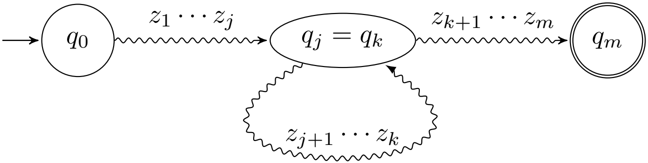
Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m+1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m+1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



Principe du lemme de l'étoile

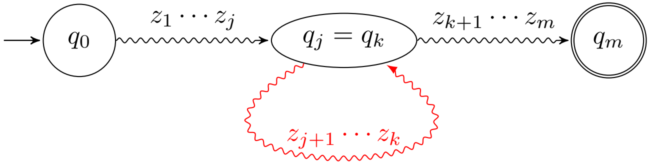
Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



$$z_1 \cdots z_j z_{j+1} \cdots z_k z_{k+1} \cdots z_m \in \mathcal{L}(A)$$

Principe du lemme de l'étoile

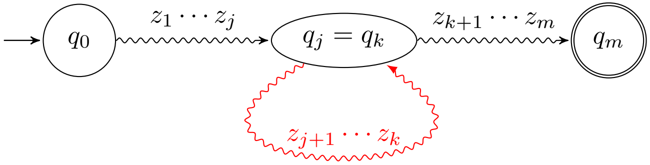
Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F\rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m + 1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m + 1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



$$z_1 \cdots z_j (z_{j+1} \cdots z_k)^2 z_{k+1} \cdots z_m \in \mathcal{L}(A)$$

Principe du lemme de l'étoile

Soit $A = \langle Q, V, \delta, I, F \rangle$ un automate *sans ε-transition*, avec $|Q| = n \geq 1$.
Soit $z = z_1 \cdots z_m$ un mot sur V de longueur $m \geq n$ reconnu par A.
Il existe donc un chemin $(q_0, z_1, q_1) \cdots (q_{m-1}, z_m, q_m)$ dans A,
avec $q_0 \in I$ et $q_m \in F$.
Il y a $m+1$ états dans ce chemin et n états dans Q, et $m+1 > n$
donc $\exists j, k$ tels que $0 \leq j < k \leq n$ et $q_j = q_k$



$\forall i \geq 0,\ z_1 \cdots z_j (z_{j+1} \cdots z_k)^i z_{k+1} \cdots z_m \in \mathcal{L}(A)$

Énoncé du lemme de l'étoile

Lemme

Soit L un langage régulier. Alors il existe $n \geq 1$ tel que pour tout mot z, si $z \in L$ et $|z| \geq n$, alors z est de la forme uvw avec :

- $|uv| \leq n$
- $|v| \geq 1$
- $\forall i \geq 0, uv^i w \in L$

Énoncé du lemme de l'étoile

Lemme

Soit L un langage régulier. Alors il existe $n \geq 1$ tel que pour tout mot z, si $z \in L$ et $|z| \geq n$, alors z est de la forme uvw avec :

- $|uv| \leq n$
- $|v| \geq 1$
- $\forall i \geq 0, uv^iw \in L \qquad \iff \quad uv^*w \subseteq L$

Énoncé du lemme de l'étoile

Lemme

Soit L *un langage régulier. Alors il existe* $n \geq 1$ *tel que*
pour tout mot z*, si* $z \in L$ *et* $|z| \geq n$*, alors* z *est de la forme* uvw *avec :*

- $|uv| \leq n$
- $|v| \geq 1$
- $\forall i \geq 0, uv^i w \in L \qquad \iff \quad uv^* w \subseteq L$

Attention

Le lemme de l'étoile est une condition nécessaire mais non suffisante des langages réguliers : il existe des langages non-réguliers qui le satisfont.

Énoncé du lemme de l'étoile

Lemme

Soit L un langage régulier. Alors il existe $n \geq 1$ tel que pour tout mot z, si $z \in L$ et $|z| \geq n$, alors z est de la forme uvw avec :

- $|uv| \leq n$
- $|v| \geq 1$
- $\forall i \geq 0, uv^i w \in L \qquad \iff \quad uv^* w \subseteq L$

Attention

Le lemme de l'étoile est une condition nécessaire mais non suffisante des langages réguliers : il existe des langages non-réguliers qui le satisfont.

Remarques

- *Que se passe-t-il pour les langages finis ?*
- *Des lemmes de l'étoile existent aussi pour d'autres classes de langages.*

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)
- Le mot z est décomposé en uvw, où $|uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  (on ne contrôle pas la façon dont z est décomposé, hormis la contrainte sur les longueurs)

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)
- Le mot z est décomposé en uvw, où $|uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  (on ne contrôle pas la façon dont z est décomposé, hormis la contrainte sur les longueurs)
- On choisit une valeur de i telle que $uv^iw \notin L$.

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)
- Le mot z est décomposé en uvw, où $|uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  (on ne contrôle pas la façon dont z est décomposé,
  hormis la contrainte sur les longueurs)
- On choisit une valeur de i telle que $uv^iw \notin L$.

On obtient une contradiction : L ne peut pas être régulier.

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)
- Le mot z est décomposé en uvw, où $|uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  (on ne contrôle pas la façon dont z est décomposé, hormis la contrainte sur les longueurs)
- On choisit une valeur de i telle que $uv^iw \notin L$.

On obtient une contradiction : L ne peut pas être régulier.

Remarque

On utilise en fait la contraposée du lemme de l'étoile :

$$L \text{ régulier} \quad \Rightarrow \quad \exists n \geq 1, \forall z \in L, \ldots$$

Comment se servir du lemme de l'étoile ?

On procède par l'absurde : on suppose que L est régulier et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- On considère l'entier n du lemme. (on ne sait rien de sa valeur)
- On choisit un mot $z \in L$ de longueur au moins n. (z dépendra de n)
- Le mot z est décomposé en uvw, où $|uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  (on ne contrôle pas la façon dont z est décomposé, hormis la contrainte sur les longueurs)
- On choisit une valeur de i telle que $uv^iw \notin L$.

On obtient une contradiction : L ne peut pas être régulier.

Remarque

On utilise en fait la contraposée du lemme de l'étoile :

$$L \text{ régulier} \Rightarrow \exists n \geq 1, \forall z \in L, \ldots$$

$$\forall n \geq 1, \exists z \in L, \ldots \Rightarrow L \text{ non régulier}$$

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.
- z est décomposé en uvw où $k \stackrel{\text{def}}{=} |uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.
- z est décomposé en uvw où $k \stackrel{\text{def}}{=} |uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  Comme $k \leq n$, on sait que $uv = 0^k$ sans pour autant connaître k !

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.
- z est décomposé en uvw où $k \stackrel{\text{def}}{=} |uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  Comme $k \leq n$, on sait que $uv = 0^k$ sans pour autant connaître k !
- On choisit $i = 0$, on devrait avoir $uv^0w = uw \in M$.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.
- z est décomposé en uvw où $k \stackrel{\text{def}}{=} |uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  Comme $k \leq n$, on sait que $uv = 0^k$ sans pour autant connaître k !
- On choisit $i = 0$, on devrait avoir $uv^0w = uw \in M$.
  Mais $uw = 0^{n-|v|}1^n \notin M$, contradiction.

Exemple

Montrer que $M = \{0^p 1^p \mid p \geq 0\}$ n'est pas régulier.

On suppose que M est régulier, et satisfait donc le lemme de l'étoile.

- Soit n l'entier du lemme. (on ne contrôle pas sa valeur)
- On choisit $z = 0^n 1^n \in M$. On a $|z| = 2n \geq n$.
- z est décomposé en uvw où $k \stackrel{\text{def}}{=} |uv| \leq n$ et $|v| \geq 1$.
  Comme $k \leq n$, on sait que $uv = 0^k$ sans pour autant connaître k !
- On choisit $i = 0$, on devrait avoir $uv^0w = uw \in M$.
  Mais $uw = 0^{n-|v|}1^n \notin M$, contradiction.

Conclusion : M n'est pas régulier.