

# Complexité des langages de requête

## Cours L3 Bases de Données

Pierre Senellart



14 mars 2018

## Évaluation de requêtes

- Requête  $Q$  dans un certain langage de requêtes (CQ, FO, FO+ $\mu$ , FO+ $\mu^+$ , SO...) – on utilisera le formalisme de la logique
- Base de données  $D$  (toujours **finie**!)
- **Évaluation de requêtes** : Calcul de  $Q(D)$
- **Complexité** de ce problème ?
- Pour simplifier l'étude de la complexité, on considère que  $Q$  est une requête **booléenne**, c'est-à-dire qu'elle renvoie  $\perp$  ou  $\top$

## Complexité en les données

Pour une certaine requête  $Q$  fixée, quelle est la complexité du calcul de  $Q(D)$  en fonction de la **taille de la base de données**  $D$  ?

## Complexité combinée

Pour un certain langage de requêtes  $\mathcal{Q}$ , quelle est la complexité du calcul de  $Q(D)$  en fonction de la **taille de la requête  $Q \in \mathcal{Q}$**  et de la **base de données  $D$**  ?

## Classes de complexité

- On se restreint aux problèmes **booléens** (renvoyant  $\perp$  ou  $\top$ )
- Ensemble des problèmes résolubles par une **méthode de calcul à ressources contraintes** :
- Par exemple :
  - PTIME** : Machine de Turing déterministe en temps polynomial
  - NP** : Machine de Turing non-déterministe en temps polynomial
  - PSPACE** : Machine de Turing déterministe en espace polynomial
  - AC<sup>0</sup>** : Circuit Booléen de taille polynomiale et profondeur constante
- On sait :  $AC^0 \subsetneq PTIME \subseteq NP \subseteq PSPACE$
- On ne sait pas si  $PSPACE \subseteq PTIME$  (!)

## Appartenance et difficulté pour une classe

- Un problème  $P$  **appartient** à une classe de complexité  $\mathcal{C}$  (ou dans  $\mathcal{C}$ ) s'il est **résolvable** par la méthode de calcul à ressources contraintes correspondante
- Un problème  $P$  est **difficile** pour la classe de complexité  $\mathcal{C}$  (ou  $\mathcal{C}$ -difficile) s'il existe une **réduction** permettant de transformer n'importe quel problème  $P' \in \mathcal{C}$  en une instance du problème  $P$
- **complet** : dans  $\mathcal{C} + \mathcal{C}$ -difficile
- Différentes manières de définir les réductions
- Ici, on supposera qu'il existe une fonction calculable **en temps polynomial** qui **transforme** une instance  $I'$  du problème  $P'$  en une instance  $I$  de  $P$  telle que  $P(I) = P'(I')$

## Complexité descriptive

- Un langage de requêtes  $\mathcal{Q}$  **capture** une classe de complexité  $\mathcal{C}$  si :
  - Pour tout  $Q \in \mathcal{Q}$ , le problème d'évaluation de requêtes pour  $Q$  est dans  $\mathcal{C}$  (complexité en les données)
  - Pour tout problème  $P$  dans  $\mathcal{C}$ , il existe une requête  $Q \in \mathcal{Q}$  telle que l'évaluation de  $Q$  **résout exactement**  $P$  (sans réduction)!
- Si  $\mathcal{Q}$  capture  $\mathcal{C}$  et si  $\mathcal{C}$  a des problèmes complets pour  $\mathcal{C}$ , alors il existe  $Q \in \mathcal{Q}$  telle que  $Q$  est  $\mathcal{C}$ -complet, mais **la réciproque n'est pas vraie**

# Plan

Introduction

Requêtes conjonctives

Logique du premier ordre

Logiques à point fixe

Références

## Complexité dans les données

### Théorème

*L'évaluation de CQ est **PTIME** en complexité dans les données.*

### Démonstration.

Au tableau, en énumérant toutes les valuations des variables de la requête dans les données. On verra plus loin un résultat beaucoup plus fort. □

## Complexité combinée

### Théorème

*L'évaluation de CQ est **NP-complète** en complexité combinée.*

### Démonstration.

Au tableau. Appartenance dans NP est facile. Difficulté pour NP vient du problème de 3-coloriabilité d'un graphe. □

## Requête $\alpha$ -acyclique

- Une CQ peut être vue comme un **hypergraphe** (les sommets sont les variables, les hyperarêtes les atomes de la CQ, étiquetées par le nom de relation)
- Un hypergraphe  $\mathcal{H}$  a un **arbre de jointure** quand on peut trouver un arbre dont les nœuds sont étiquetés par les hyperarêtes de  $\mathcal{H}$  et tel que :
  - chaque hyperarête de  $\mathcal{H}$  apparaît comme étiquette d'un nœud de l'arbre ;
  - pour chaque sommet  $x$  de  $\mathcal{H}$ , l'ensemble des nœuds de l'arbre étiquetés par une arête incluant  $x$  est un sous-arbre connexe de l'arbre
- Une requête est  **$\alpha$ -acyclique** si son hypergraphe admet un **arbre de jointure**
- Peut-être obtenu en temps **linéaire** s'il existe [Tarjan and Yannakakis, 1984]

## Algorithme de Yannakakis [Yannakakis, 1981]

- Algorithme d'évaluation des requêtes acycliques (non nécessairement booléennes) :
  1. Construction de l'**arbre de jointure**
  2. Élimination de tous les tuples des relations inutiles au calcul avec l'opérateur de **semi-jointure**  $\bowtie$  :  
 $R \bowtie S = \Pi_{R.*}(R \bowtie S)$  par un parcours dans l'arbre de jointure, de bas en haut, puis de haut en bas
  3. Évaluation de la requête de **bas en haut**, en calculant les jointures suivant l'arbre et en projetant au fur et à mesure sur les seules variables encore utiles
- Complexité **polynomiale** en la taille de la requête, de l'entrée, de la sortie (complexité combinée)
- Illustration au tableau sur

$$R(x, y, z) \wedge S(y, v) \wedge T(y, z, u) \wedge U(u, z, w) \wedge V(u, w, t)$$

# Plan

Introduction

Requêtes conjonctives

Logique du premier ordre

Logiques à point fixe

Références

# Complexité dans les données

## Théorème

*L'évaluation de FO est **PTIME** en complexité dans les données.*

## Démonstration.

Au tableau, par mise en forme prénexe et évaluation naïve. □

# FO ne capture pas tout PTIME

## Théorème

*On ne peut pas calculer en FO qu'une relation contenant un ordre total a un nombre pair d'éléments, ou qu'un graphe est connexe.*

Non prouvé, la preuve repose sur les jeux d'Ehrenfeucht–Fraïssé (voir [Libkin, 2004]).

## Complexité dans les données, plus précis

### Théorème

*L'évaluation de FO est  $AC^0$  en complexité dans les données.*

### Démonstration.

Au tableau, intuition de preuve basée sur l'algèbre relationnelle.



## Complexité combinée

### Théorème

*L'évaluation de FO est **PSPACE-complète** en complexité combinée.*

### Démonstration.

Au tableau. Appartenance dans PSPACE facile. Difficulté pour PSPACE vient du problème QSAT. □

# Plan

Introduction

Requêtes conjonctives

Logique du premier ordre

**Logiques à point fixe**

Références

# Complexité en les données

## Théorème

*L'évaluation de  $FO+\mu^+$  est **PTIME** en complexité en les données.*

*L'évaluation de  $FO+\mu$  est **PSPACE** en complexité en les données.*

## Démonstration.

Au tableau. Facile.



## Connexité, parité

### Théorème

*Le problème de connexité peut s'exprimer en  $FO+\mu^+$ .*

*Le problème de parité du nombre d'éléments (ou de tuples) dans une relation arbitraire **ne peut pas** s'exprimer en  $FO+\mu$ .*

### Démonstration.

Preuve de la première partie au tableau, facile, cf. le cours sur requêtes récursives.

Deuxième partie admise (voir [Abiteboul et al., 1995], chapitre 17). □

## Parité et $FO+\mu^+$ , avec ordre

### Théorème

*$FO+\mu^+$  peut calculer si une relation contenant un ordre total a un nombre pair d'éléments.*

### Démonstration.

Au tableau, par construction explicite.



## Résultats plus généraux

### Théorème

$FO+\mu^+$  exprime *PTIME* sur les données avec un ordre total sur les éléments du domaine.

$FO+\mu$  exprime *PSPACE* sur les données avec un ordre total sur les éléments du domaine.

### Démonstration.

Intuition de preuve au tableau. □

## Complexité en les données (bis)

### Théorème

*L'évaluation de  $FO+\mu^+$  est **PTIME-complète** en complexité en les données.*

*L'évaluation de  $FO+\mu$  est **PSPACE-complète** en complexité en les données.*

### Démonstration.

Au tableau. Difficulté vient de la complexité descriptive sur les structures ordonnées. □

## Au delà : Théorème de Fagin

### Théorème

$\exists SO$  (fragment de  $SO$  sans quantification universelle de deuxième ordre) *exprime NP*.

Résultat fondamental, preuve difficile.

## Complexité descriptive et $P \neq NP$

- On a une **caractérisation de NP** :  $\exists SO$
- Si on avait une caractérisation de  $P$ ... (indépendamment d'ordre sur les éléments du domaine!) par une classe  $\mathcal{Q}$
- ... on pourrait montrer  $P \neq NP$  en exhibant une requête de  $\exists SO$  non exprimable dans  $\mathcal{Q}$ !
- Mais on en est **loin**...

# Plan

Introduction

Requêtes conjonctives

Logique du premier ordre

Logiques à point fixe

Références

## Références

- Chapitre 17 de [Abiteboul et al., 1995] sur la complexité de FO, des langages à point fixe
- [Libkin, 2004] sur la théorie des modèles finis et la complexité descriptive (jeux d'Ehrenfeucht–Fraïssé, parité, connexité, théorème de Fagin, etc.)

## Bibliographie I

Serge Abiteboul, Richard Hull, and Victor Vianu. *Foundations of Databases*. Addison-Wesley, 1995.

Leonid Libkin. *Elements of Finite Model Theory*. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer, 2004. doi : 10.1007/978-3-662-07003-1. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-07003-1>.

Robert Endre Tarjan and Mihalis Yannakakis. Simple linear-time algorithms to test chordality of graphs, test acyclicity of hypergraphs, and selectively reduce acyclic hypergraphs. *SIAM J. Comput.*, 13(3) :566–579, 1984. doi : 10.1137/0213035. URL <http://dx.doi.org/10.1137/0213035>.

Mihalis Yannakakis. Algorithms for acyclic database schemes. In *VLDB*, pages 82–94, 1981.