Une heuristique de branchement dirigée vers les formules Horn renommables quantifiées

Florian Letombe
CRIL, CNRS FRE 2499

3 juin 2005

Le problème QBF

- Généralisation de SAT
- Problème PSPACE-complet canonique
- Nombreuses applications en IA : planification, raisonnement non monotone, inférence paraconsistante, abduction, etc

- Complexité élevée
- Une solution possible : les classes polynomiales
- Instances de ces classes polynomiales difficiles pour les prouveurs QBF actuels

$\mathcal{QBF}$: définition formelle

Définition *($\mathcal{QBF}$)*

Une $\mathcal{QBF}$ Π est une expression de la forme

$$Q_1 X_1 \dots Q_n X_n \Phi, \qquad (n \geq 0)$$

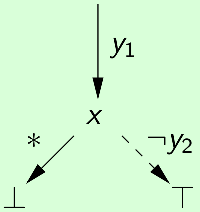
- $X_1 \dots X_n$ ensembles de variables propositionnelles
- Φ une formule propositionnelle sur ces variables
- $Q_i (0 \leq i \leq n)$ un quantificateur existentiel $\exists$ ou universel $\forall$

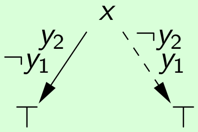
Validité d'une $\mathcal{QBF}$

Existence d'une stratégie gagnante dans un jeu contre la nature

Exemple

$$\exists\, y_1\, \forall\, x\, \exists\, y_2 \; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)] \;\not\equiv\; \forall\, x\, \exists\, y_1,\ y_2 \; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$





Prouveur à la DPLL

Exemple

$$\forall\, x\; \exists\, y_1,\; y_2\; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$

Prouveur à la DPLL

Exemple

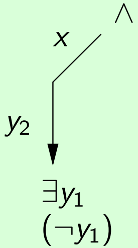
$$\forall\, x\ \exists\, y_1,\ y_2\ [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$

$$\begin{array}{l} \wedge \\ \quad \swarrow x \\ \exists\, y_1,\ y_2 \\ (y_1 \vee y_2) \wedge \\ (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge \\ (y_2) \end{array}$$

Prouveur à la DPLL

Exemple

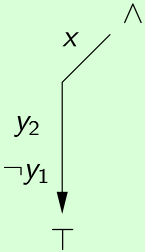
$$\forall\, x\ \exists\, y_1,\ y_2\ [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Prouveur à la DPLL

Exemple

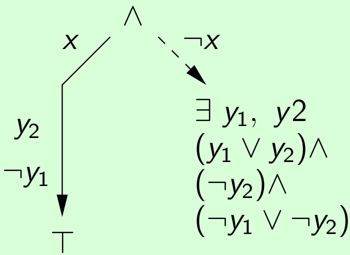
$$\forall\, x\; \exists\, y_1,\; y_2\; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Prouveur à la DPLL

Exemple

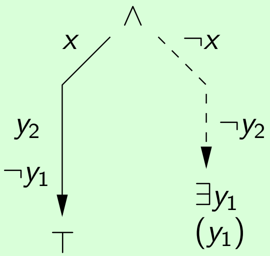
$$\forall\, x\ \exists\, y_1,\ y_2\ [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Prouveur à la DPLL

Exemple

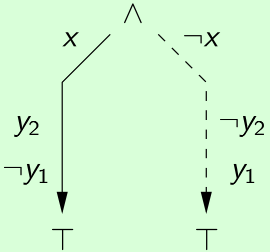
$$\forall\, x\; \exists\, y_1,\; y_2\; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Prouveur à la DPLL

Exemple

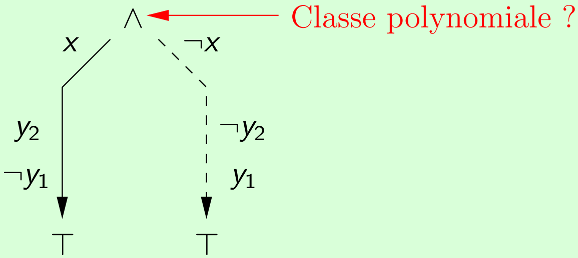
$$\forall\, x\, \exists\, y_1,\ y_2\ [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Prouveur à la DPLL

Exemple

$$\forall\, x\; \exists\, y_1,\; y_2\; [(y_1 \vee y_2) \wedge (\neg y_2 \vee x) \wedge (\neg y_1 \vee \neg y_2) \wedge (y_2 \vee \neg x)]$$



Classes Polynomiales

- Beaucoup étudié depuis longtemps dans la communauté SAT
  - Aspvall *et al.* 1979
  - Del Val 2000
- Étudié récemment pour QBF (Gent & Rowley 2002)
- Deux étapes :
  - Reconnaissance polynomiale
  - Résolution polynomiale
- Exemples de classes polynomiales : Krom, Horn, Horn renommable, ...

$\mathcal{QHF}$: définition

Définition *($\mathcal{QHF}$)*

- Clause de Horn : clause comprenant au plus un littéral positif
- $\mathcal{QHF}$: $\mathcal{QBF}$ dont la matrice ne contient que des clauses de Horn

Exemple

$$\Pi_1 = \forall\, a, b\ \exists\, c, d\ \forall\, e\ [(a \vee \neg b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg e) \wedge (\neg b \vee \neg c \vee d) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg d)]$$

ren$\mathcal{QHF}$: définition

Définition *(ren$\mathcal{QHF}$)*

- Renommer = changer la polarité d'un littéral
- Une formule est Horn renommable ssi il existe un renommage uniforme de ses variables tq sa matrice devienne Horn après renommage

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

$$\Pi_1 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee \neg b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg e) \wedge (\neg b \vee \neg c \vee d) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg d)]$$

Π_2 est Π_1 dans laquelle on a renommé b et c

Reconnaissance de formules Horn renommables

Définition *($\Rightarrow$ et $\textsc{Clos}(l)$)*

- $l \Rightarrow t$ ssi il existe une clause $C \in \Phi$ tq $l \in C$, $\neg t \in C$ et $l \neq \neg t$
- $\textsc{Clos}(l)$ désigne l'ensemble $\{t \;/\; l \Rightarrow^* t\}$

Si $\textsc{Clos}(l)$ est contradictoire (contient un littéral et son contraire) et $l \in R$, alors R n'est pas fermé

Proposition *(Proposition 1.1 de Hébrard 1994)*

Un renommage R est Horn si et seulement s'il est fermé, i.e. pour tout $l \in R$, $\textsc{Clos}(l) \subseteq R$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{\neg a\}$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{\neg a\}$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \lor b \lor \neg d \lor \neg e) \land (\neg a \lor \neg c \lor \neg e) \land (b \lor c \lor d) \land (\neg a \lor c \lor \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{\neg a, c, e\}$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\, a, b\ \exists\, c, d\ \forall\, e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\}$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\} \equiv \bot$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\, a, b\ \exists\, c, d\ \forall\, e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\} \equiv \bot$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\} \equiv \bot$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, d, e\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\} \equiv \bot$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, d, e\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Exemple

$$\Pi_2 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e$$
$$[(a \vee b \vee \neg d \vee \neg e) \wedge (\neg a \vee \neg c \vee \neg e) \wedge (b \vee c \vee d) \wedge (\neg a \vee c \vee \neg d)]$$

- $\textsc{Clos}(\neg a) = \{a, \neg a, c, d, e\} \equiv \perp$
- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, d, e\}$
- Un Horn renommage possible pour Π_2 est $\{a, \neg b, \neg c, d, e\}$

Définitions

Définition *(Distance de contradiction de Horn renommabilité d'un littéral l)*

$$\delta_l = \begin{cases} 0 \ si \ \nexists v | l \Rightarrow v \\ 1 \ si \ l \Rightarrow t \ et \ l \Rightarrow \neg t \\ 1 + min(\{\delta_v | l \Rightarrow v\}) \ sinon. \end{cases}$$

PARCOURS EN LARGEUR

Définition *(Δ)*

- $\Delta_x = 1024 \times \delta_x \times \delta_{\neg x} + \delta_x + \delta_{\neg x}$;
- la variable x est choisie si $x \in X_1$ et, $\forall y \in X_1$, $(x \neq y \Rightarrow \Delta_x \leq \Delta_y)$;
- le littéral x est enfin choisi si $\delta_x > \delta_{\neg x}$, $\neg x$ sinon.

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\, a, b\ \exists\, c, d\ \forall\, e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 0$:

- $\textsc{Clos}(a) =$

  $\{a\}$

- Littéraux à traiter :

  $a,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 1$:

- $\textsc{Clos}(a) =$ $\{a\}$
- Littéraux à traiter : $a,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 1$:

- $\textsc{Clos}(a) =$ $\{a, \neg c, \neg d\}$
- Littéraux à traiter : $\neg c$, $\neg d$,

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 2$:

- $\textsc{Clos}(a) =$ $\{a, \neg c, \neg d\}$
- Littéraux à traiter : $\neg c, \neg d,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 2$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, \neg d, f\}$
- Littéraux à traiter : $\neg d,\ \neg b,\ f,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 2$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, \neg d, f\}$
- Littéraux à traiter : $\neg b,\ f,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \color{blue}{\neg a} & \vee & \color{red}{\neg b} & \vee & \color{blue}{e} \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 3$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \color{red}{\neg b}, \neg c, \neg d, f\}$
- Littéraux à traiter : $f,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 3$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, \neg d, \neg e, f\}$
- Littéraux à traiter : $f, \neg e,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix} a & \vee & c & \vee & d \\ b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\ a & \vee & c & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\ a & \vee & d & & \\ \neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\ c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\ \neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\ c & \vee & \neg e & \vee & f \end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 3$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, \neg d, e, \neg e, f\}$
- Littéraux à traiter :

  $\neg e,$

Exemple

$$\Pi_3 = \forall\ a, b\ \exists\ c, d\ \forall\ e\ \exists f$$

$$\begin{bmatrix}
a & \vee & c & \vee & d \\
b & \vee & \neg c & \vee & \neg f \\
a & \vee & c & & \\
\neg a & \vee & b & \vee & \neg d \\
a & \vee & d & & \\
\neg a & \vee & b & \vee & \neg c \\
c & \vee & \neg d & \vee & \neg f \\
\neg a & \vee & \neg b & \vee & e \\
c & \vee & \neg e & \vee & f
\end{bmatrix}$$

Niveau $\delta_a = 3$:

- $\textsc{Clos}(a) = \{a, \neg b, \neg c, \neg d, e, \neg e, f\} \equiv \bot$
- Littéraux à traiter :

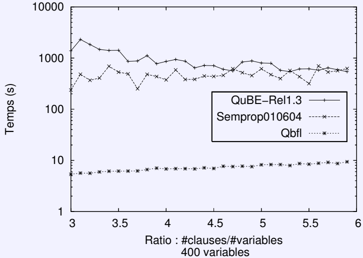
- PIV 3GHz, 512 MB de RAM, Linux Fedora
- Qbfl : notre prouveur, version 1.7 (`http://www.cril.univ-artois.fr/~letombe/qbfl`)
  - Extension de DPLL
  - Utilise Limmat (1.3) comme oracle SAT (vainqueur compétition SAT 2002)
  - Reconnaissance de ren$\mathcal{QHF}$s
  - Diverses heuristiques dont Δ
- QuBE-Rel : Giunchiglia *et al.* 2001, version 1.3 (`http://www.star.dist.unige.it/~qube`)
- Semprop : Letz 2002, version 010604 (`http://www4.in.tum.de/~letz/semprop`)

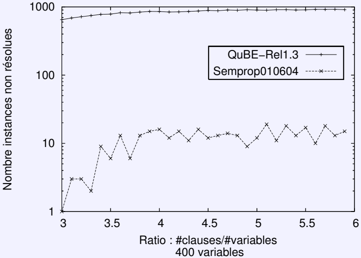
Génération aléatoire d'instances de classes polynomiales

- $\mathcal{QHF}$s et ren$\mathcal{QHF}$s générées aléatoirement
- 2 générateurs (`http://www.cril.univ-artois.fr/~letombe/qbfg`)
- $\mathcal{QHF}$: pour chaque clause
  - taille aléatoire
  - choix aléatoire du littéral positif
  - choix des littéraux négatifs restants
- ren$\mathcal{QHF}$:
  - nombre aléatoire de variables à renommer
  - choix aléatoire des variables à renommer
  - mêmes autres paramètres que $\mathcal{QHF}$s
- Préfixe $\forall X \exists Y$, $2 < |X| < 2/3\ \#V$

$\mathcal{QHF}$s

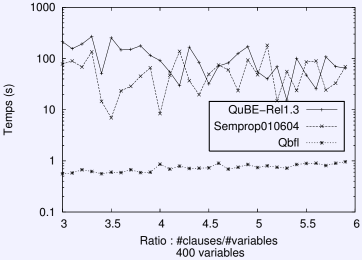
- 1000 instances générées par point
- Temps cumulé sur les instances résolues
- TimeOut : 60 s
- 400 variables
- 1200 à 2360 clauses

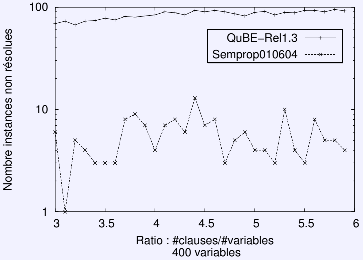




ren$\mathcal{QHF}$s

- 100 instances
- Temps cumulé sur les instances résolues
- TimeOut : 60 s
- 400 variables
- 1200 à 2360 clauses





Description

- Jeux d'essai disponibles sur `http://www.qbflib.org/benchmarks.html`
- G. Pan : 9 types de 21 jeux d'essai valides et 9 faux (378 instances)
- Autres types d'instances :
  - A. Ayari (72)
  - C. Castellini (169)
  - M. Mneimneh et K. A. Sakallah (202)
  - J. Rintanen (67)
  - C. Scholl et B. Becker (64)
- Total : 952 instances
- TimeOut : 900 s

Instances de G. Pan

Type d'instance	Jeroslow-Wang				Horn renommable Δ			
	%résolus		%RH		%résolus		%RH	
	k_*_n	k_*_p	k_*_n	k_*_p	k_*_n	k_*_p	k_*_n	k_*_p
k_branch_n/p	4.76	4.76	25.26	24.56	**9.52**	4.76	9.29	9.33
k_d4_n/p	4.76	9.52	13.25	26.33	4.76	**14.28**	5.63	25.34
k_dum_n/p	4.76	4.76	11.69	11.71	**23.80**	**14.28**	11.51	11.40
k_grz_n/p	0	0	-	-	**61.90**	0	11.94	-
k_lin_n/p	9.52	9.52	20.00	11.88	9.52	**19.04**	24.26	8.65
k_path_n/p	9.52	14.28	5.47	7.43	**14.28**	**19.04**	12.12	7.64
k_ph_n/p	23.80	19.04	2.66	10.06	23.80	19.04	11.73	6.89
k_poly_n/p	9.52	4.76	0	12.91	**14.28**	**9.52**	6.66	11.04
k_t4p_n/p	4.76	0	11.37	-	4.76	**4.76**	26.62	26.02
Total v/f	7.93	7.40	11.21	14.98	**18.51**	**11.64**	13.30	13.28
Total	7.67		13.09		**15.07**		13.29	

Conclusion

- Mise en évidence des problèmes des prouveurs QBF actuels sur des instances polynomiales
- Utilisation pratique de restrictions traitables de $\mathcal{QBF}$ dans des prouveurs
- Distance de contradiction δ
- Amélioration significative de Qbfl sur certaines instances $\mathcal{QBF}$

Perspectives

Théorique :

- Étude d'autres classes polynomiales (AAAI'05)
- Algorithme de détection de ces classes
- Algorithme de résolution de ces classes

Pratique :

- Validation de l'heuristique
- Intégrer de nouvelles classes polynomiales à Qbfl
- Analyse plus complète des instances

Questions ?