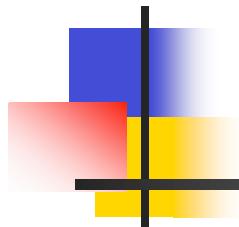


Recherche de bosons de jauge lourds avec les détecteurs CDF et CMS



Gilles De Lentdecker
Université Libre de Bruxelles
University of Rochester



Overview

- Introduction
 - Modèles E6, dimensions supplémentaires
- Tevatron et CDF
- Z' (E6,...)
 - Limites Tevatron, 200 pb^{-1}
 - Nouvelle analyse CDF (448pb^{-1})
- Graviton (Tevatron, LHC)
- Excitations de Kaluza-Klein (Tevatron, LHC)
- Conclusions



Origine des bosons de jauge lourds

- La plupart des extensions du MS :
 - Modèles GUT $S0(10)$ et $E6$
 - Modèles à dimensions spatiales supplémentaires:
 - Graviton (spin-2) de Randall-Sundrum
 - Modèle Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (ADD)
 - Little Higgs model
 - LRM (Left-right symmetric model)
 - ALRM (alternative LRM)
 - Etc.



Modèles E6

- Groupe E6 suggéré par théorie des cordes
- $E6 \rightarrow SO(10) \times U(1)$ Z_ψ
- $SO(10) \rightarrow SU(5) \times U(1)$ Z_χ
- $Z' = Z_\psi \cos\theta_{E6} \times Z_\chi \sin\theta_{E6}$
- $\theta = 37.78^\circ \rightarrow Z_\eta$
- $\theta = 127.78^\circ \rightarrow Z_l$
- LEP: très faible mixing Z - Z'



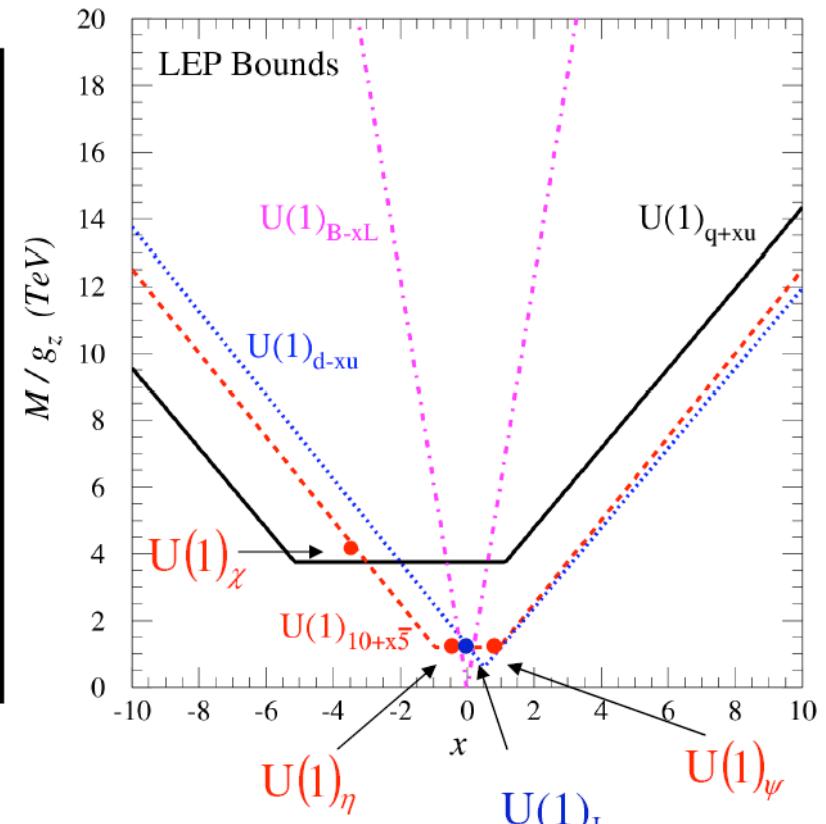
Z' génériques

- Carena, Daleo, Dobrescu, Tait (CDDT)
- $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_Z$
- Pour 1 Z' il faut: $M_{Z'}$, $g_{Z'}$, 15 couplages
- + quelques hypothèses (< mesures de précision)
 - FCNC
 - Pas de désintégration en particules exotiques
 - Invariance de jauge
- 4 classes de solutions:
 - **B-xL, q+xu, 10+x5, d-xu**

4 lignes...

- Dans chaque classe, chaque Z' est défini par:
 - Masse $M_{Z'}$, couplages g_z et un paramètre x

| | $B-xL$ | $q+xu$ | $10+x\bar{5}$ | $d-xu$ |
|--------------------|--------|------------|---------------|-----------|
| $q_L = (u_L, d_L)$ | +1/3 | +1/3 | +1/3 | 0 |
| u_R | +1/3 | $+x/3$ | -1/3 | $-x/3$ |
| d_R | +1/3 | $(2-x)/3$ | $-x/3$ | +1/3 |
| $l_L = (e_L, v_L)$ | $-x$ | -1 | $+x/3$ | $(x-1)/3$ |
| e_R | $-x$ | $-(2+x)/3$ | -1/3 | $+x/3$ |



- Modèle $d-xu$: Z_I ($x=0$)
- Modèle $10+x5$: Z_η ($x=-0.5$), Z_ψ ($x=1$), Z_χ ($x=-3$)

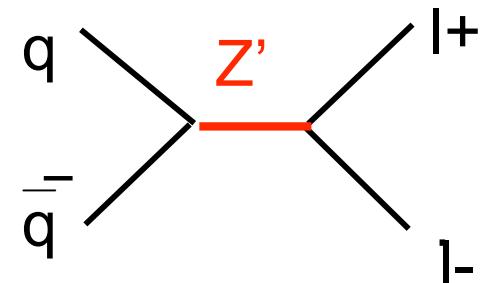


Dimensions spatiales supplémentaires

- concepts développés dans théorie des cordes
- Adressent le problème de hiérarchie
- Arkani-Hamed Dimopoulos Dvali (ADD):
 - Hiérarchie < graviton se propage dans ED
 - Variante (TeV^{-1}): ED de différentes tailles;
 - Bosons de jauge se propagent dans ED, $R_c \sim 10^{-17} \text{ cm}$
 - excitations de Kaluza-Klein des bosons de jauge dans 4D
- Randall-Sundrum: 1 dimension supplémentaire compactifiée, $R_c \sim 10^{-32} \text{ m}$
 - Excitations KK du graviton

Signature:

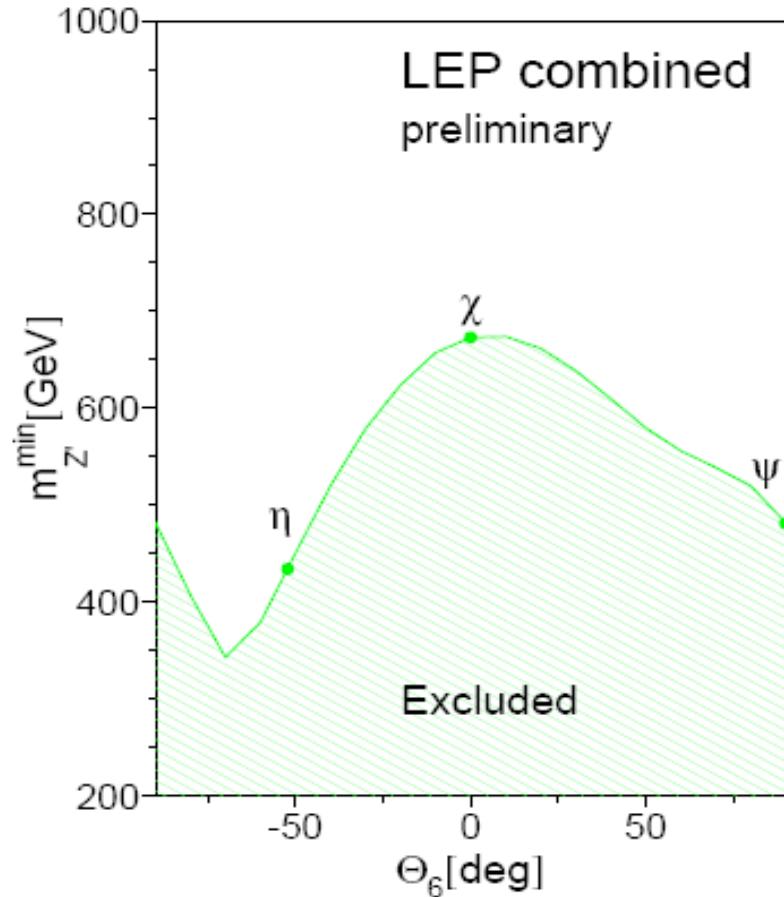
- Quelle que soit la résonance,
- Signature la plus claire pour collisionneur de hadrons:
 - 2 leptons dans l'état final
 - e^+e^- et $\mu\mu$: faible bruit de fond (DY)
 - + canal $\gamma\gamma$ pour graviton RS



Précédents résultats

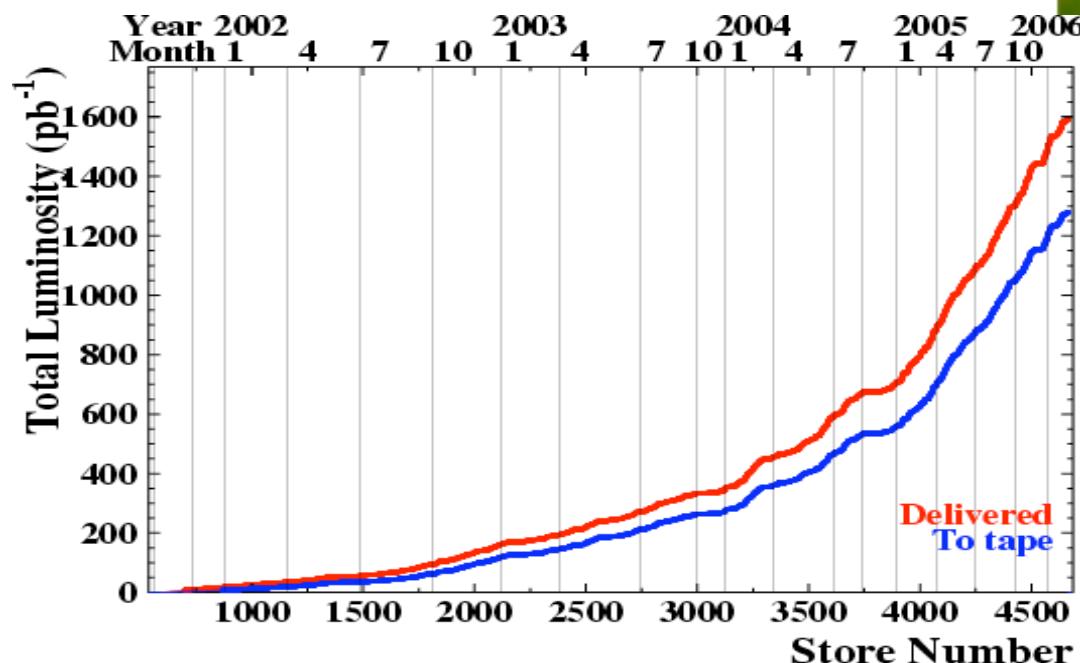
- LEP II
 - Masse et distr. angulaires
 - Mesure précise au pole du Z
- Expériences à basse énergie:
 - Violation de la parité atomique
 - Diffusion e - ν

Pas de limites fortes
- Tevatron Run I
 - Énergies bien plus élevées
 - ee, μμ, ττ
 - Recherche directe d'un pic



Le Tevatron

- Collisions $p\bar{p}$, $\sqrt{s}=1.96\text{TeV}$
- 396 ns bunch x-ing
- Run II, depuis 2002



Lumi. instantanée

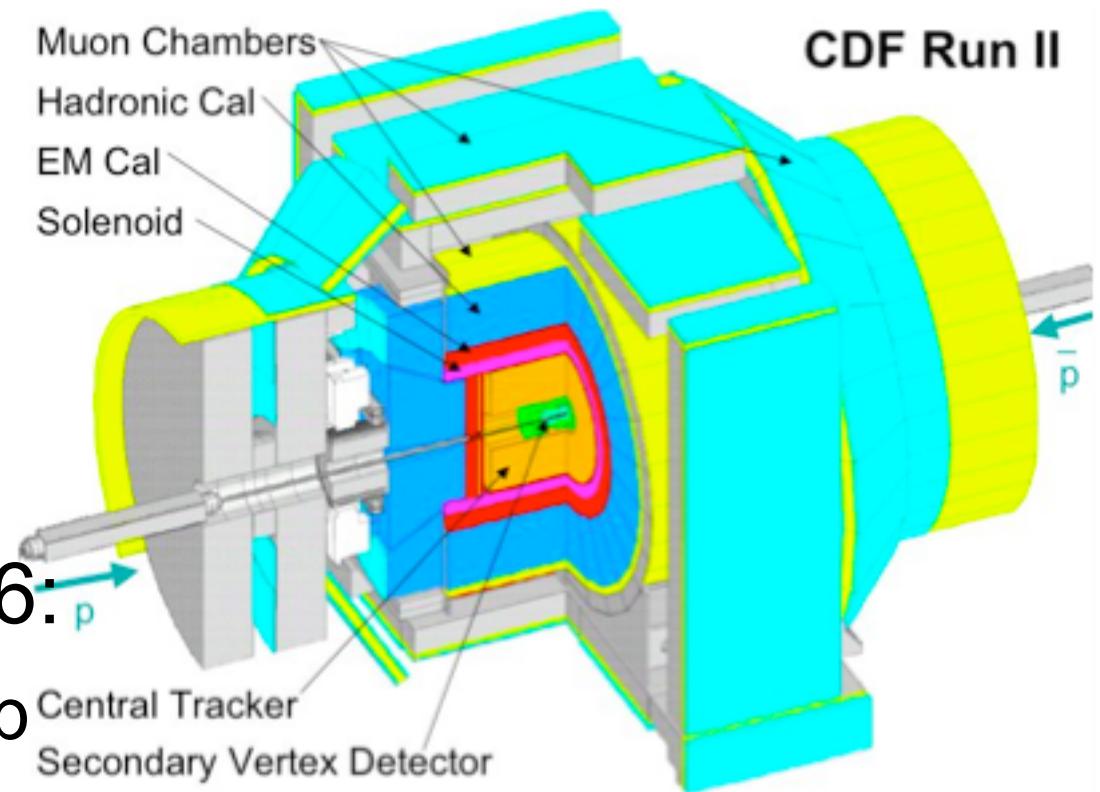
- Record : $1.5 \cdot 10^{32} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
- Objectif : $5 \cdot 10^{32} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

Lumi. intégrée:

- 1.2 fb^{-1} sur disk (Jan. 06)
- Objectif : $4-5 \text{ fb}^{-1}$ en 2008

Le détecteur CDF

- Symétrie avt-arr
- Solénoïde de 1.4T
- Tracker:
 - Silicium
 - Chambres à dérive
- Calorimètre, $|\eta| < 3.6$:
 - EM, scintillateur+Pb
 - +preshower et shower max
 - Had, scintillateur+Fe
- Muon: $|\eta| < 1.5$

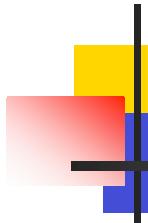




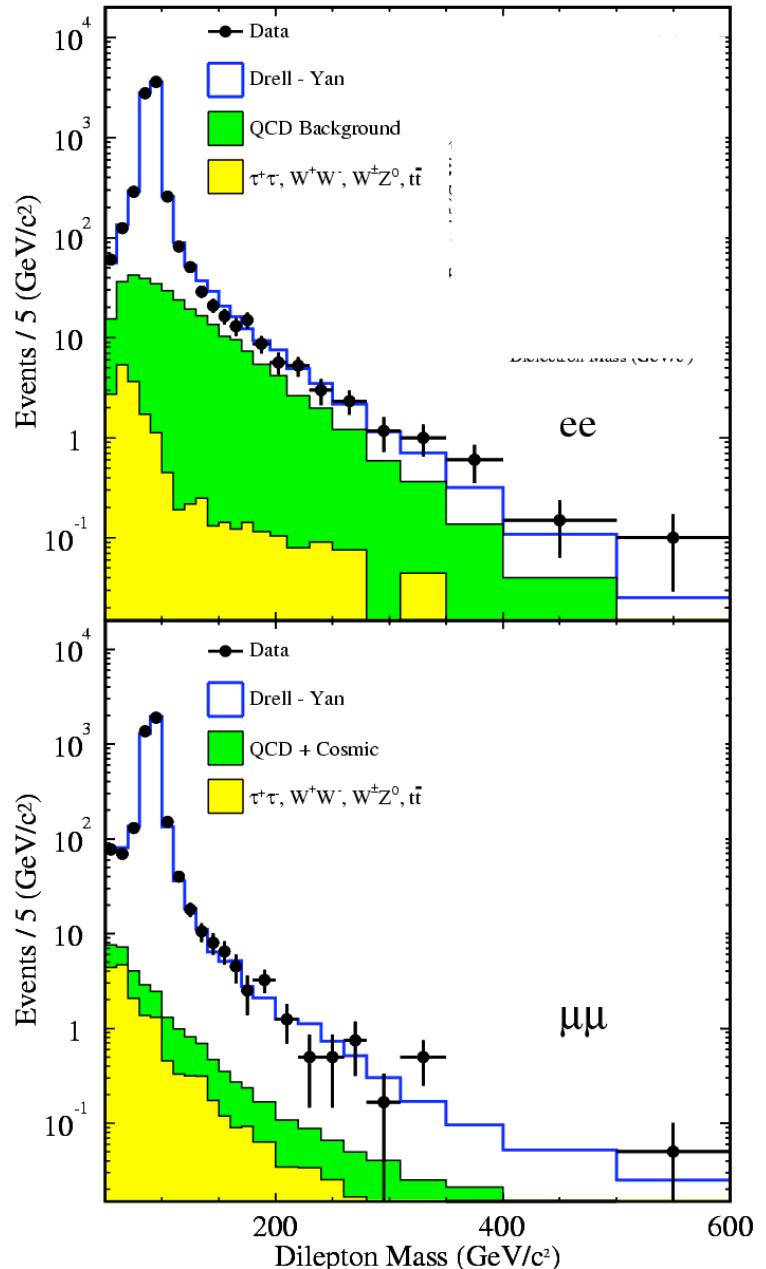
Sélection

- 2 leptons de grand $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
- Di-électron:
 - 1 électron central $|\eta| < 1.0$ (1 trace associée)
 - 1 électron central ou forward (plug)
 - => 2 topologies, C-C & C-P
- Di-muon:
 - 2 muons centraux
- Bruits de fond dominant:
 - (ee) Di-jet ou QCD
 - ($\mu\mu$) rayons cosmiques et QCD

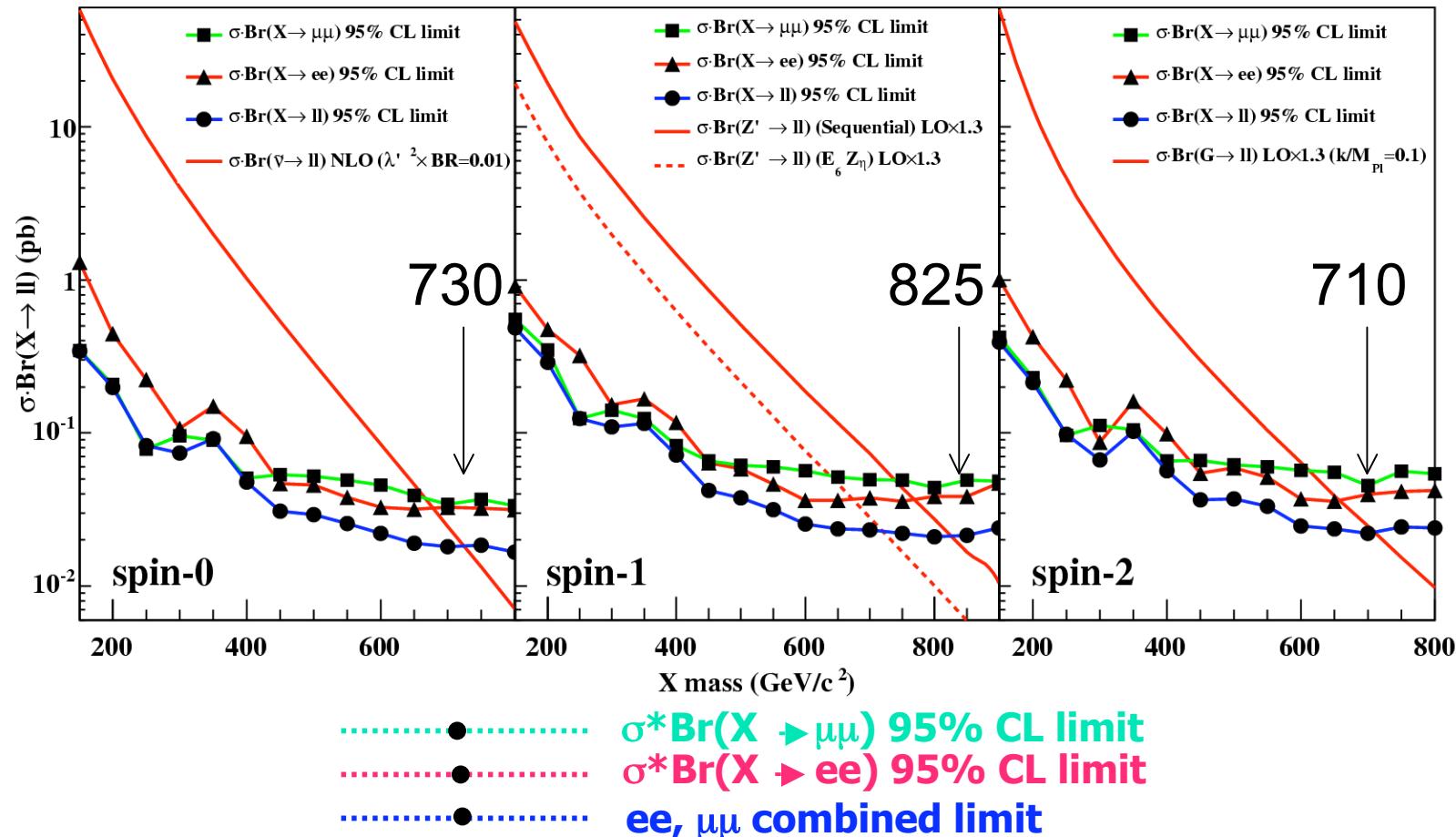
Z' \rightarrow II, Tevatron RunII, (2004)




- 200 pb $^{-1}$, seulement M_{II}
- Recherche générale de bosons de spin 0, 1 et 2
- Bon accord avec MS
=> limites



Limites pour 200 pb⁻¹



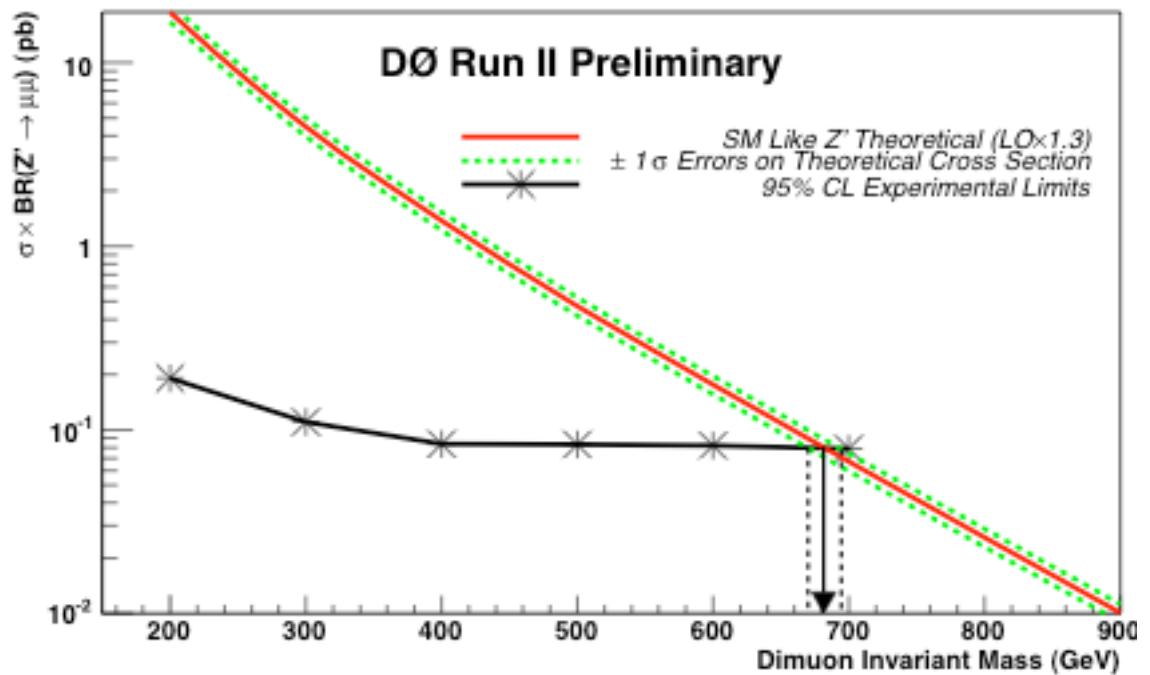
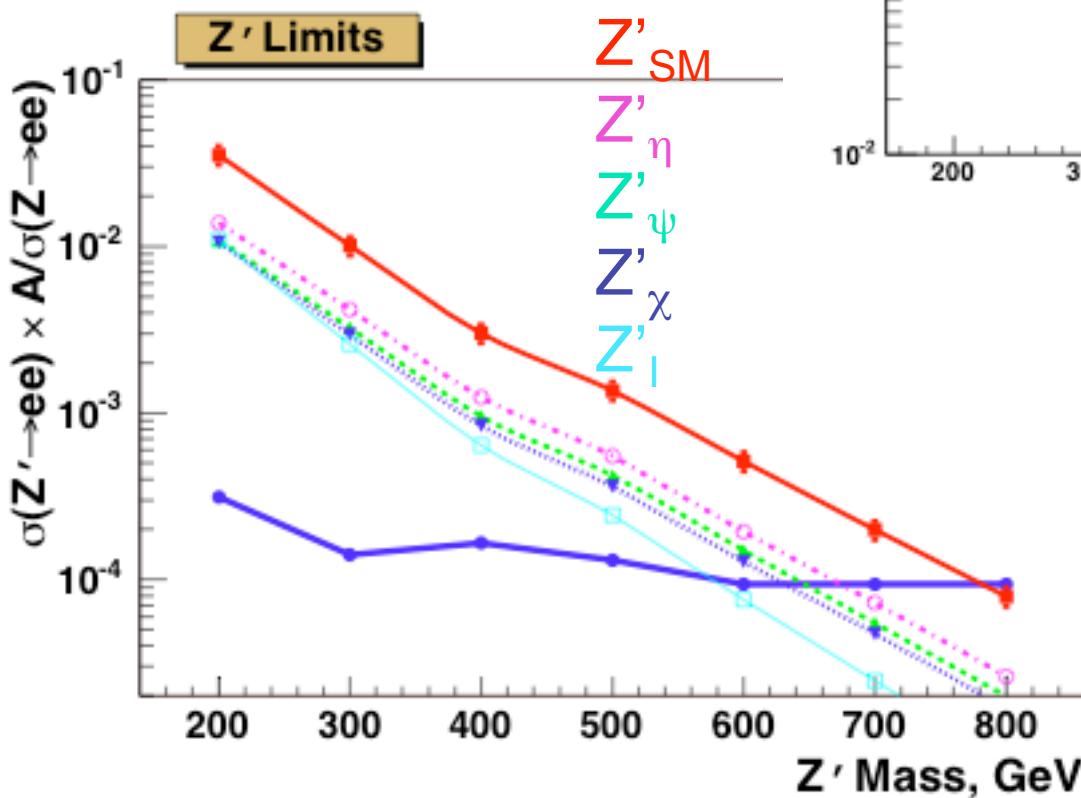
- Courbes utilisables pour de nombreux modèles



E6 Z' (D0)

Z' $\rightarrow \mu\mu$, 250 pb $^{-1}$

Limite : 680 GeV/c 2



Z' $\rightarrow ee$, 200 pb $^{-1}$
Limite = 780 GeV/c 2

2006

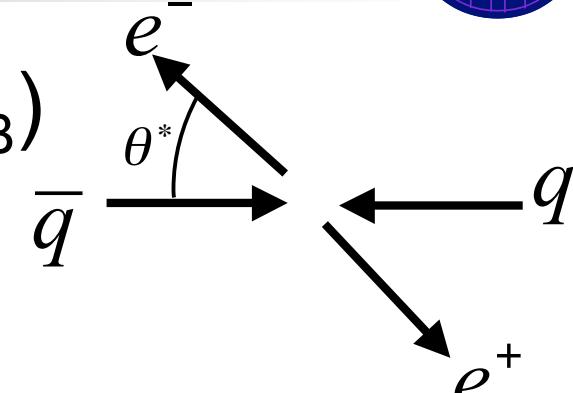
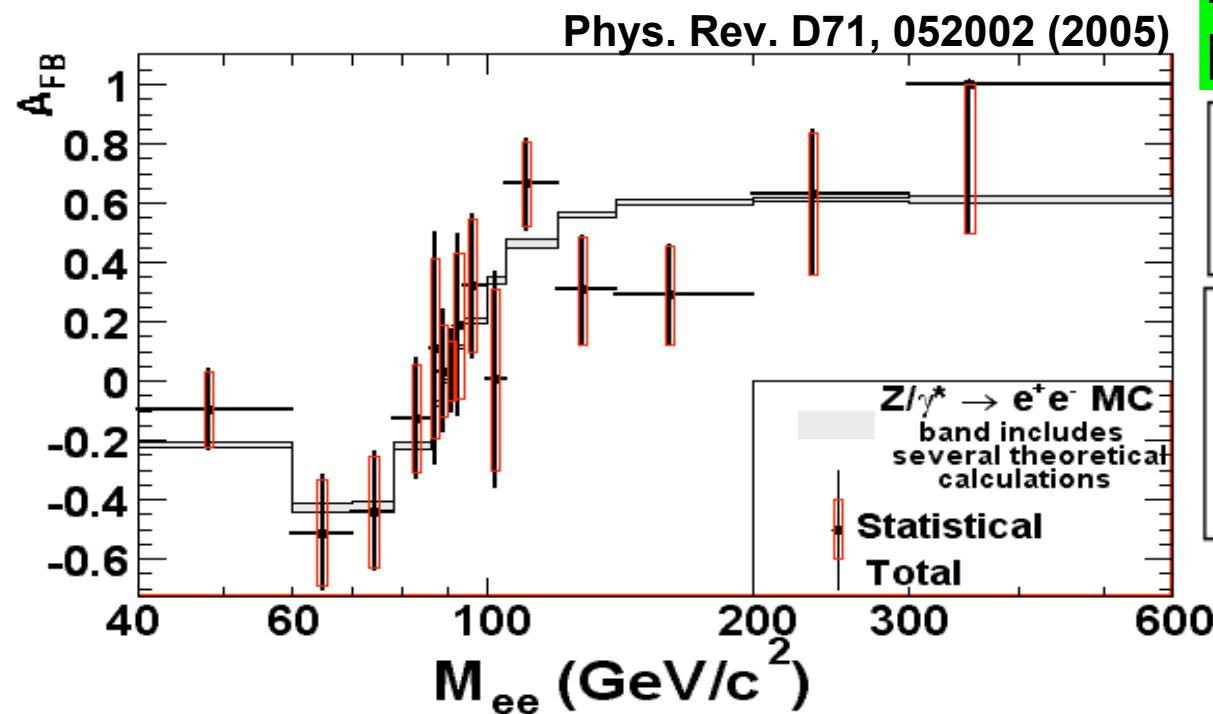
CDF, nouvelle méthode (ee)

- M_{ee} et distribution angulaire (A_{FB})

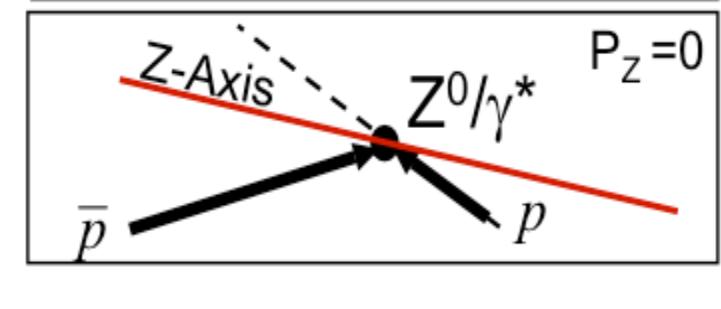
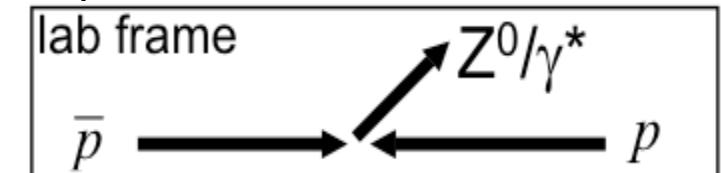
$$A_{FB} = \frac{d\sigma(\cos\theta^* > 0) - d\sigma(\cos\theta^* < 0)}{d\sigma(\cos\theta^* > 0) + d\sigma(\cos\theta^* < 0)}$$

$$A_{FB} = \frac{(N^+ - B^+) - (N^- - B^-)}{(N^+ - B^+) + (N^- - B^-)}$$

$\cos\theta^* > 0 = N^+$
$\cos\theta^* < 0 = N^-$



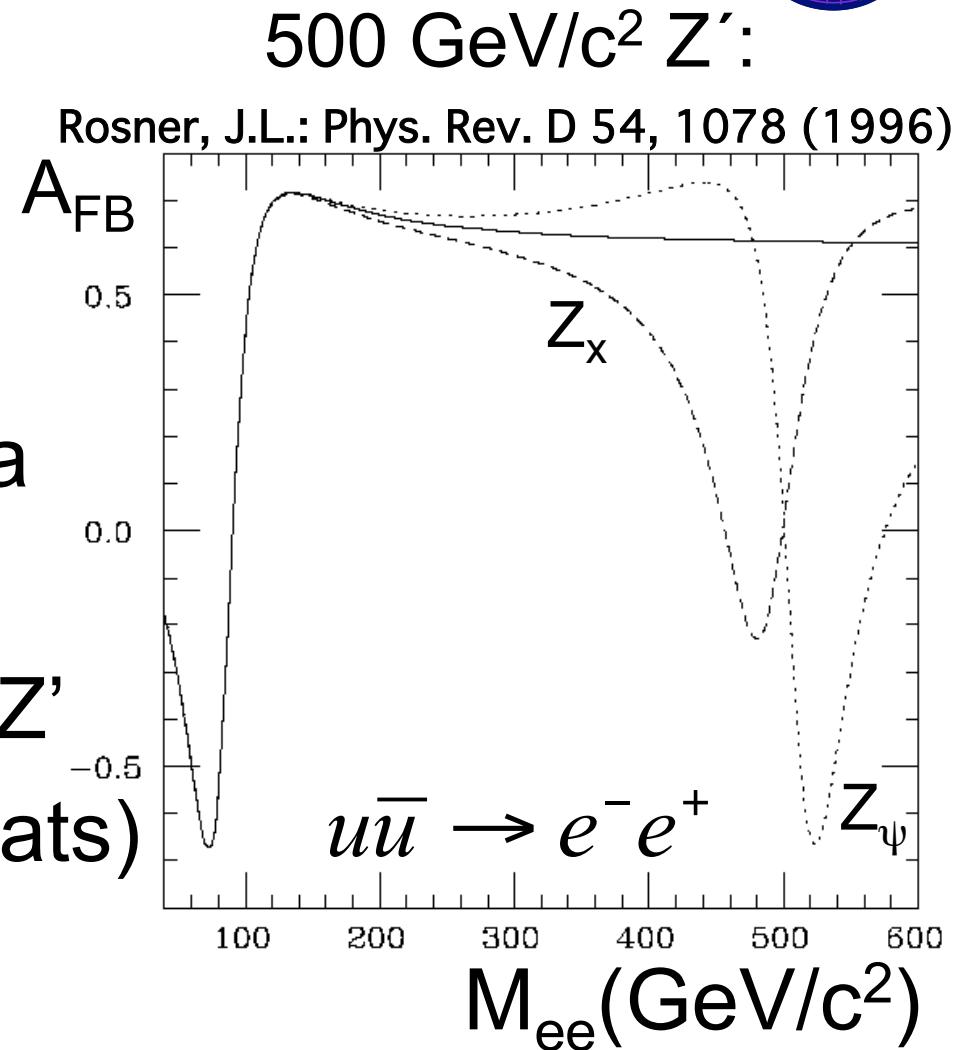
Référentiel Collins-Soper
minimiser ambiguïté du
 P_T des quarks





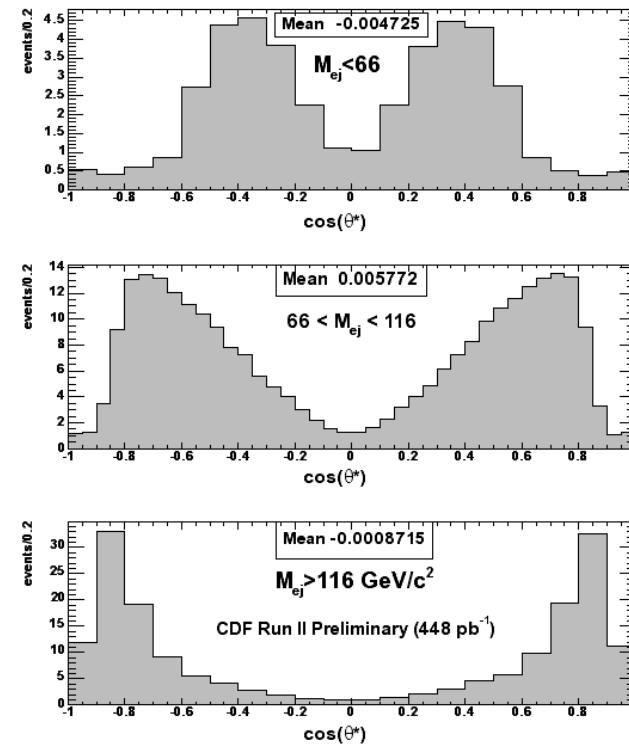
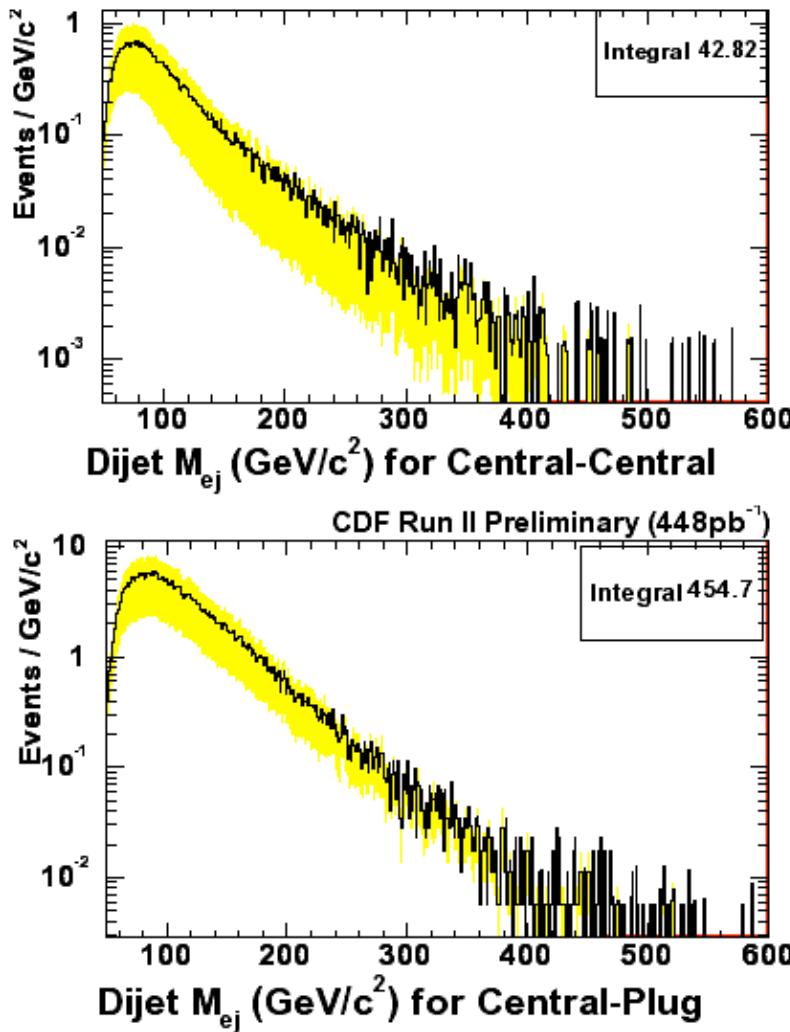
A_{FB} et Z':

- Z' interfère avec Z/ γ^*
- A_{FB} dépend des couplages:
- $\text{Cos}\theta^* + M_{ee}$ augmente la sensibilité
- Etude de 4 classes de Z'
- 448 pb⁻¹ (30845 candidats)





Bruit de fond QCD



- Jets sélectionnés comme e-
- Erreur systématique obtenue en calculant le taux de 'fake' dans différents échantillons (50%)

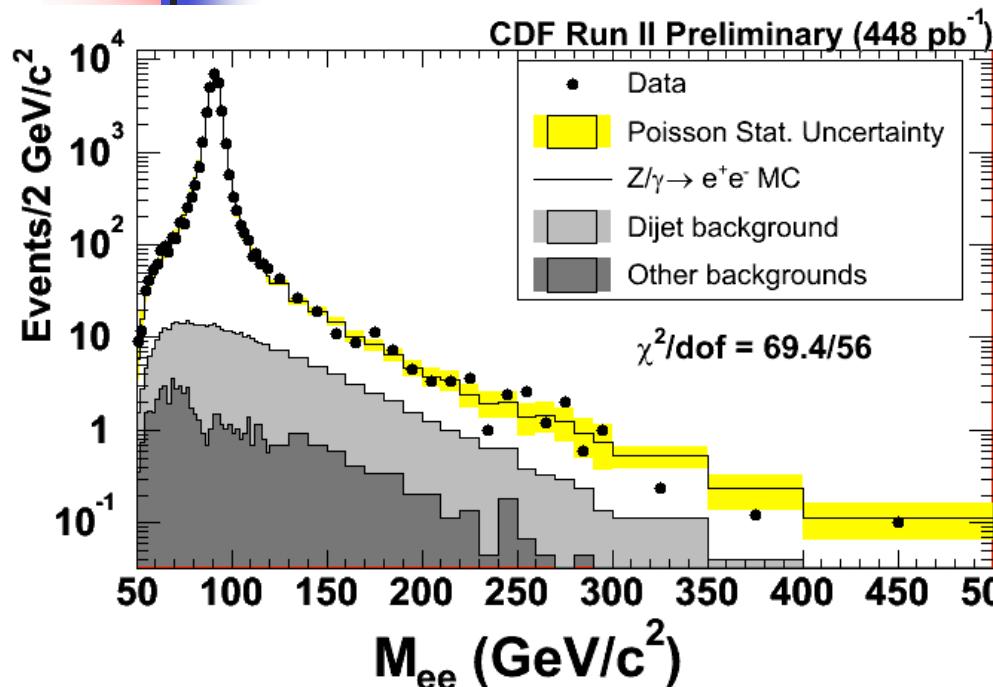


Les autres bruits de fond

- ~90 DY ($M>200$ GeV)
- Distributions angulaires < MC

| Back-ground | Source | # of events | | $M>200$ |
|-------------------------------|--------|-------------|------|---------|
| | | C-C | C-P | |
| Dijet | Data | 42.5 | 453 | 28.5 |
| $W \rightarrow e\nu + \gamma$ | MC | 1.9 | 48.3 | 4.9 |
| $Z \rightarrow \tau\tau$ | MC | 11.6 | 17.6 | 0.13 |
| WW | MC | 7.7 | 9.3 | 1.2 |
| Top | MC | 5.1 | 3.3 | 0.65 |
| WZ | MC | 6.3 | 7.9 | 0.19 |
| Total | | 75 | 540 | 35.6 |

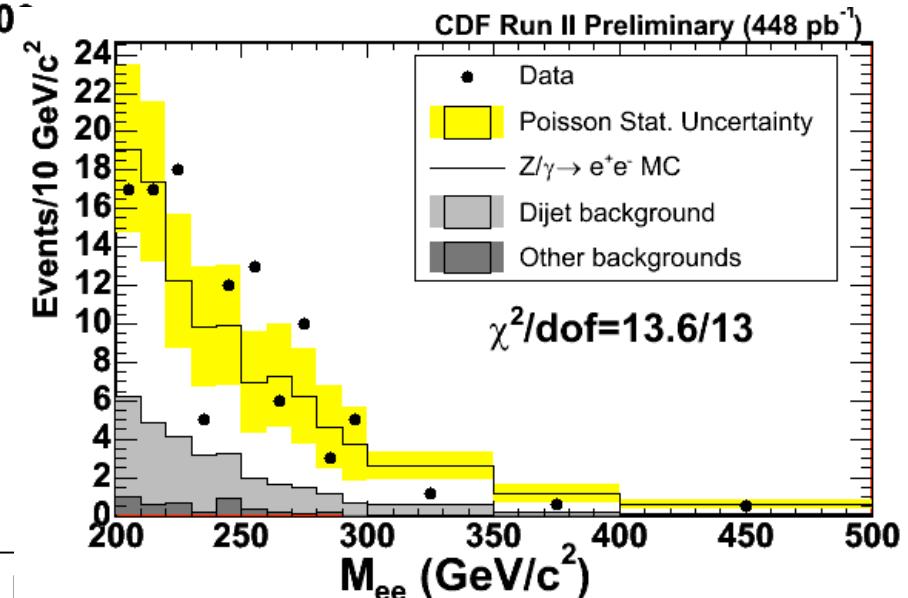
Distribution de M_{ee}



■ Erreur stat.
représentée sur les
prédictions

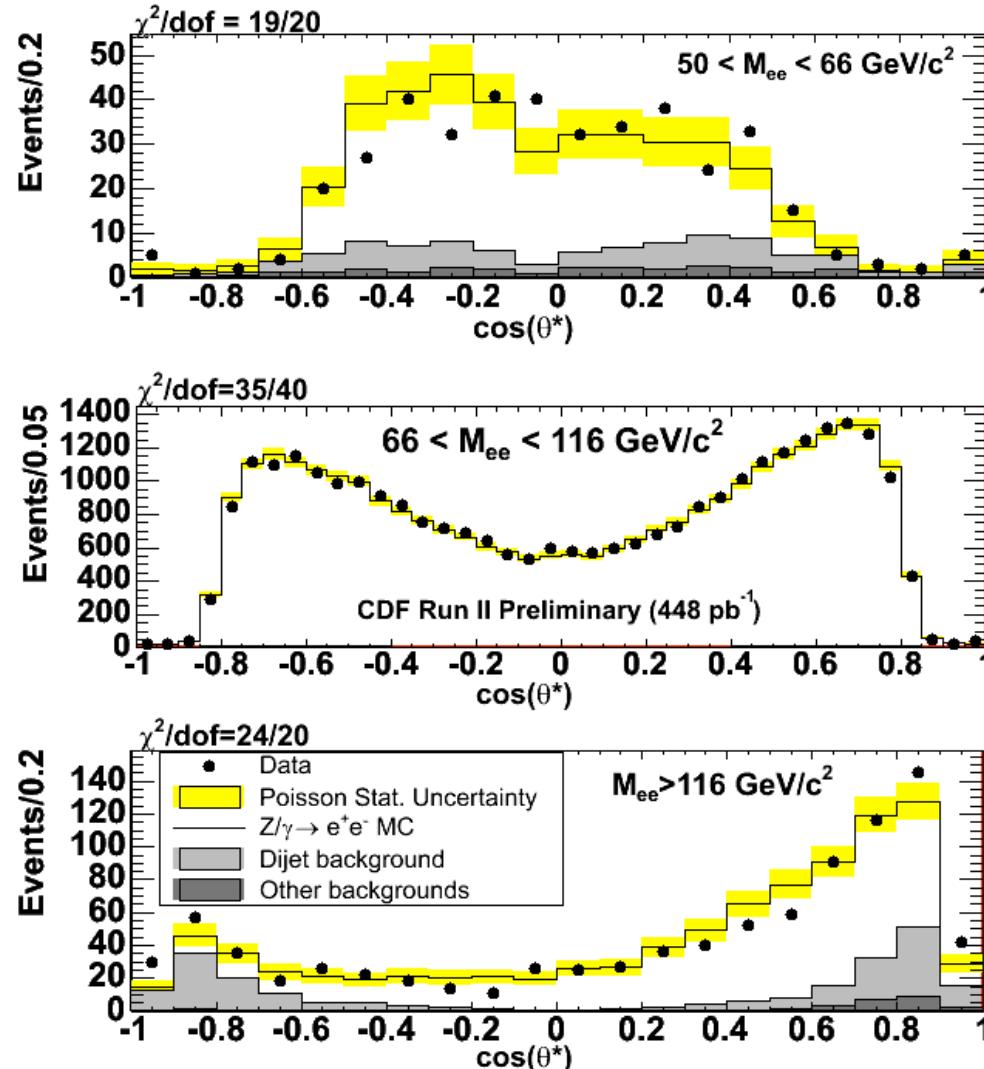
- Très bon accord,
pas d'excès
- Nbre d' événements:

| | Data | Predicted |
|-----------|------|----------------------------|
| $M > 200$ | 120 | $125 \pm 11_{\text{stat}}$ |





Distribution de $\cos\theta^*$

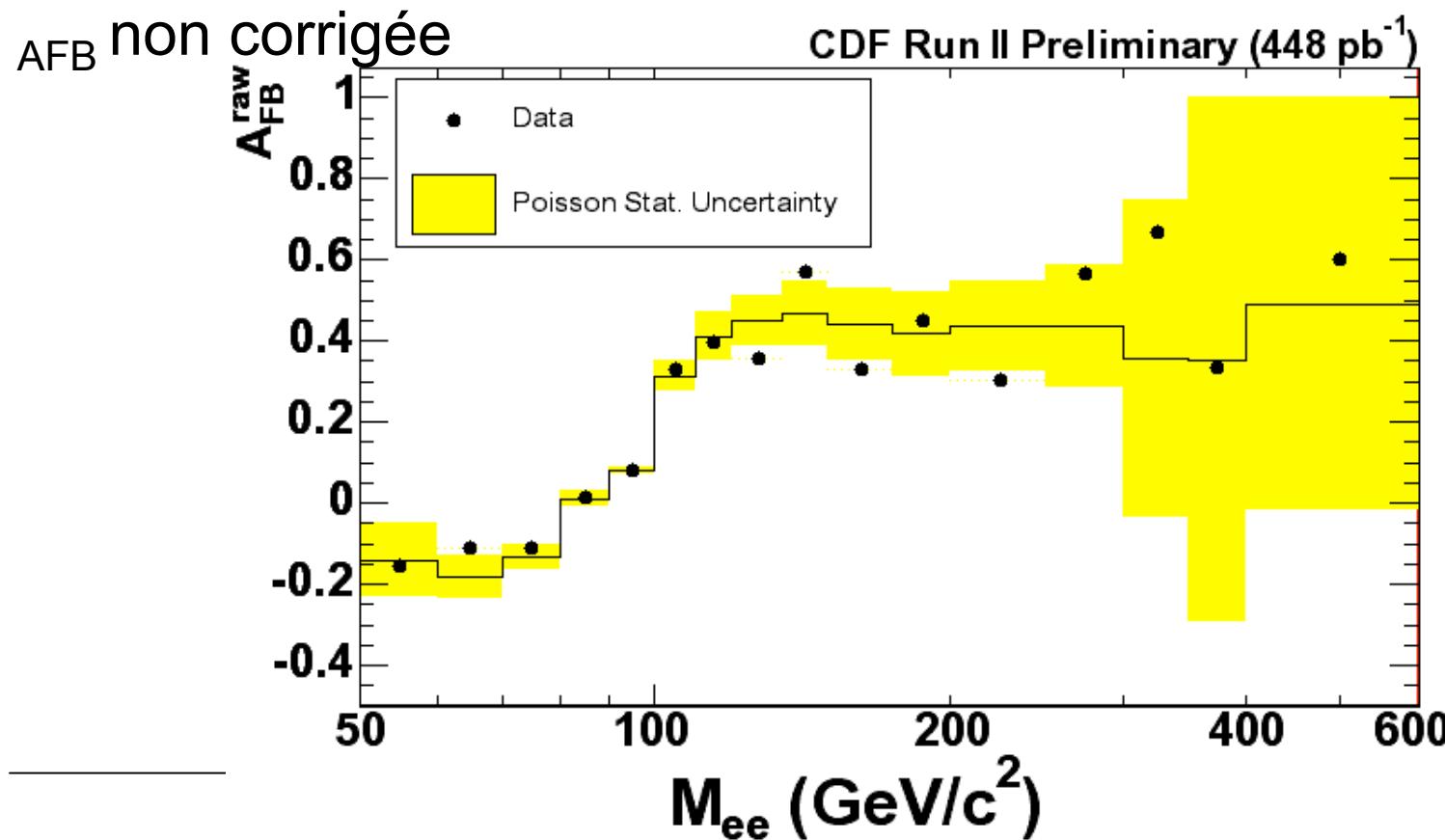


G. De Lentdecker,
Séminaire LAL, 11 mai, 2006

Mesure des asymétries (A_{FB})

$$A_{FB}^{raw} = \frac{(N^+ - N_{Bkgrnd}^+) - (N^- - N_{Bkgrnd}^-)}{(N^+ - N_{Bkgrnd}^+) + (N^- - N_{Bkgrnd}^-)}$$

N^\pm : Forward/Backward Candidates



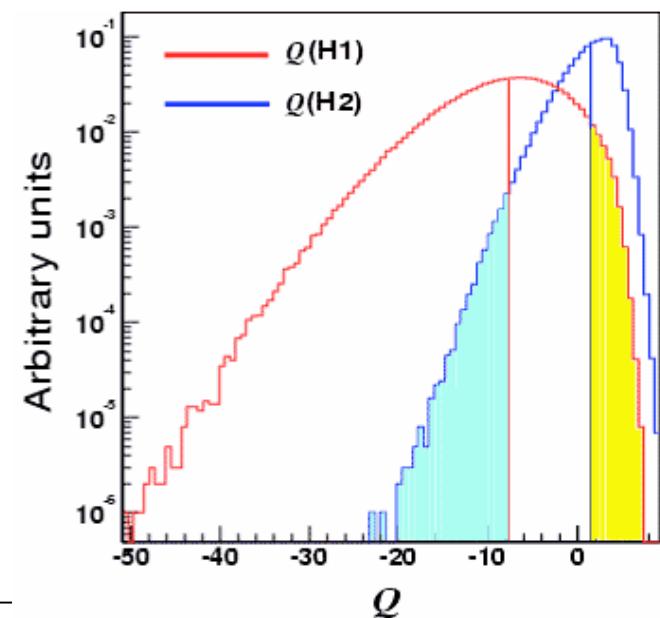


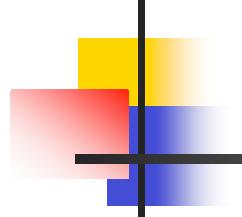
Méthode CL_S

- Méthode utilisée pour le Higgs (LEP)
- Test entre 2 hypothèses:
 - H1: $Z'/Z/\text{gamma}^*$
 - H2: Z/gamma^*
- Distrib. de poisson:
$$Q = -2 \ln[P(\text{data}|H_1)/P(\text{data}|H_2)]$$
- Pseudo-expériences

$$CL_S = \frac{P(Q < Q_{\text{obs}} | H_2)}{P(Q < Q_{\text{obs}} | H_1)}$$

B-xL model
 $M_{Z'} = 440 \text{ GeV}/c^2$
 $g_Z = 0.03$
 $x = 10$





Les erreurs systématiques

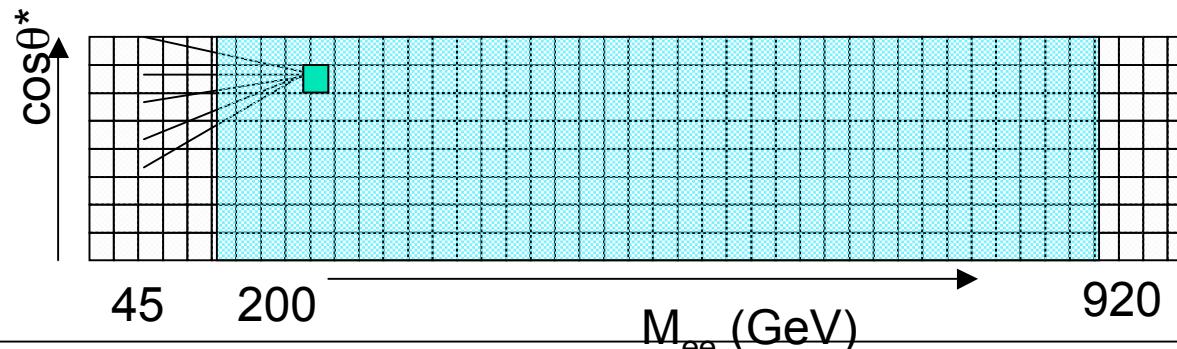


- Energy scale: 3%
- Résolution en énergie: 3%
- Bruit de fond:
 - QCD \sim 50%
 - EWK \sim 20%
- Lumi, acceptance, section efficace : \sim 20%
- PDF, trigger: négligeable



Comment générer autant de Z' ?

- 4 classes de modèles, 3 paramètres ($M_{Z'}$, $g_{Z'}$, x)
- 40,000 Z' !
- LO calculation * NNLO k(M)facteur
- Paramétrisation de la réponse du détecteur
 - Large échantillons de γ^*
 - Calcule acceptance et résolution



générateur
reconstruit

$$n_i = \sum_{j=1}^{N_{bins}} A_{ij} N_j$$



Limite du Z' SM

- Z' avec les couplages du Z du MS
 - difficile à produire en théorie mais facile à générer
 - Utile pour comparaisons
- Limites:

| | CDF e^+e^- 448 pb^{-1} | CDF $ee + \mu\mu$ $\sim 200 \text{ pb}^{-1}$ | D0 ee 200 pb^{-1} | CDF ee 200 pb^{-1} | LEPII |
|------------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|
| Limits | 855 GeV | 825 GeV | 780 GeV | 750 GeV | 1.8 TeV |
| On Z' SM | | | | | |

- Sans $\cos\theta^*$: besoin de 25 % en plus de lumi

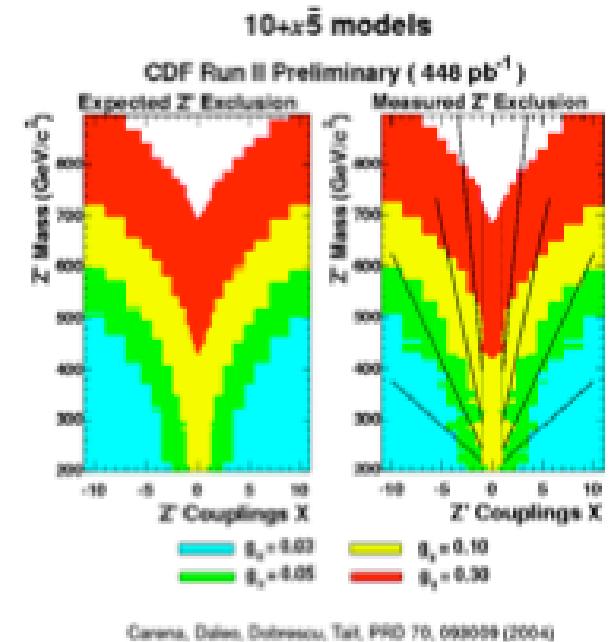
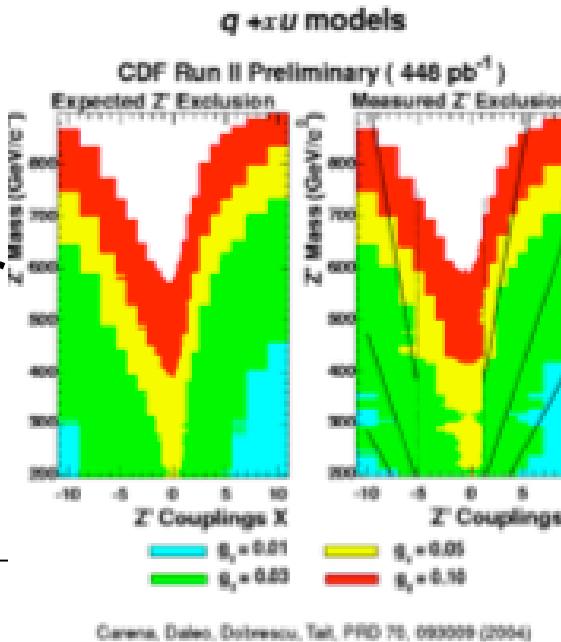
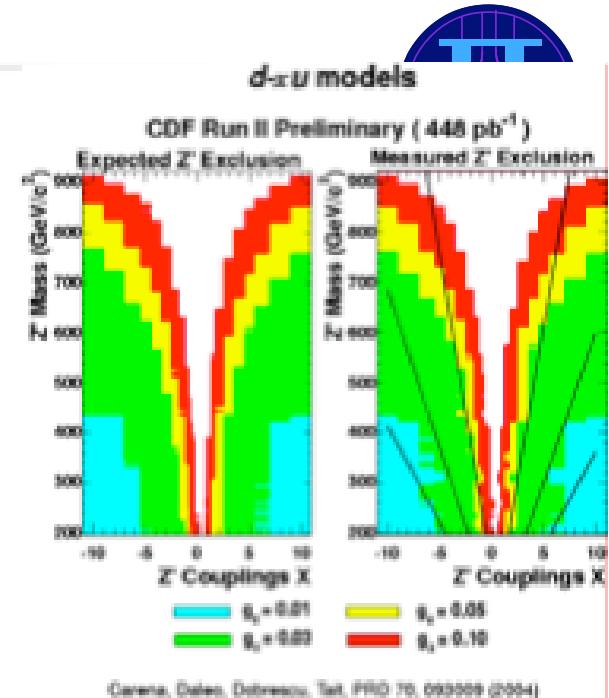
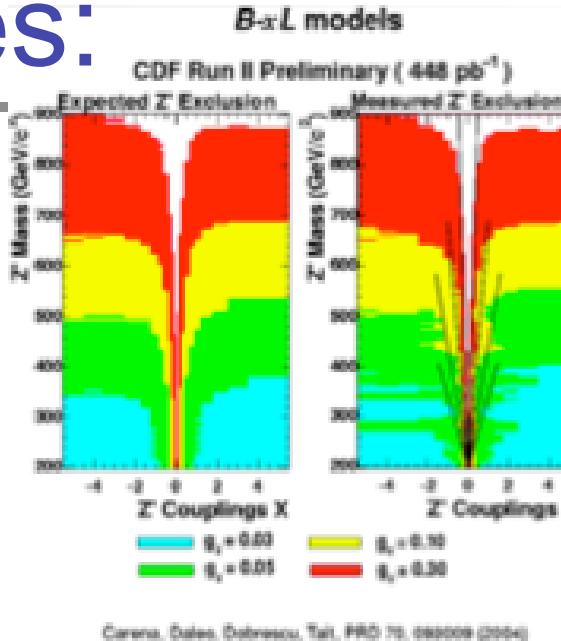


Limites sur E6 Z's

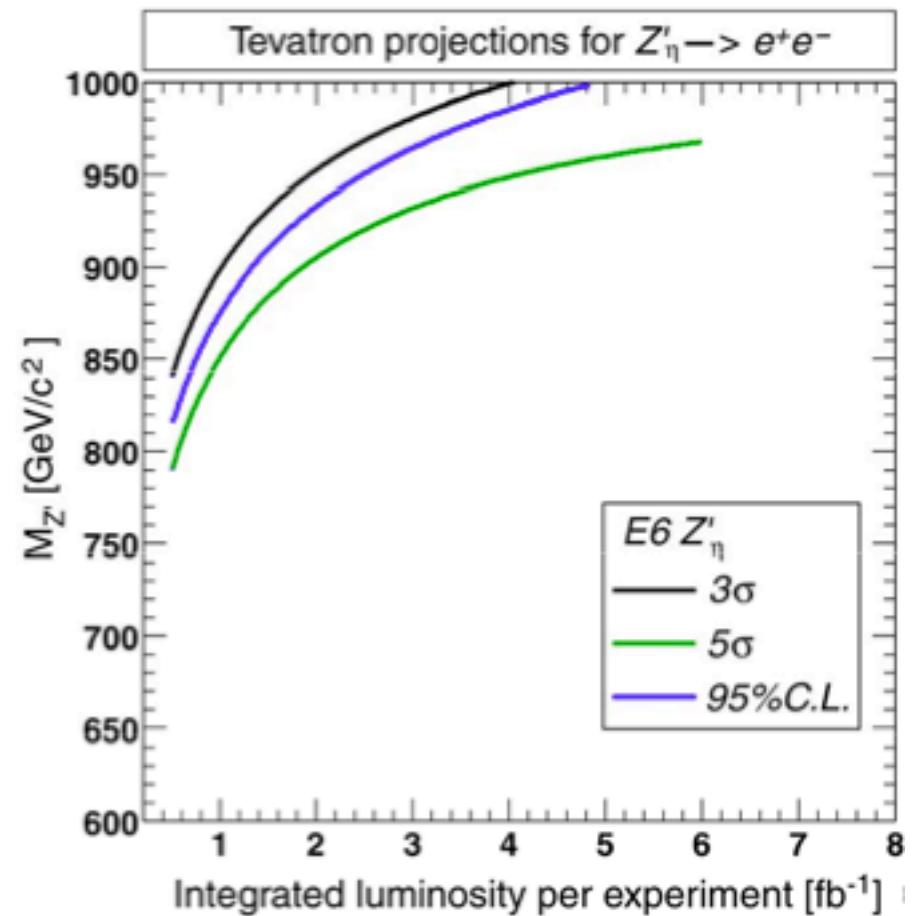
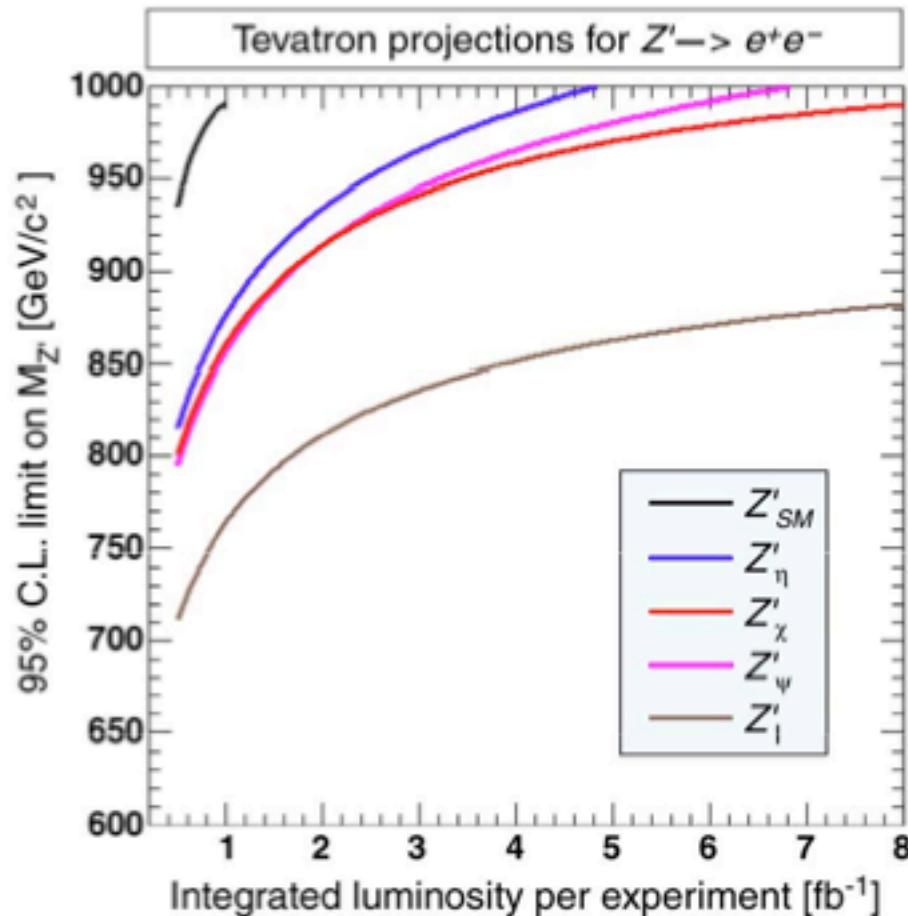
| | CDF e^+e^- 448 pb^{-1} | CDF $ee + \mu\mu$ $\sim 200 \text{ pb}^{-1}$ | D0 ee 200 pb^{-1} | CDF ee 200 pb^{-1} | LEP |
|----------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|
| Z_I | 650 GeV | 615 GeV | 575 GeV | 570 GeV | |
| Z_χ | 735 GeV | 675 GeV | 640 GeV | 610 GeV | 673 GeV |
| Z_ψ | 725 GeV | 690 GeV | 650 GeV | 625 GeV | 481 GeV |
| Z_n | 745 GeV | 720 GeV | 680 GeV | 650 GeV | 434 GeV |

4 classes:

- $M_{Z'}$ exclu en fonction de x
 - Surfaces colorées = exclu par CDF
- $g_z = 0.10$
- $g_z = 0.05$
- $g_z = 0.03$
- $g_z = 0.01$
- Lignes = exclu par LEP



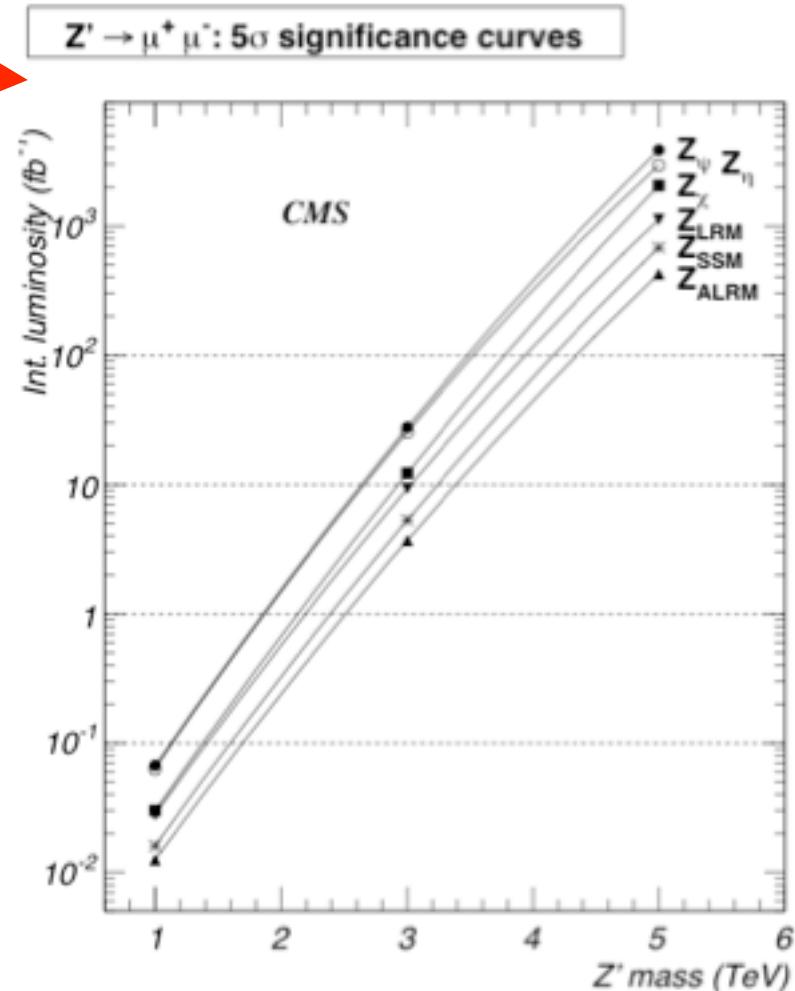
Avec plus de lumi...



Z' au LHC

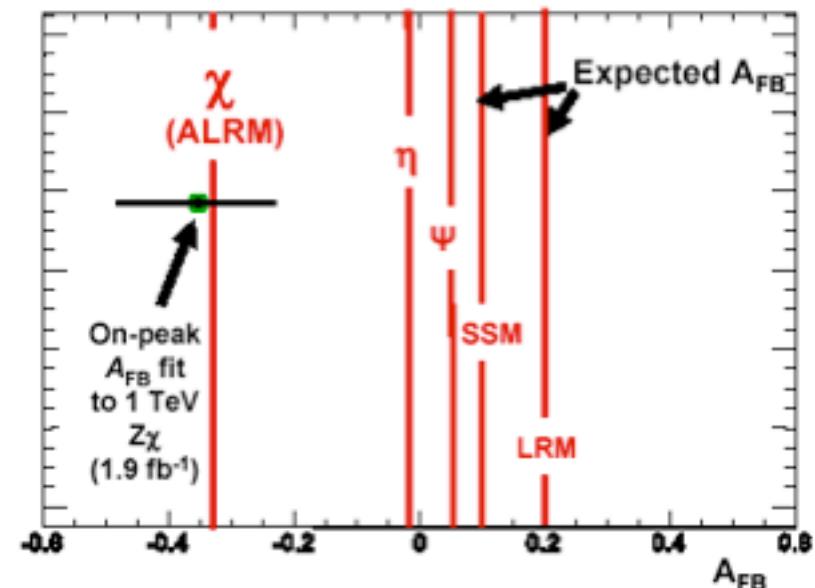
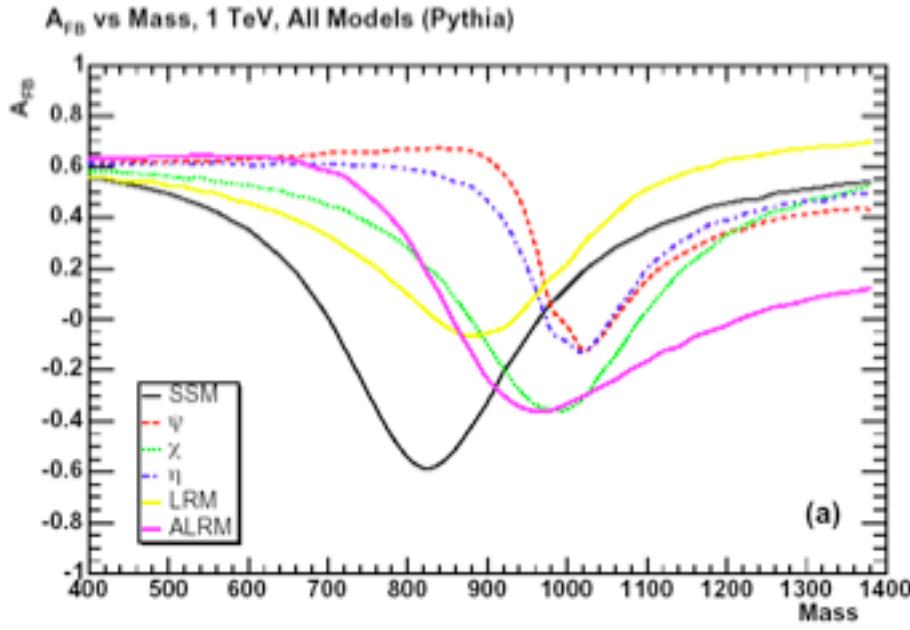
- CMS $Z' \rightarrow \mu\mu$:
 - $0.1 \text{ fb}^{-1}, > 1 \text{ TeV}/c^2$
 - $10 \text{ fb}^{-1}, 2.6 - 3.4 \text{ TeV}/c^2$
 - $100 \text{ fb}^{-1}, 3.4 - 4.3 \text{ TeV}/c^2$

- $Z' \rightarrow ee$:
 - $0.1 \text{ fb}^{-1}, > 1 \text{ TeV}/c^2$
 - $10 \text{ fb}^{-1}, 2.8 - 3.8 \text{ TeV}/c^2$
 - $100 \text{ fb}^{-1}, 3.8 - 4.8 \text{ TeV}/c^2$



R. Cousins et al., CMS Note 2005/002

asymétries



- 400 fb^{-1} , Z_ψ , Z_η , Z_{SSM} , Z_{LRM} peuvent être distingués entre eux jusqu'à $M_{Z'} \sim 1.0\text{-}1.5 \text{ TeV}/c^2$
- Z_χ et Z_{ALRM} distincts des autres jusqu'à $2\text{-}2.7 \text{ TeV}/c^2$



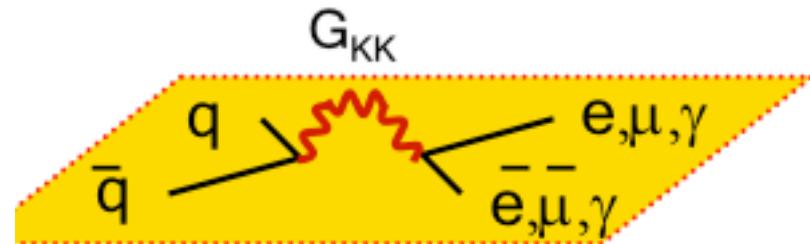
Recherche des gravitons

ADD Gravitons

- Section efficace:

$$\frac{d^2\sigma}{dM d \cos\theta^*} = f_{\text{SM}} + f_{\text{int}} \eta_G + f_{\text{KK}} \eta_G^2$$

$$\eta_G = F / M_S^4 \quad (M_S = \text{échelle de Planck fondamentale})$$



- Différents formalismes pour F

- $F = 2\lambda/\pi$ ($\lambda=\pm 1$, interf. positive/négative) // Hewett
- $F = 1$ // GRW
- $F = \log(M_S^4/M^2)$, $n=2$ ou $F=2/(n-2)$, $n>2$ // HLZ

- Comme pour Z'

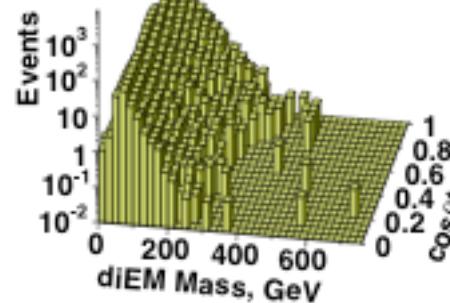
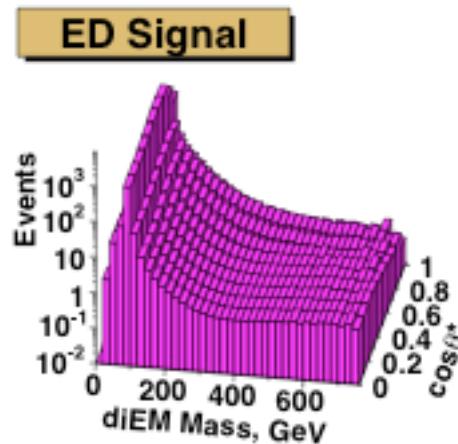
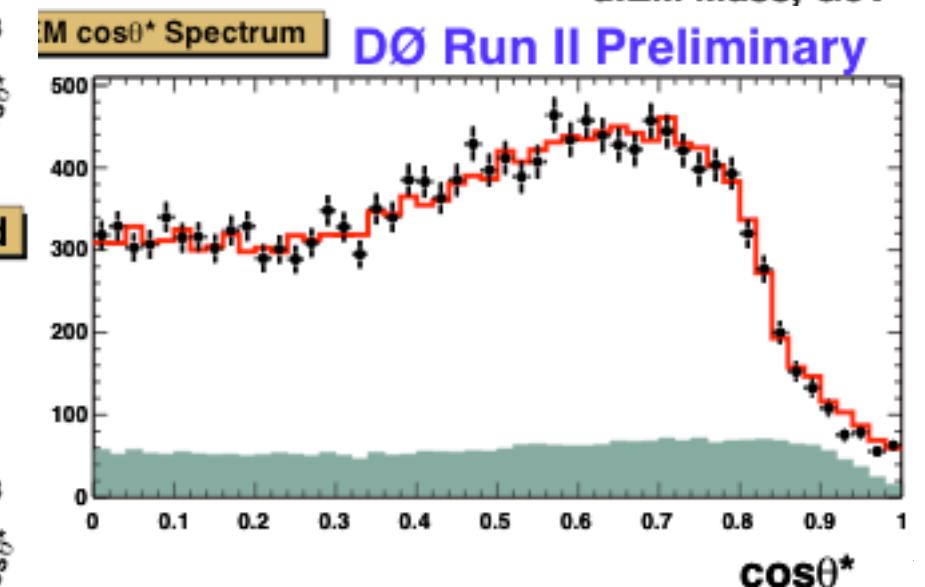
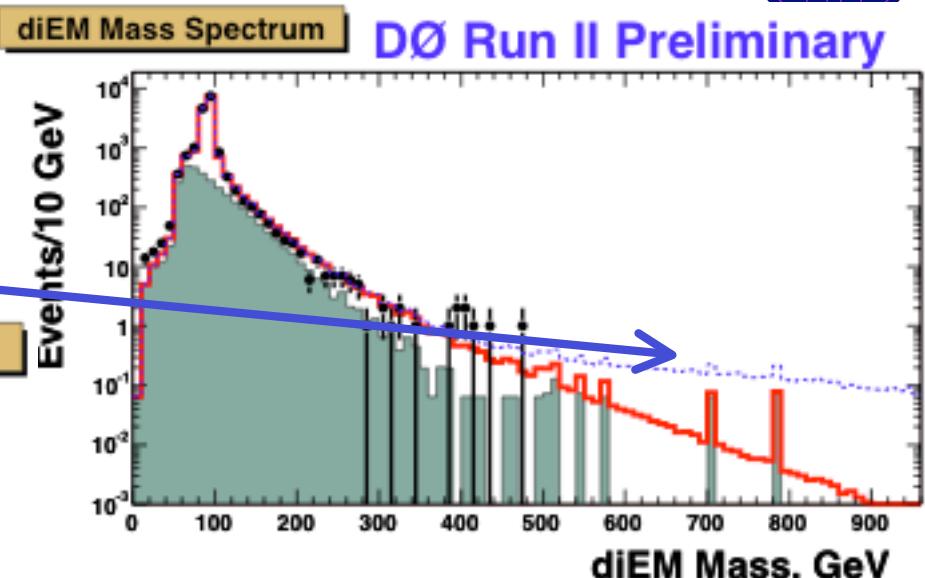
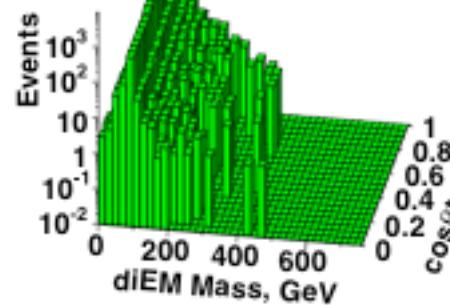
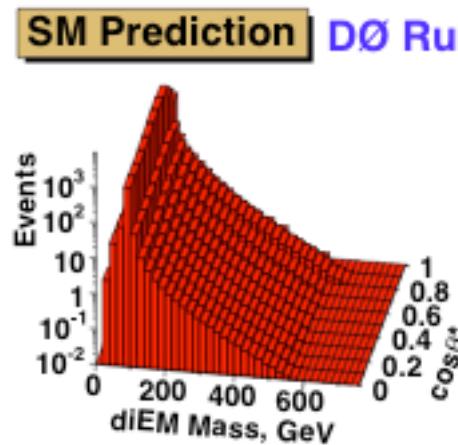
- Déviation dans spectre di-lepton
- Distribution angulaire (spin-2)



Tevatron

■ D0: ee + $\gamma\gamma$

✓ $\eta = 0.6$



Lentzdecker,
AL, 11 mai, 2006



M_S limites

■ Limites D0 (200 pb⁻¹):

| Limites à 95 % CL (TeV/c ²) | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------|
| GRW | HLZ | | | | | | Hewett | |
| | n=2 | n=3 | n=4 | n=5 | n=6 | n=7 | $\lambda=+1$ | $\lambda=-1$ |
| 1.36 | 1.56 | 1.61 | 1.36 | 1.23 | 1.14 | 1.08 | 1.22 | 1.10 |

■ Limites CDF:

| Limites à 95 % CL (TeV/c ²) | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|------|--------------|--------------|
| GRW | HLZ | | | | | | Hewett | |
| | n=2 | n=3 | n=4 | n=5 | n=6 | n=7 | $\lambda=+1$ | $\lambda=-1$ |
| 1.11 | | 1.32 | 1.11 | 1.00 | 0.93 | 0.88 | 0.99. | 0.96 |

Résumé



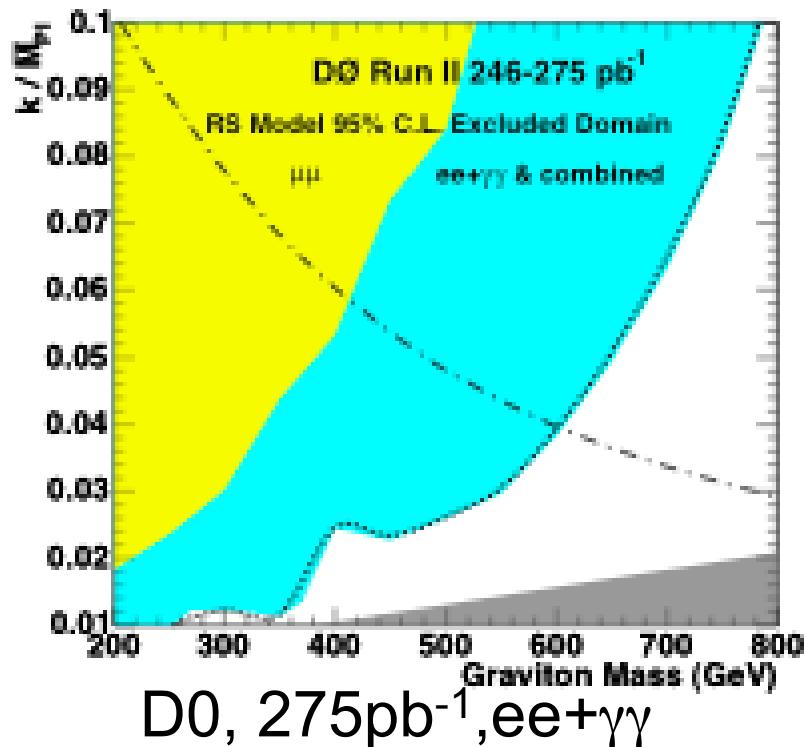
| Expérience | Luminosité (pb ⁻¹) | Limite(TeV) $\lambda =+1 \lambda=-1$ |
|---------------------------|-----------------------------------|---|
| LEP ee | 1900 | 1.20 1.09 |
| D0(I)ee $\gamma\gamma$ | 127 | 1.10 1.09 |
| D0(II) ee $\gamma\gamma$ | 200 | 1.22 1.10 |
| D0(I+II)ee $\gamma\gamma$ | 327 | 1.28 - |
| D0(II) $\mu\mu$ | 246 | 0.96 0.93 |
| CDF(I) ee $\gamma\gamma$ | ~100 | 0.99 0.85 |
| CDF(II) ee | 200 | 0.96 0.99 |
| | (fb-1) | n=2 n=5 |
| LHC(A)ll+ $\gamma\gamma$ | 10 | 7.0 5.4 |
| | 100 | 8.1 7.0 |

Hewett

HLZ

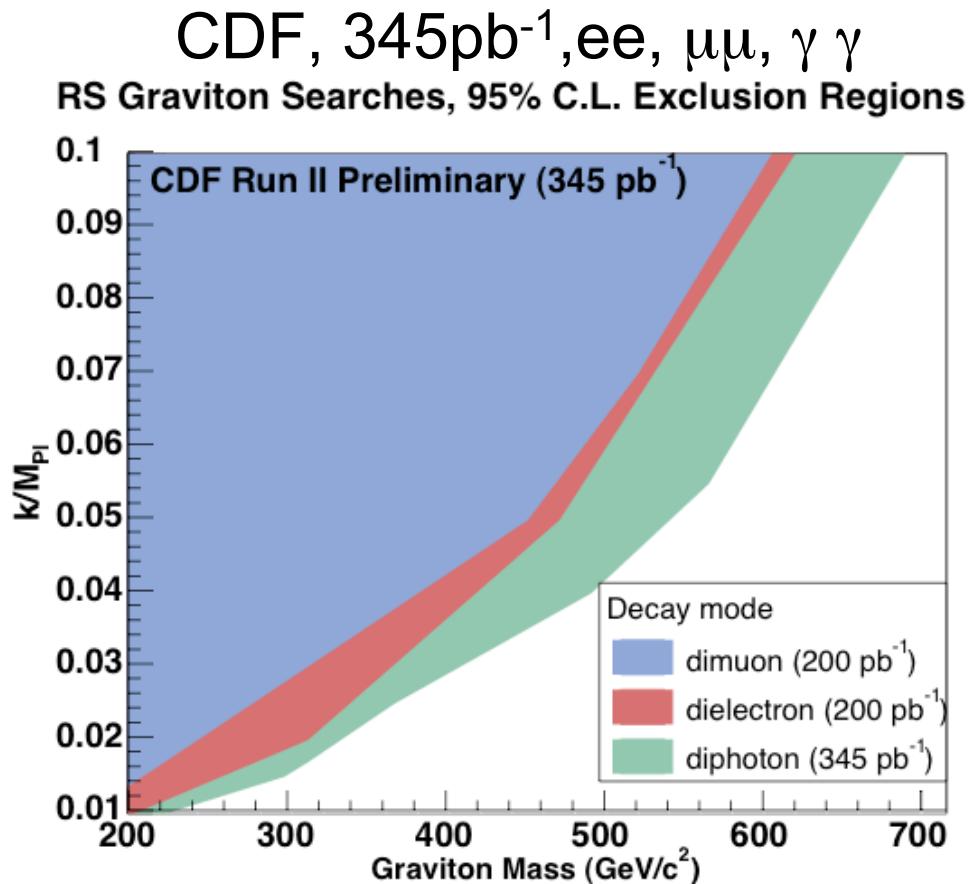


RS graviton au Tevatron



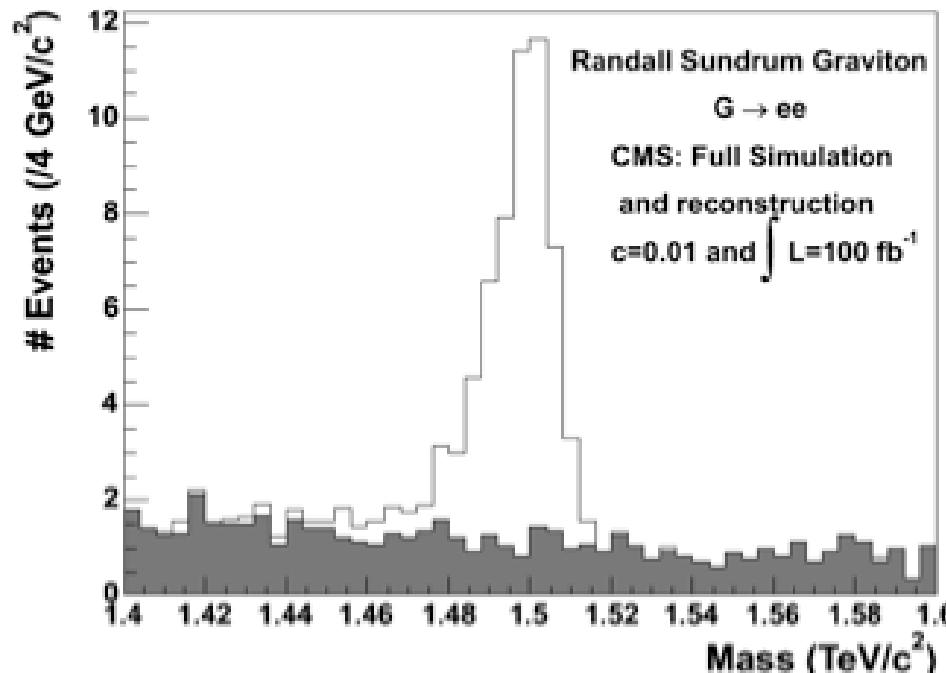
Sém

$k = \text{courbure}$



RS graviton au LHC

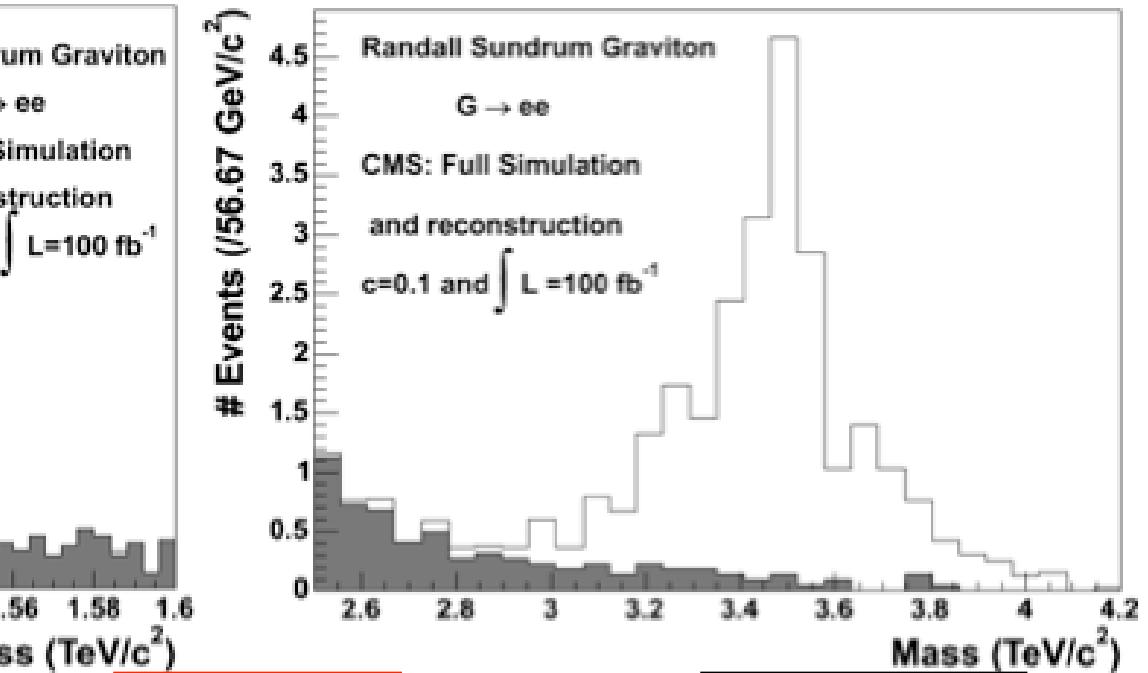
■ Canal di-electron dans CMS:



Avec 30 fb⁻¹:

- 1.6 TeV (c=0.01)
- 3.8 TeV (c=0.1)

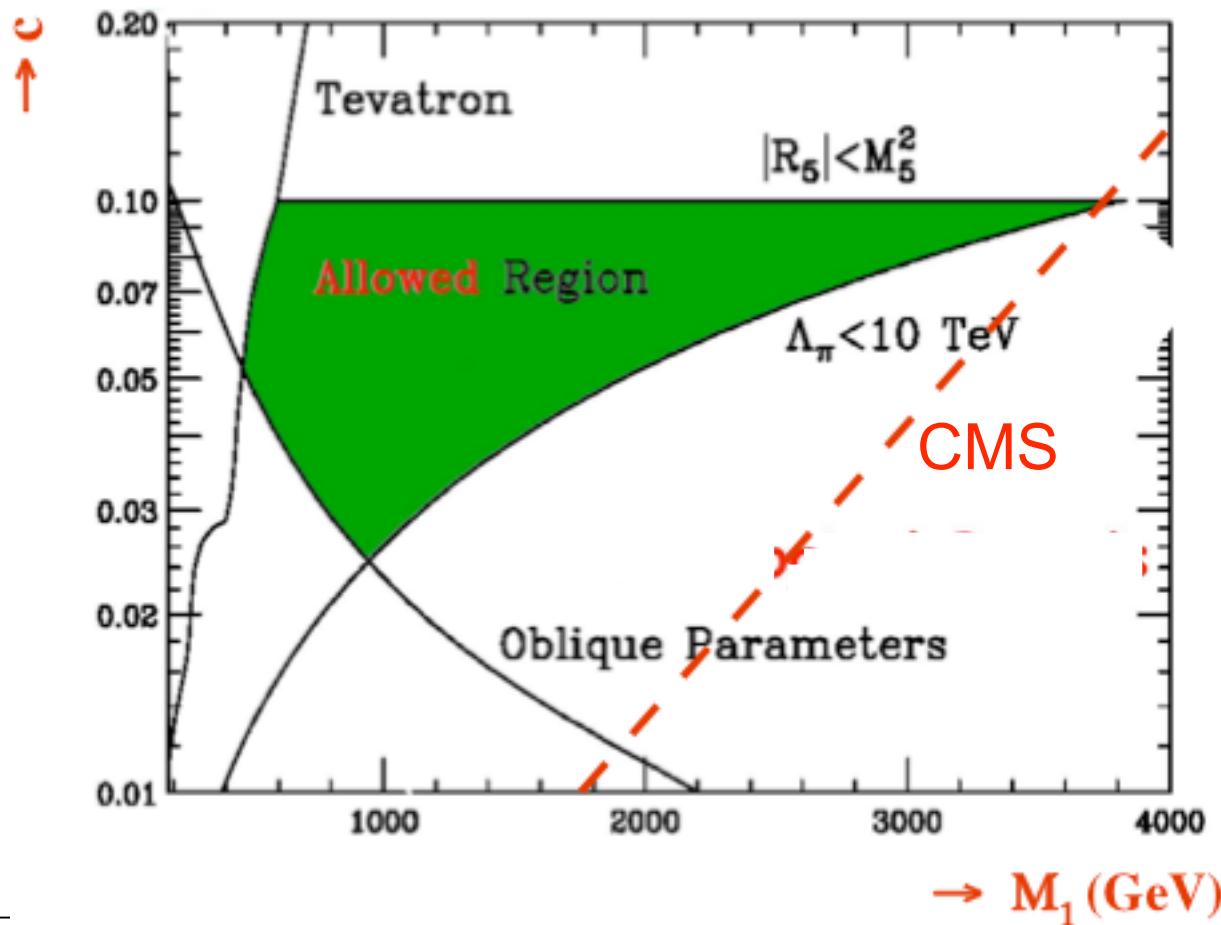
$c = k/M_{Pl}$



C. Collard

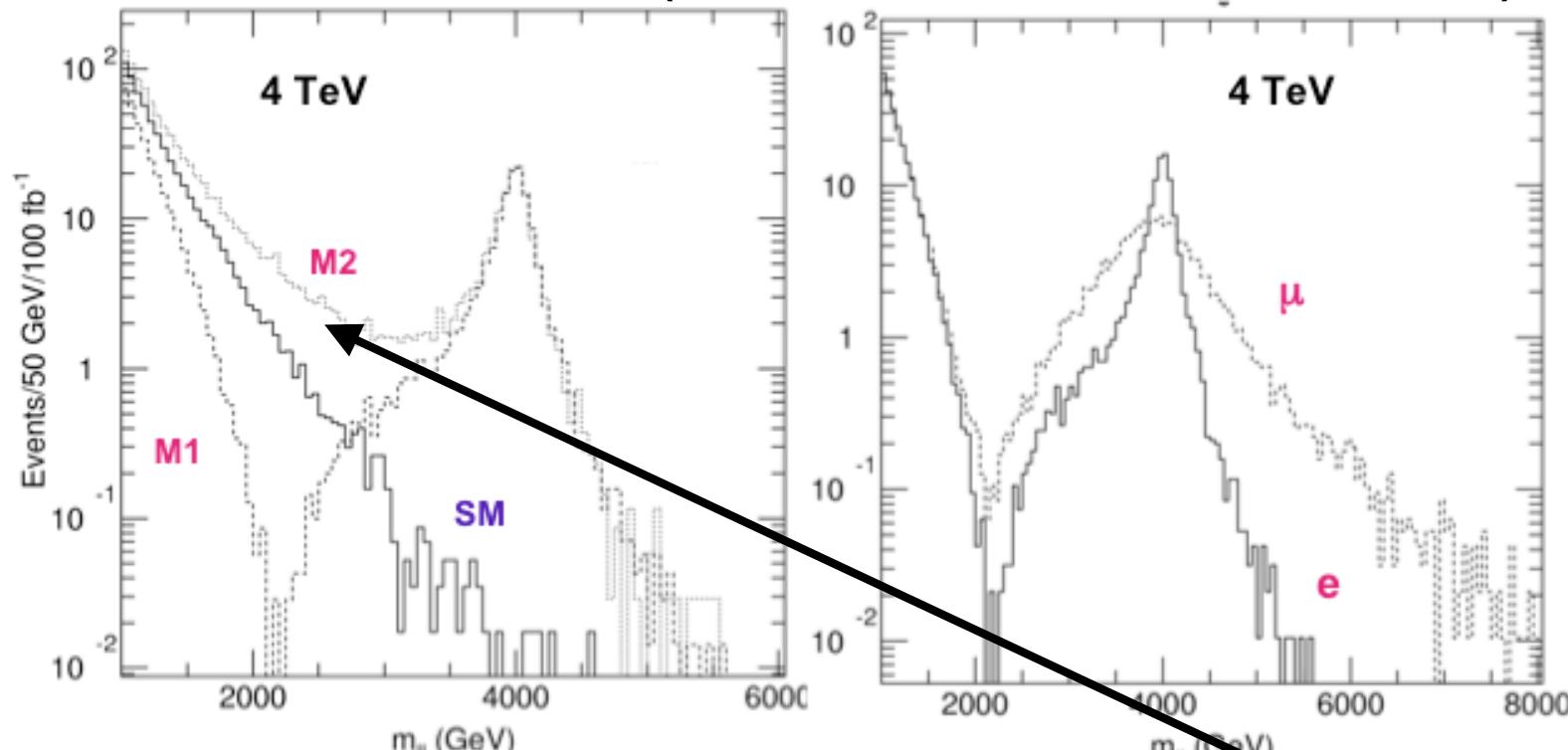
RS graviton à CMS

- Région d'intérêt couverte avec 30 fb^{-1}



TeV-1

- LEP: Limite à 4 TeV (inaccessible au Tevatron)



| électrons | | | e+μ | (interférences) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| 100 fb ⁻¹ | 200 fb ⁻¹ | 300 fb ⁻¹ | 300 fb ⁻¹ | |
| 9.5 TeV | 11 TeV | 12 TeV | 13.5 TeV | |



Conclusions

- Modèles très variés suggèrent un Z'
- Actuellement le Tevatron repousse les limites
- CDF : asymétries pour accroître les limites
- LHC: grand potentiel (of course)
- Asymétries seront cruciales pour faire la distinction entre modèles une fois qu'une résonance sera découverte
- Bcp d'autres modèles n'ont pas été couverts par cet exposé (W' , ...)



Back-up slides

G. De Lentdecker,
Séminaire LAL, 11 mai, 2006



- LHC : 7.5 TeV
- ILC: 4.1 TeV @ $\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$
7.2 TeV @ $\sqrt{s} = 1.0 \text{ TeV}$



- Tevatron (2fb^{-1}) : 1.1 TeV
- LHC (100fb^{-1}) : 6.3 TeV
- ILC ($\sqrt{s} = 0.5 \text{ TeV}$, 500fb^{-1}): 13.0 TeV
- ILC ($\sqrt{s} = 1.0 \text{ TeV}$, 500fb^{-1}): 23.0 TeV
- ILC ($\sqrt{s} = 1.5 \text{ TeV}$, 500fb^{-1}): 31.0 TeV