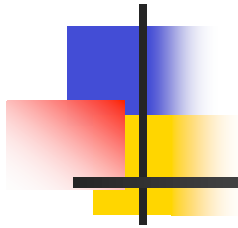


# Recherche de bosons de jauge lourds avec les détecteurs CDF et CMS

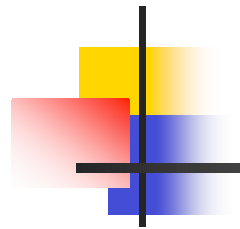


Gilles De Lentdecker  
Université Libre de Bruxelles  
University of Rochester

# Overview



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



# Origine des bosons de jauge lourds



- La plupart des extensions du MS :
  - Modèles GUT  $SU(10)$  et  $E_6$
  - 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
- $E6 \rightarrow SO(10) \times U(1) \quad Z_\psi$
- $SO(10) \rightarrow SU(5) \times U(1) \quad Z_\chi$ 
  - $Z' = Z_\psi \cos\theta_{E6} \times Z_\chi \sin\theta_{E6}$
- ✓  $\theta = 37.78^\circ \rightarrow Z_\eta$
- ✓  $\theta = 127.78^\circ \rightarrow Z_\rho$
- LEP: très faible mixing  $Z$ - $Z'$

# Z' génériques



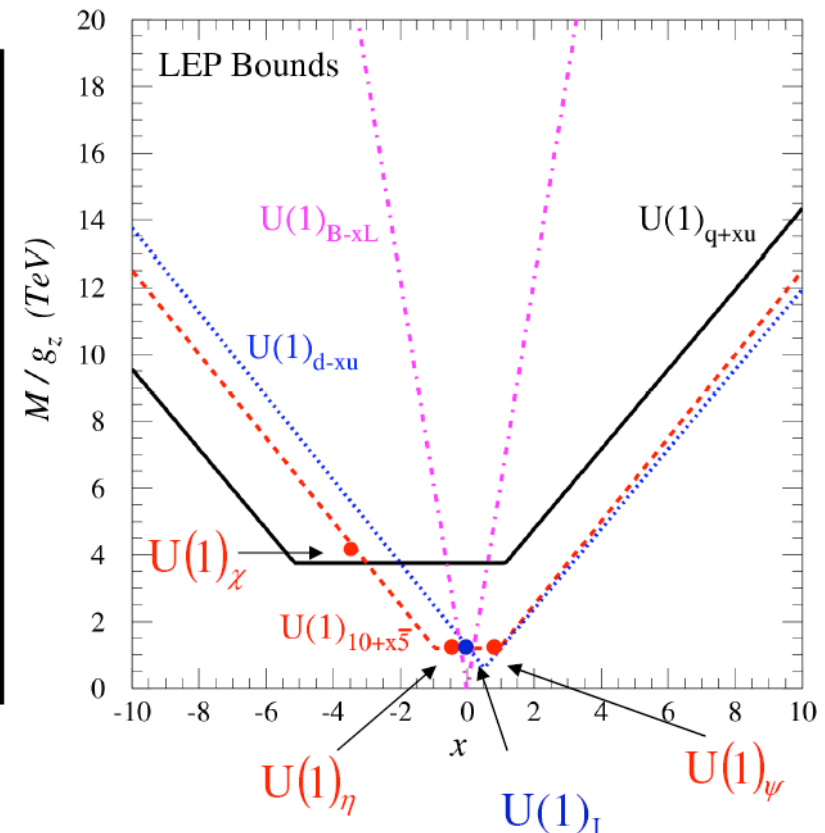
- Carena, Daleo, Dobrescu, Tait (CDDT)
- $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y \times U(1)_Z$
- Pour 1 Z' il faut:  $M_{Z'}$ ,  $g_Z$ , 15 couplages
- +qqes hypothèses (< mesures de précision)
  - FCNC
  - Pas de désintégration en particules exotiques
  - Invariance de jauge
- 4 classes de solutions: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

# 4 lignes...



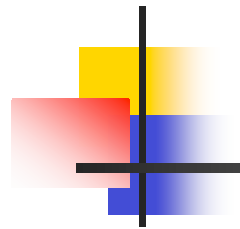
- Dans chaque classe, chaque  $Z'$  est défini par:
  - Masse  $M_{Z'}$ , couplages  $g_z$  et un paramètre  $x$

|                    | B- $x$ L | q+ $x$ u     | 10+ $x\bar{5}$ | d- $x$ u    |
|--------------------|----------|--------------|----------------|-------------|
| $q_L=(u_L, d_L)$   | +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        |
| $l_L=(e_L, \nu_L)$ | - $x$    | -1           | + $x$ /3       | ( $x$ -1)/3 |
| $e_R$              | - $x$    | -(2+ $x$ )/3 | -1/3           | + $x$ /3    |



✓ Modèle d- $x$ u:  $Z_I$  ( $x=0$ )

■ Modèle 10+ $x\bar{5}$ :  $Z_{\eta}$  ( $x=-0.5$ ),  $Z_{\psi}$  ( $x=1$ ),  $Z_{\chi}$  ( $x=-3$ )



# Dimensions spatiales supplémentaires



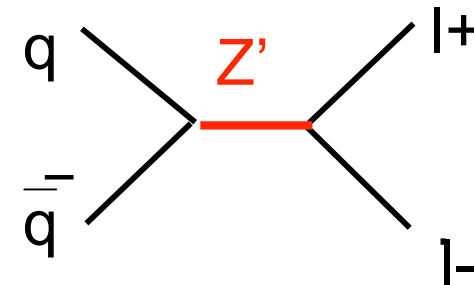
- concepts développés dans théorie des cordes
- Adressent le problème de hiérarchie
- Arkani-Hamed Dimopoulos Dvali (ADD):
  - Hiérarchie < graviton se propage dans ED
  - Variante ( $\text{TeV}^{-1}$ ): ED de différentes tailles;
    - Bosons de jauge se propagent dans ED,  $R_c \sim 10^{-17} \text{ cm}$
    - 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:



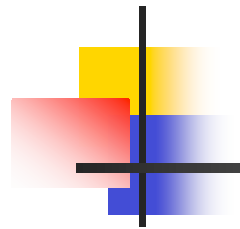
- Quelle que soit la résonance,
- Signature la plus claire pour collisionneur de hadrons:

- 2 leptons dans l'état final



- $e^+e^-$  et  $\mu\mu$  : faible bruit de fond (DY)
- + canal  $\gamma\gamma$  pour graviton RS

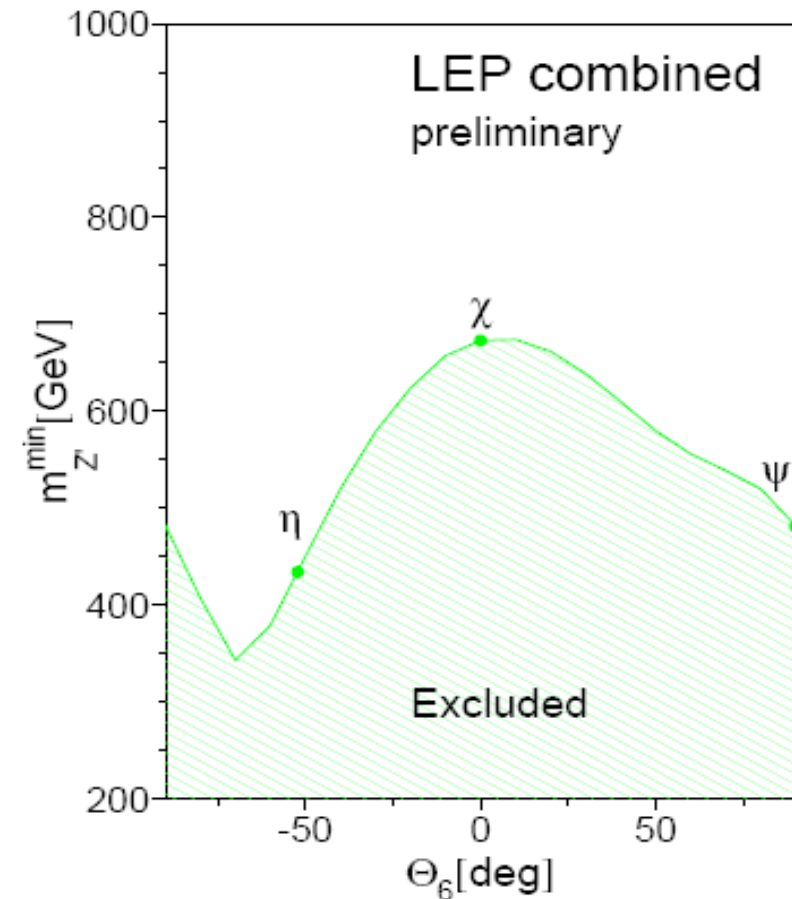




# Précédents résultats



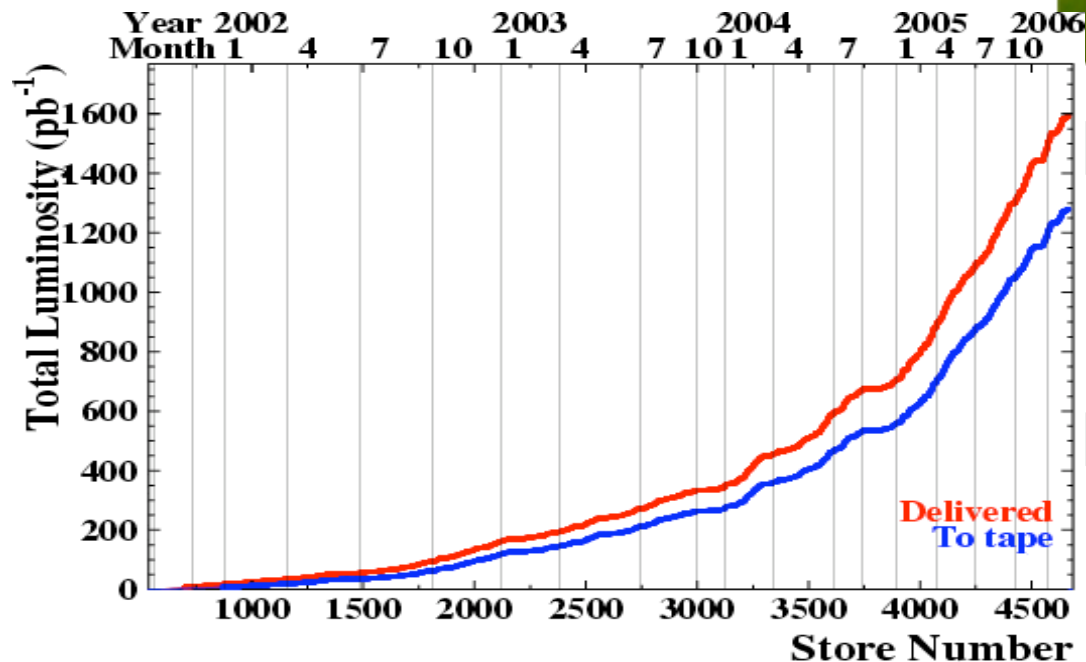
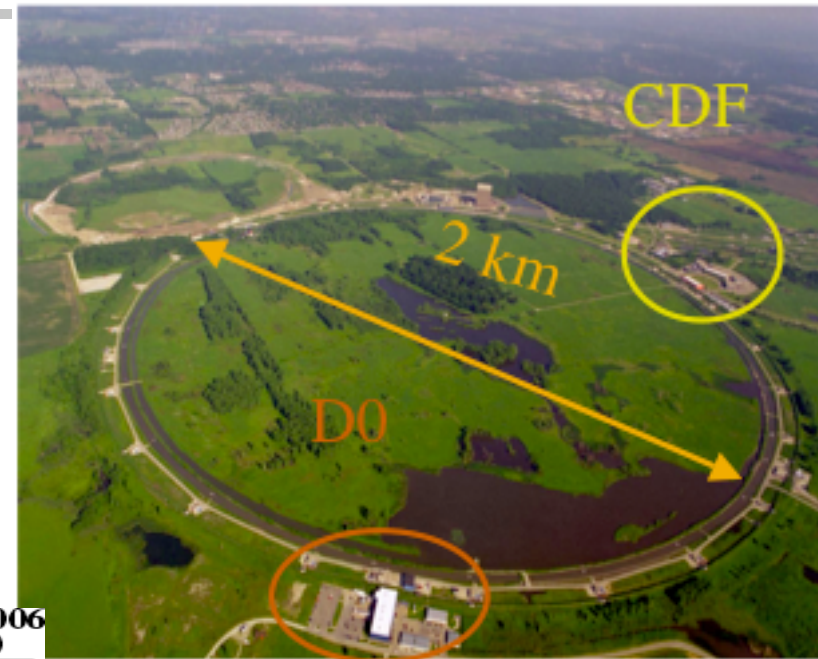
- LEP II
  - Masse et distr. angulaires
  - Mesure précise au pôle du Z
- Expériences à basse énergie:
  - Violation de la parité atomique
  - Diffusion  $e - \nu$
- Pas de limites fortes
- Tevatron Run I
  - Énergies bien plus élevées
  - $ee$ ,  $\mu\mu$ ,  $\tau\tau$
  - Recherche directe d'un pic



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

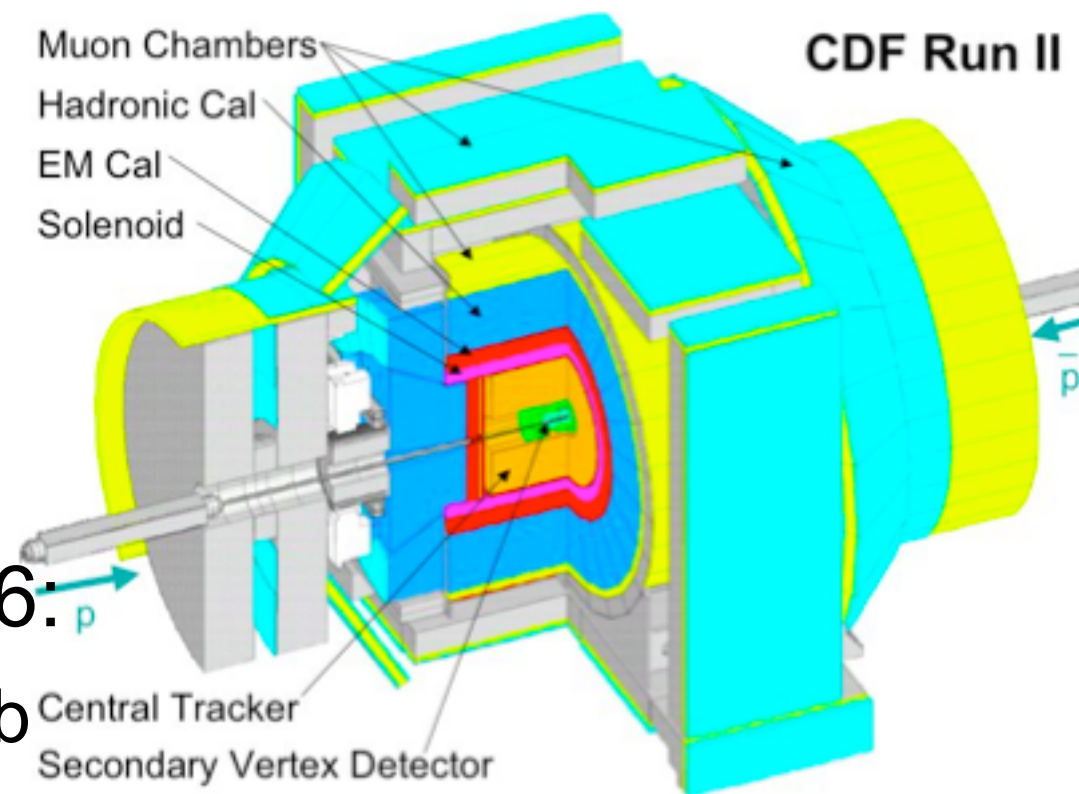
## Lumi. intégrée:

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

# Le détecteur CDF



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

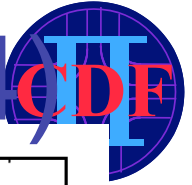


# Sélection

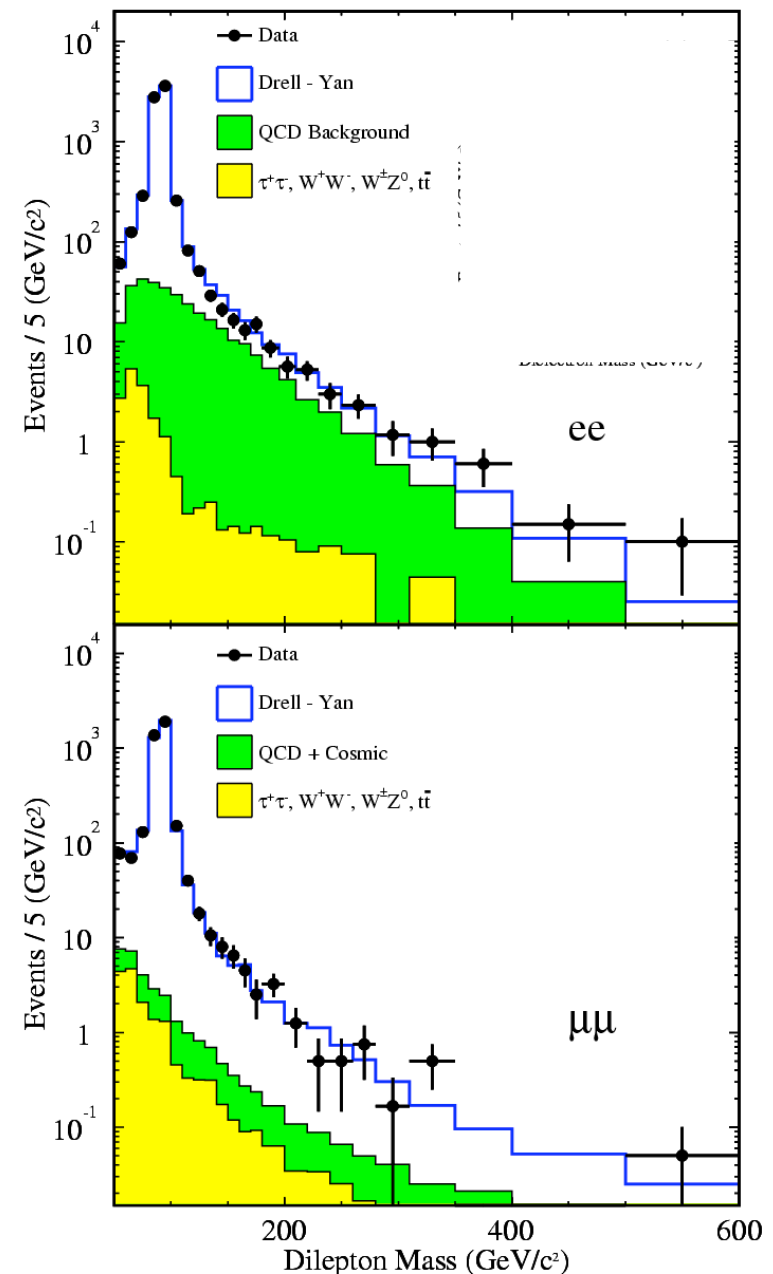


- 2 leptons de grand  $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
- Di-électron:
  - 1 électron central  $|\eta| < 1.0$  (1 trace associée)
  - 1 électron central ou forward (plug)
  - $\Rightarrow$  2 topologies, C-C & C-P
- Di-muon:
  - 2 muons centraux
- Bruits de fond dominant:
  - (ee) Di-jet ou QCD
  - ( $\mu\mu$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

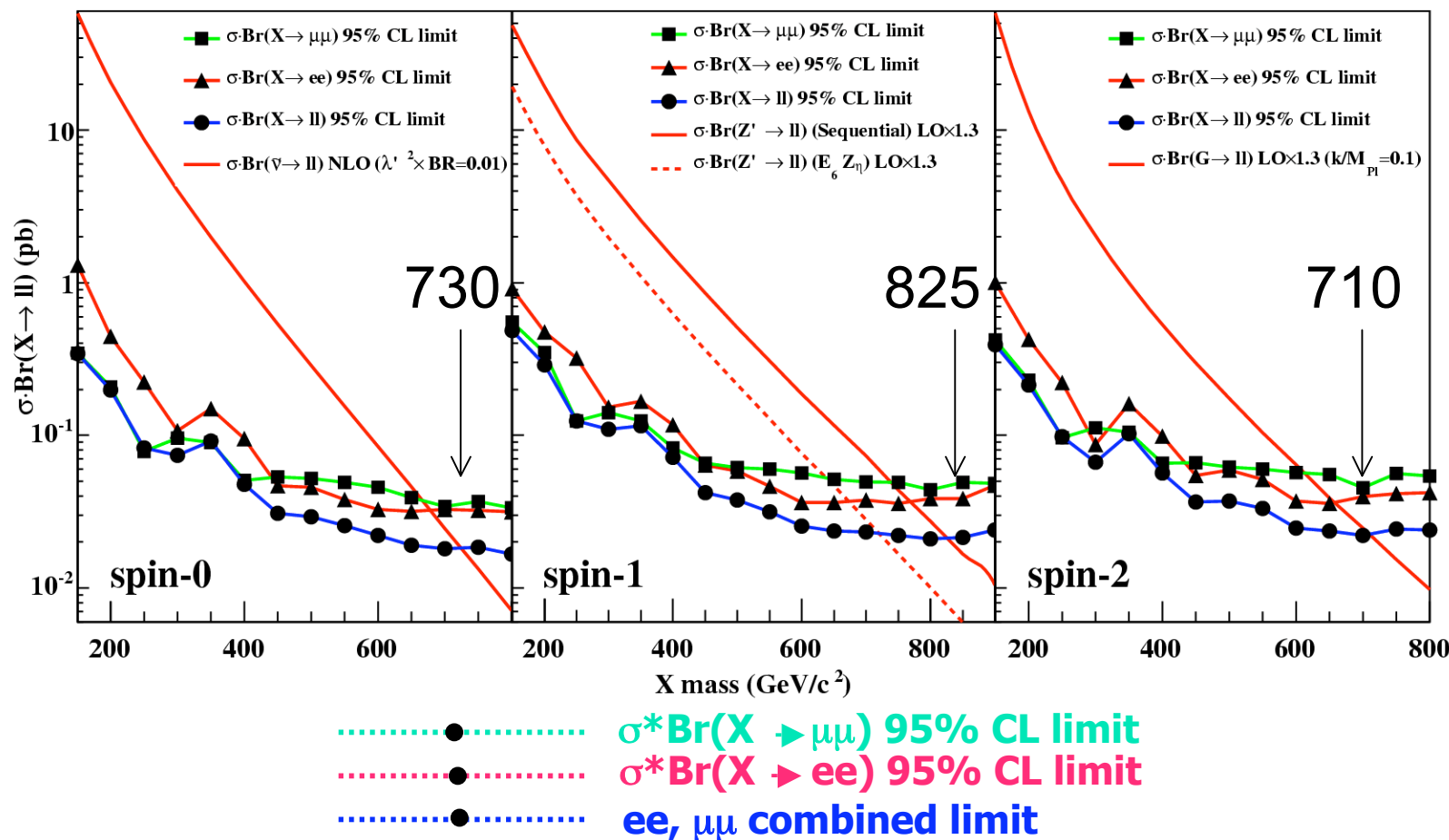
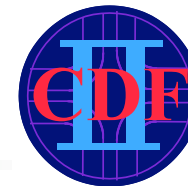
# $Z' \rightarrow l\bar{l}$ , Tevatron RunII, (2004)



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



# Limites pour 200 pb<sup>-1</sup>



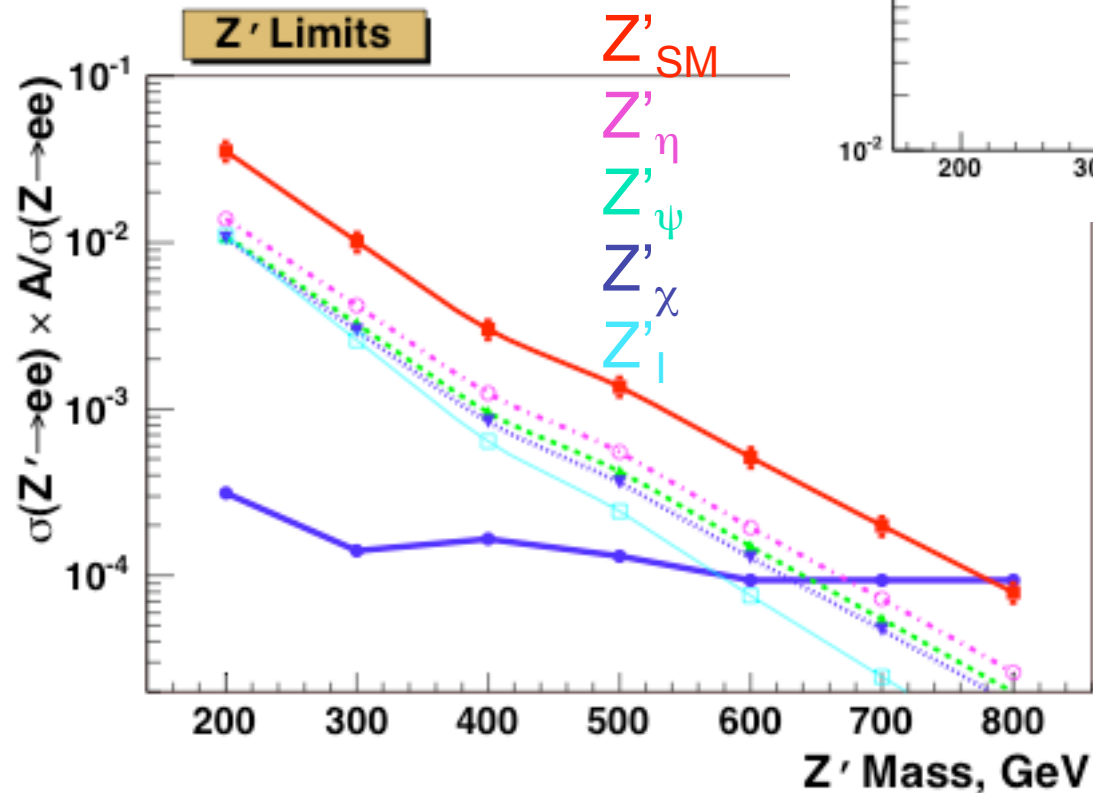
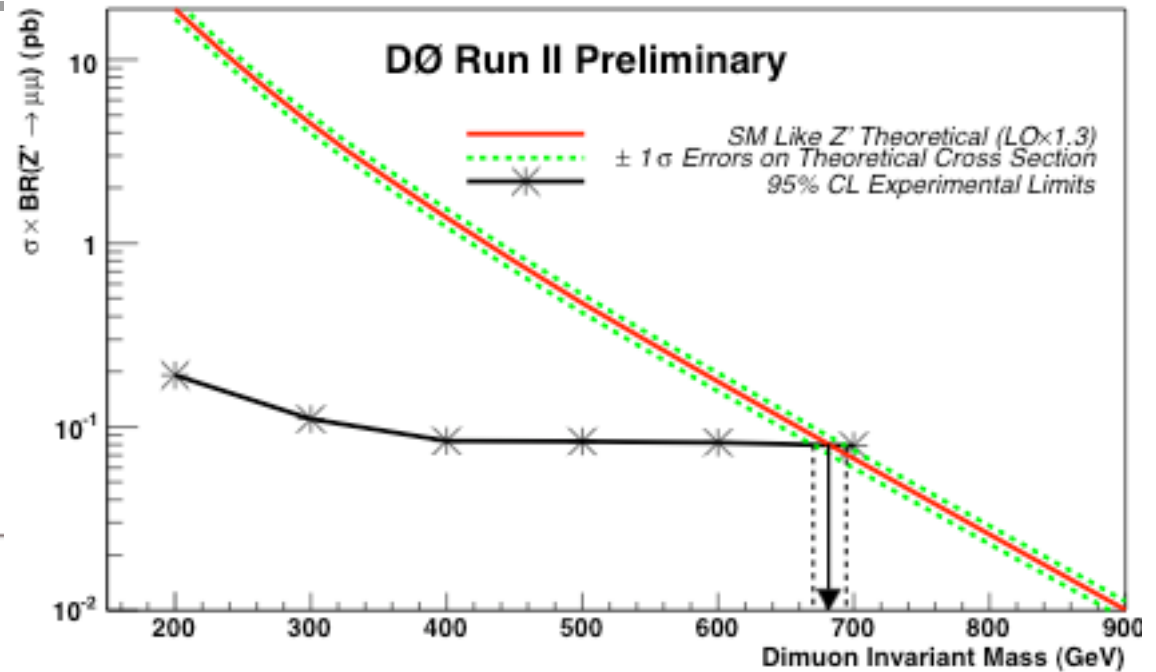
■ Courbes utilisables pour de nombreux modèles

# E6 Z' (D0)



$Z' \rightarrow \mu\mu$ , 250 pb<sup>-1</sup>

Limite : 680 GeV/c<sup>2</sup>



$Z' \rightarrow ee$ , 200 pb<sup>-1</sup>  
Limite = 780 GeV/c<sup>2</sup>

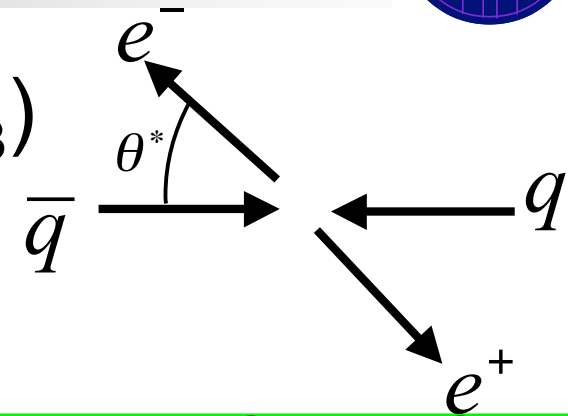


# CDF, nouvelle méthode (ee)

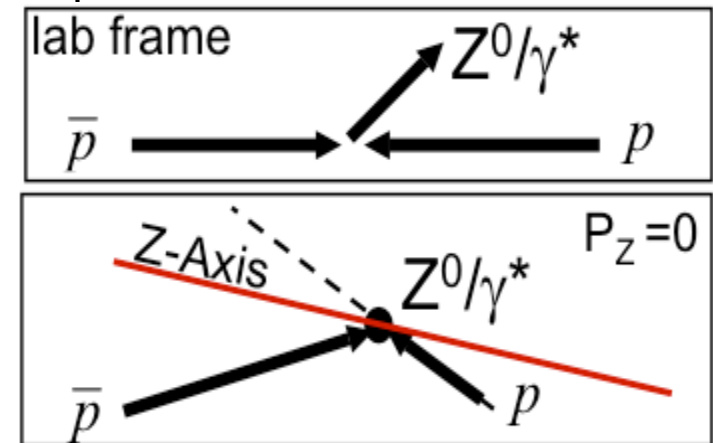
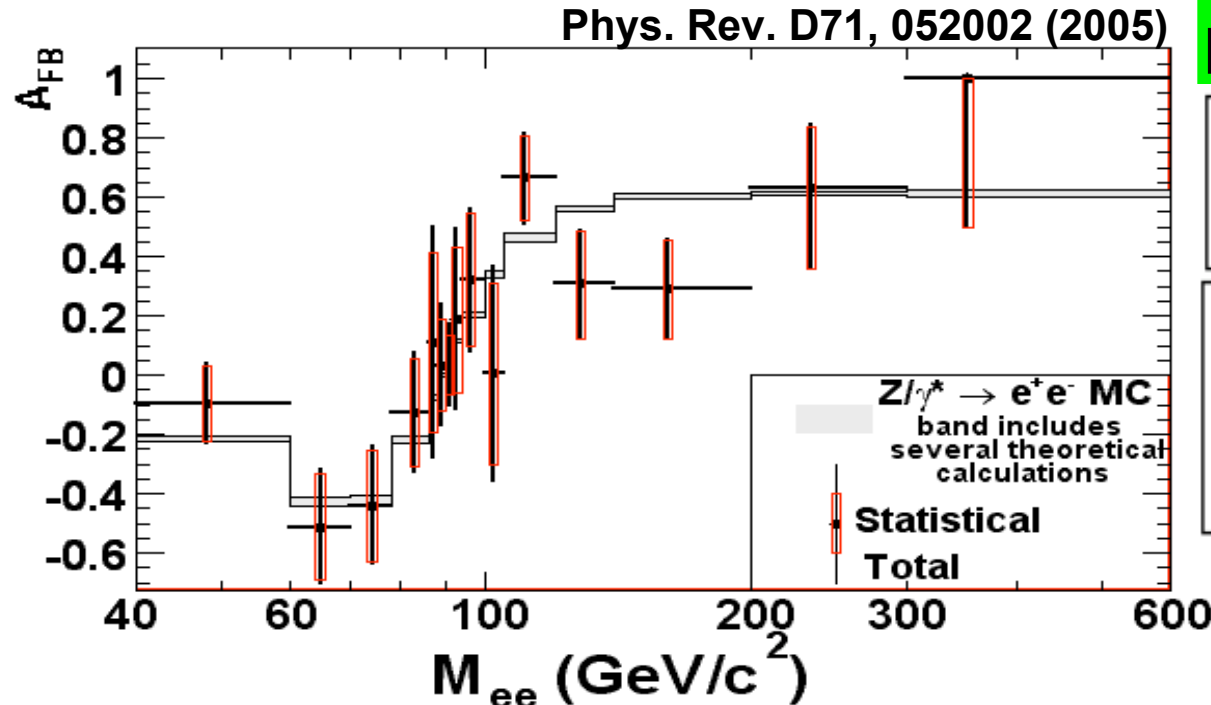
## ■ $M_{ee}$ et distribution angulaire ( $A_{FB}$ )

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

$$A_{FB} = \frac{(N^+ - B^+) - (N^- - B^-)}{(N^+ - B^+) + (N^- - B^-)} \quad \begin{array}{l} \text{■ } \# \cos\theta^* > 0 = N^+ \\ \# \cos\theta^* < 0 = N^- \end{array}$$



Référentiel Collins-Soper  
minimiser ambiguïté du  
 $P_T$  des quarks





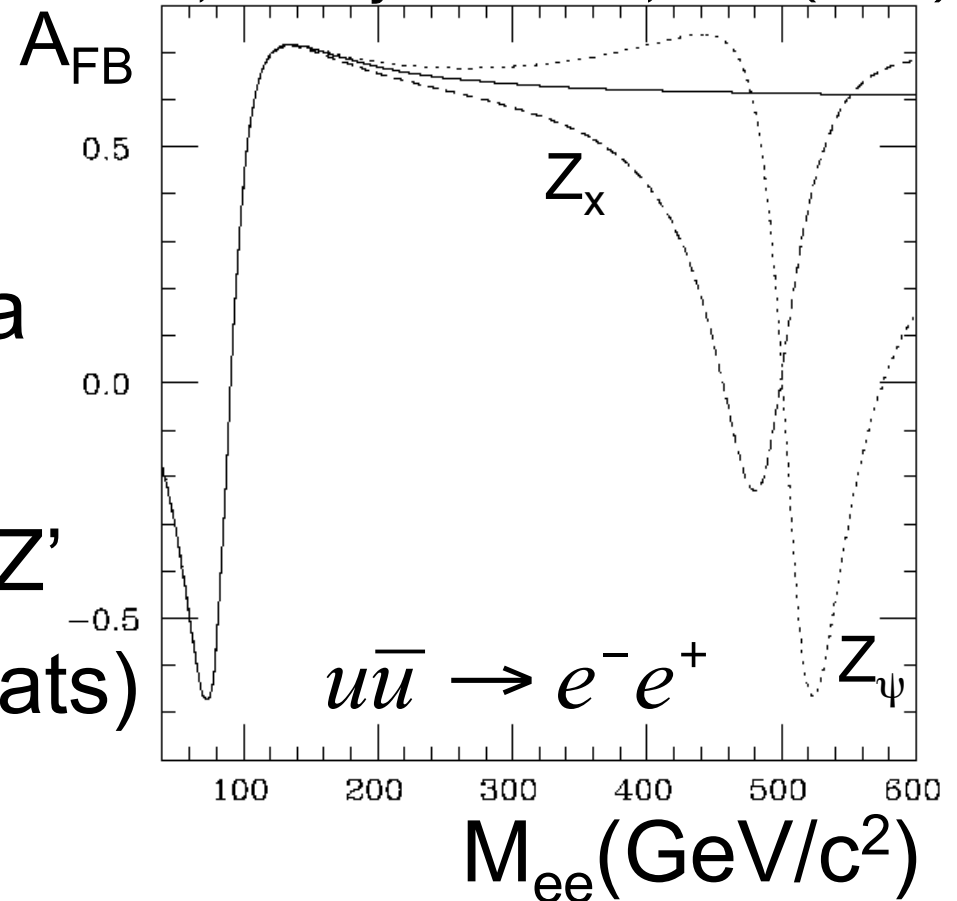
# $A_{FB}$ et $Z'$ :



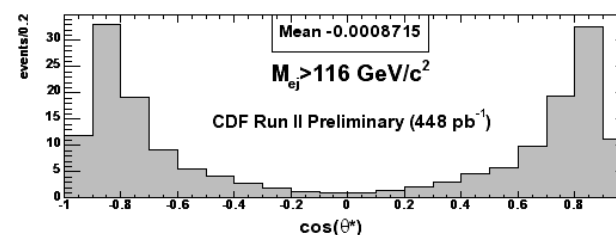
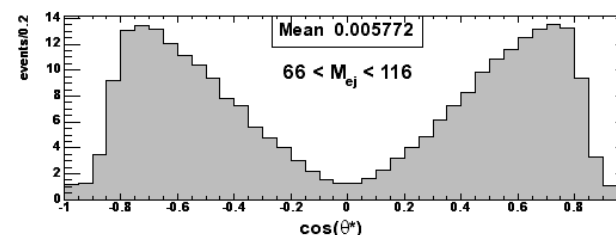
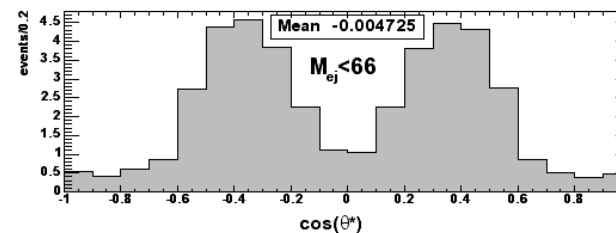
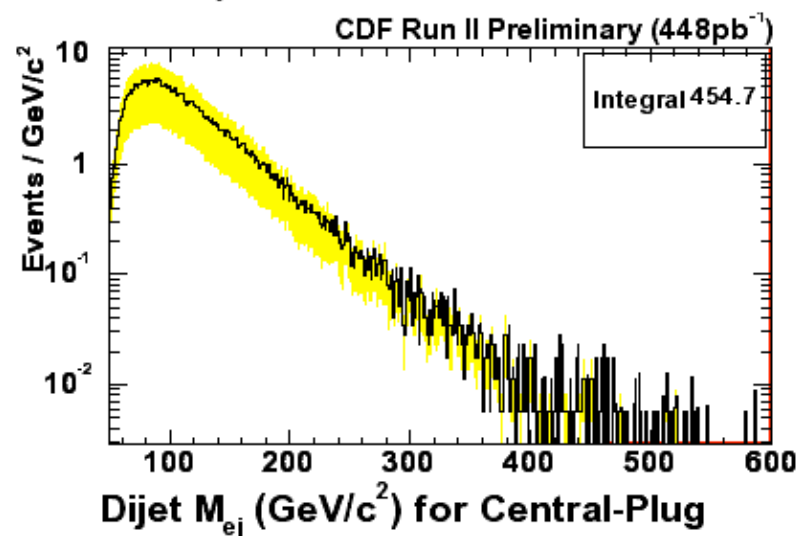
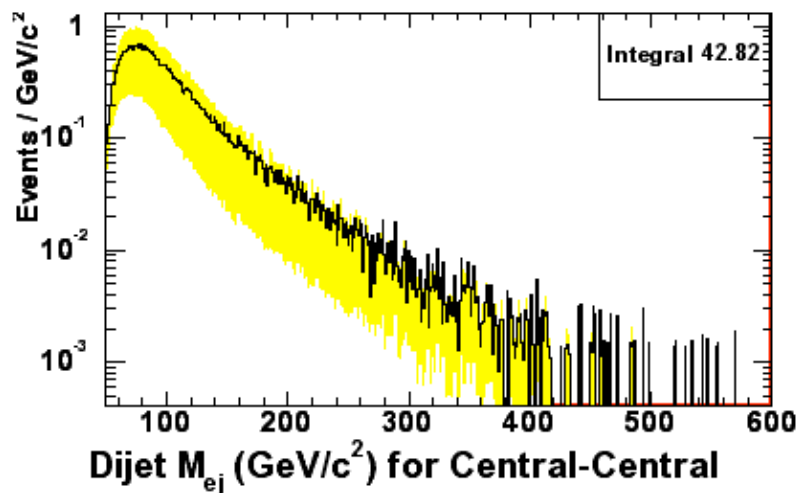
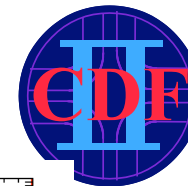
- $Z'$  interfere avec  $Z/\gamma^*$
- $A_{FB}$  dépend des couplages:
- $\cos\theta^* + M_{ee}$  augmente la sensibilité
- Etude de 4 classes de  $Z'$
- $448 \text{ pb}^{-1}$  (30845 candidats)

500  $\text{GeV}/c^2$   $Z'$ :

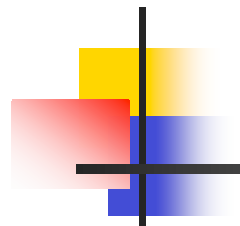
Rosner, J.L.: Phys. Rev. D 54, 1078 (1996)



# Bruit de fond QCD



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



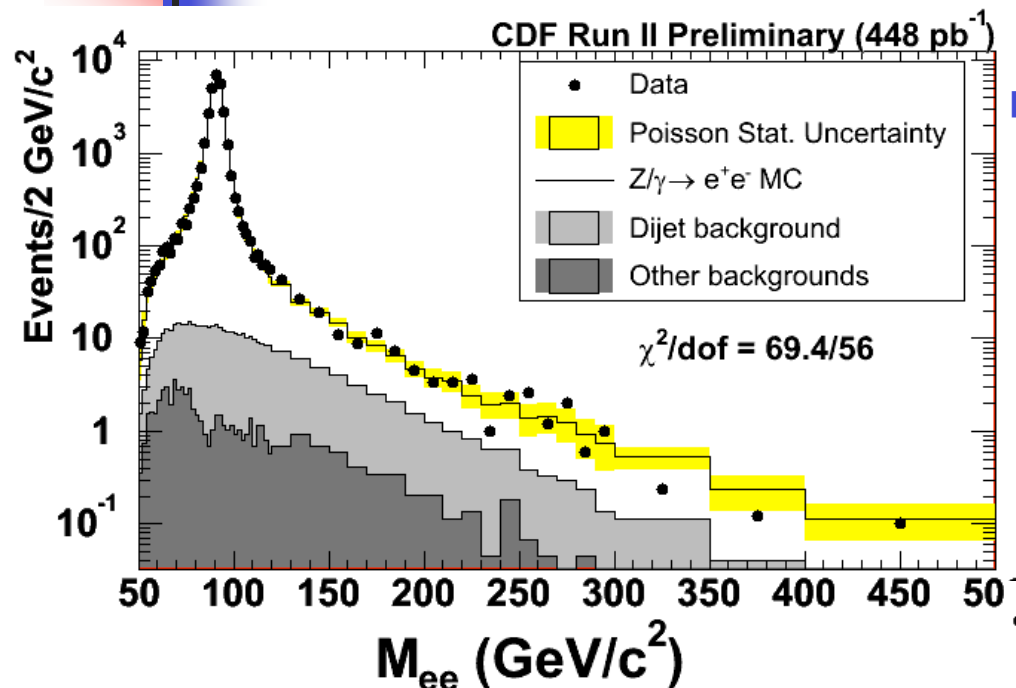
# Les autres bruits de fond



- $\sim 90$  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  |

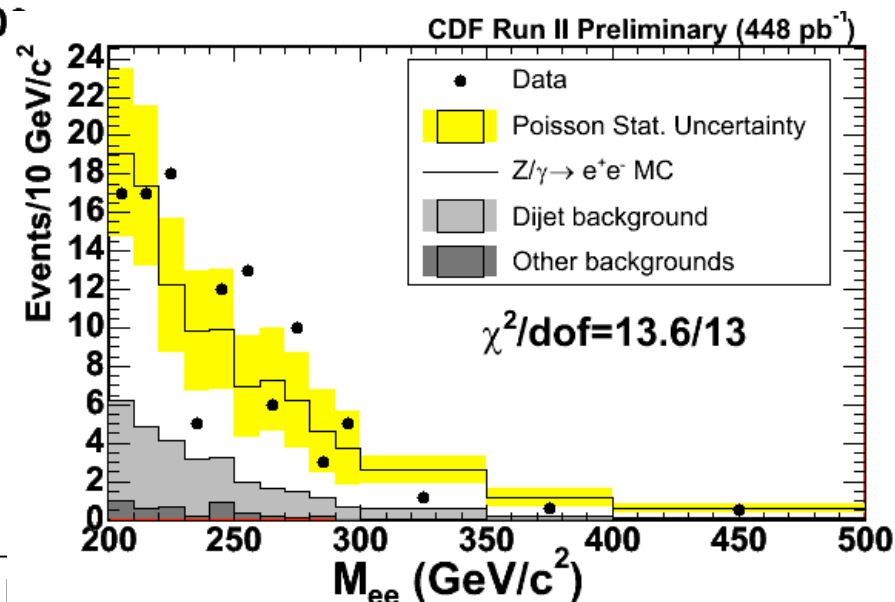
# Distribution de $M_{ee}$



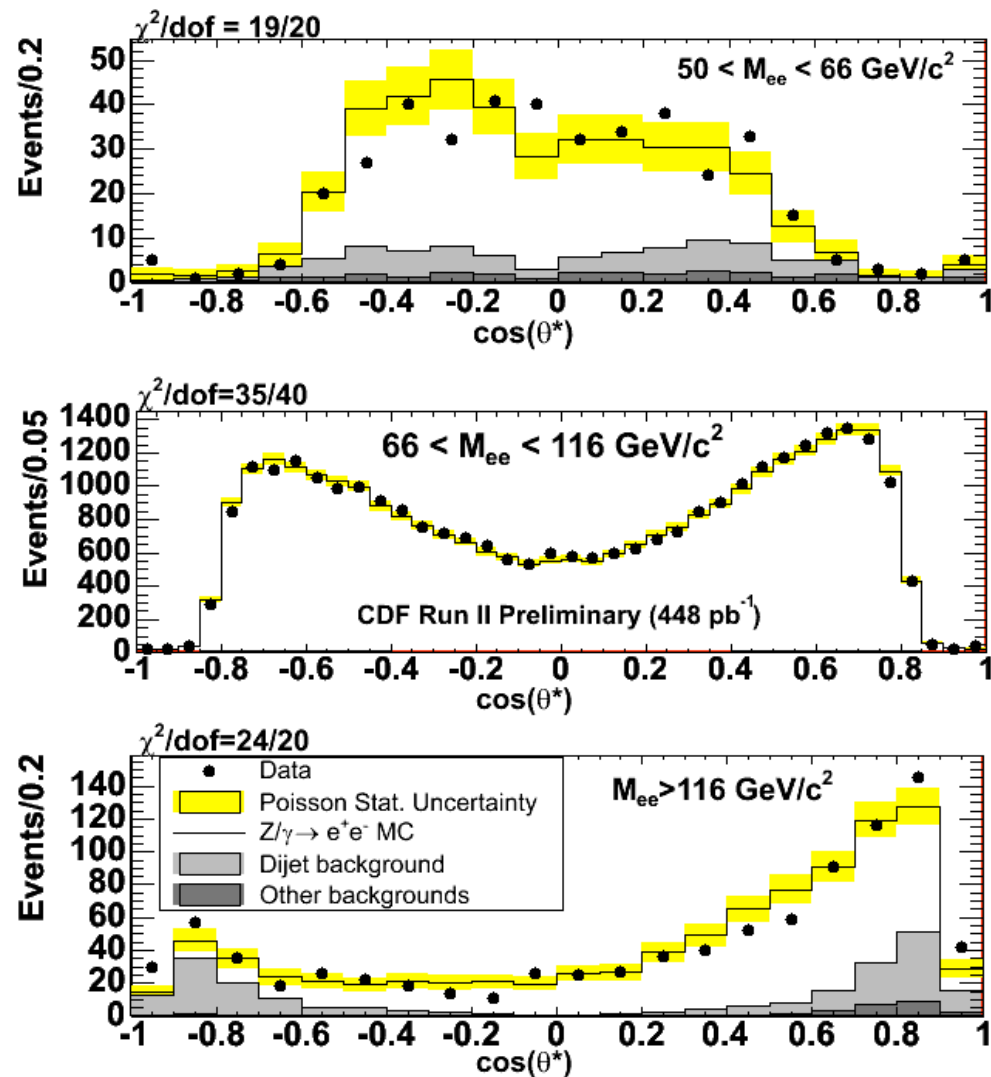
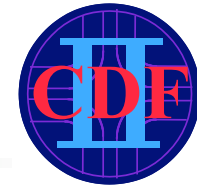
■ Erreur stat.  
représentée sur les  
prédictions

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

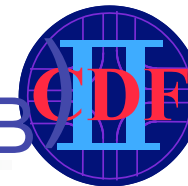
|           | Data | Predicted                  |
|-----------|------|----------------------------|
| $M > 200$ | 120  | $125 \pm 11_{\text{stat}}$ |



# Distribution de $\cos\theta^*$

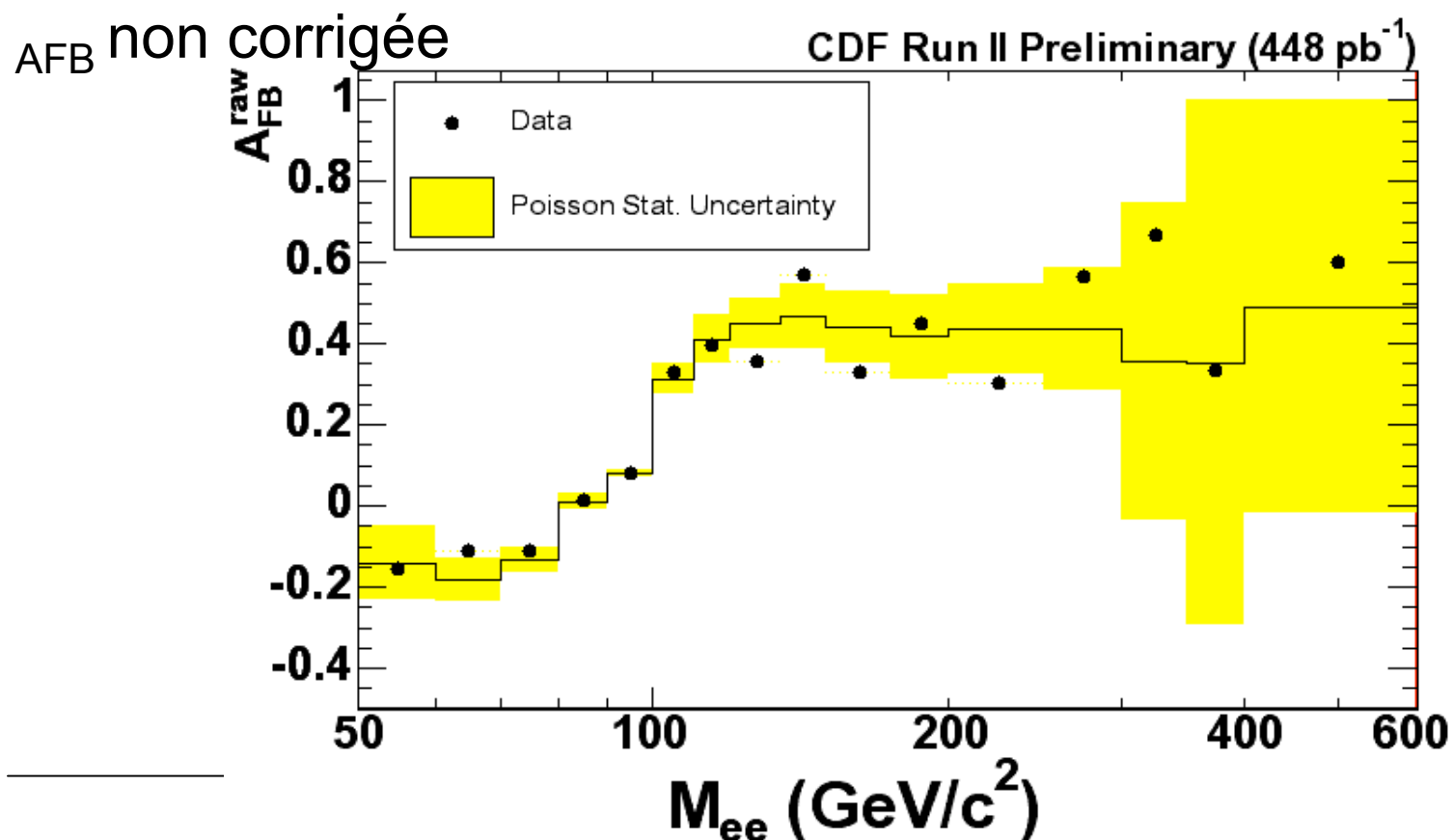


# Mesure des asymétries ( $A_{FB}$ )



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

$N^\pm$  : Forward/Backward Candidates



# Méthode $CL_s$



- Méthode utilisée pour le Higgs (LEP)

- Test entre 2 hypothèses:

- H1:  $Z'/Z/\gamma^*$
- H2:  $Z/\gamma^*$

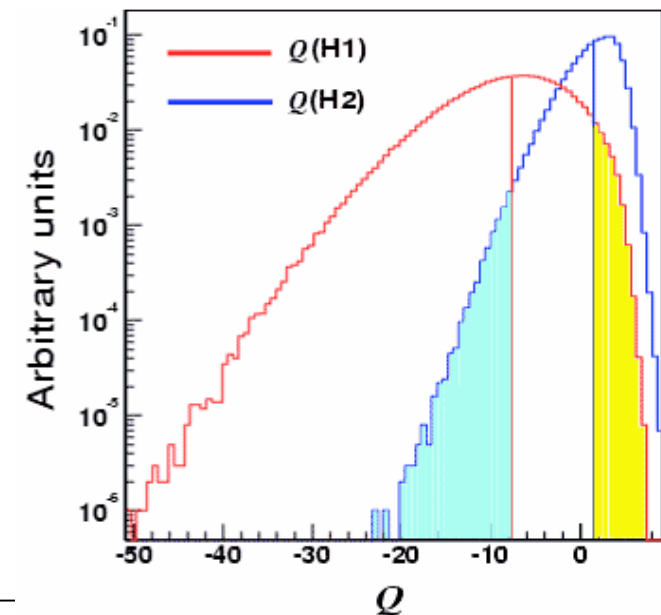
- Distrib. de poisson:

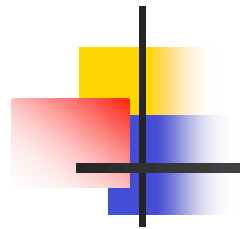
$$Q = -2\ln[P(\text{data}|H1)/P(\text{data}|H2)]$$

- Pseudo-expériences

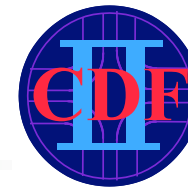
$$CL_s = \frac{P(Q < Q_{\text{obs}} | H_2)}{P(Q < Q_{\text{obs}} | H_1)}$$

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





# Les erreurs systématiques



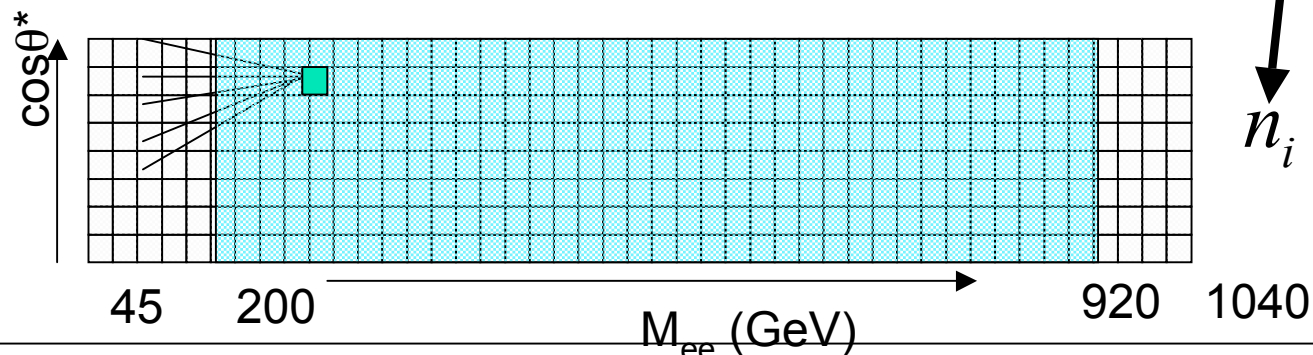
- Energy scale: 3%
- Résolution en énergie: 3%
- Bruit de fond:
  - QCD ~50%
  - EWK ~20%
- Lumi, acceptance, section efficace : ~20%
- PDF, trigger: négligeable



# 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  $\gamma^*$
  - Calcule acceptance et résolution

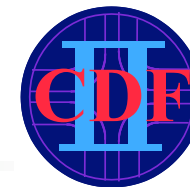


générateur

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:

|                        | <b>CDF</b><br><b><math>e^+e^-</math></b><br><b>448 pb<sup>-1</sup></b> | <b>CDF</b><br><b><math>ee + \mu\mu</math></b><br><b>~200 pb<sup>-1</sup></b> | D0<br>$ee$<br>200 pb <sup>-1</sup> | CDF<br>$ee$<br>200 pb <sup>-1</sup> | LEP II  |
|------------------------|--|--|------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Limits<br>On $Z'_{SM}$ | <b>855 GeV</b>   | 825 GeV  | 780 GeV                            | 750 GeV                             | 1.8 TeV |

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

# Limites sur E6 Z's



|          | <b>CDF</b><br><b><math>e^+e^-</math></b><br><b>448 pb<sup>-1</sup></b> | <b>CDF</b><br><b><math>ee + \mu\mu</math></b><br><b><math>\sim 200 \text{ pb}^{-1}</math></b> | D0<br>$ee$<br>200 pb <sup>-1</sup> | CDF<br>$ee$<br>200 pb <sup>-1</sup> | LEP     |
|----------|--|---|------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| $Z_l$    | <b>650 GeV</b>   | 615 GeV   | 575 GeV                            | 570 GeV                             |         |
| $Z_\chi$ | <b>735 GeV</b>   | 675 GeV   | 640 GeV                            | 610 GeV                             | 673 GeV |
| $Z_\psi$ | <b>725 GeV</b>   | 690 GeV   | 650 GeV                            | 625 GeV                             | 481 GeV |
| $Z_n$    | <b>745 GeV</b>   | 720 GeV   | 680 GeV                            | 650 GeV                             | 434 GeV |

# 4 classes:

- $M_Z'$  exclu en fonction de  $x$
- Surfaces colorées = exclu par CDF

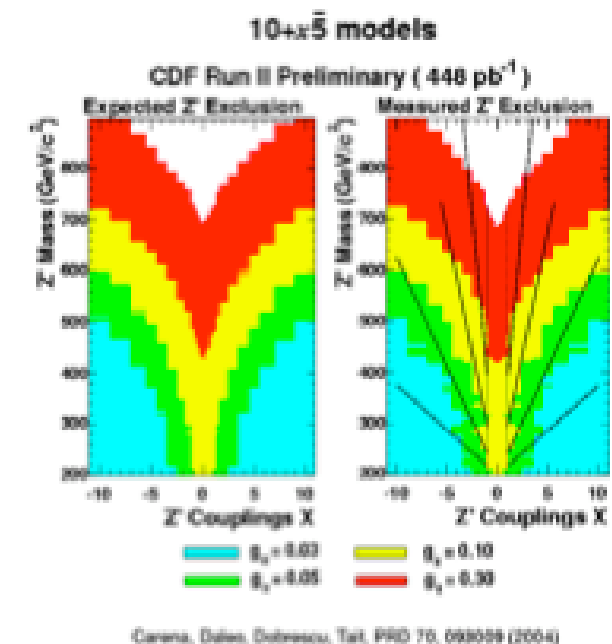
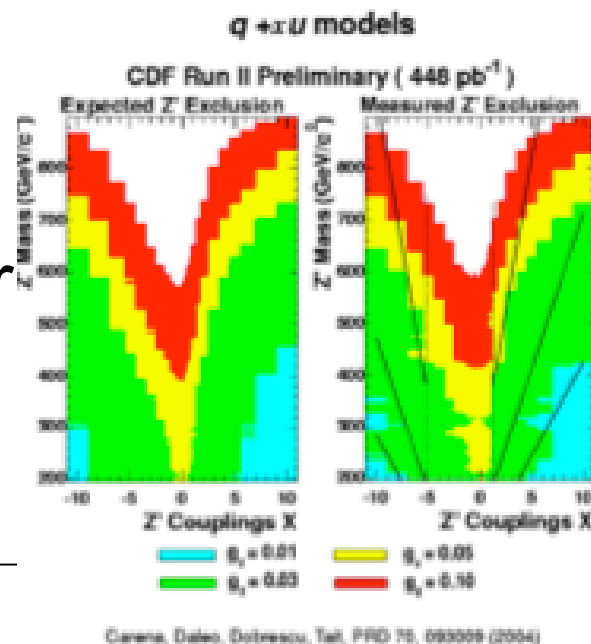
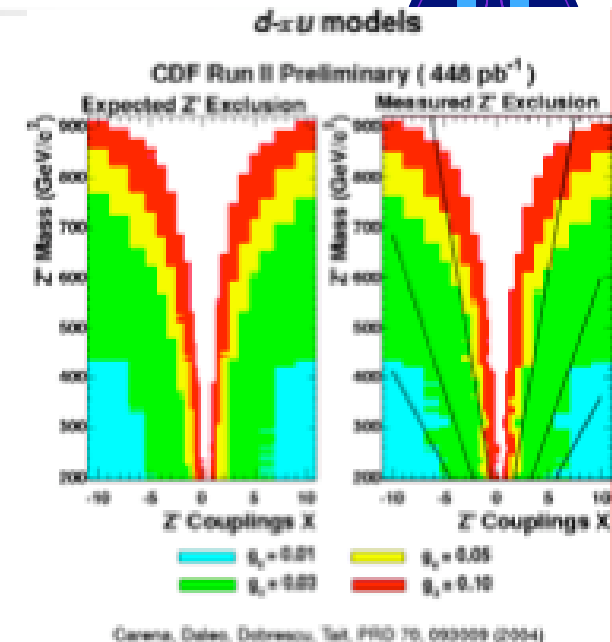
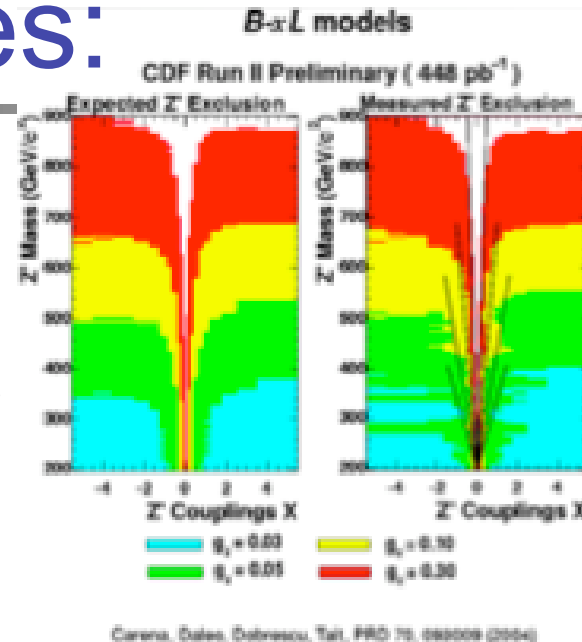
$$g_Z = 0.10$$

$$g_Z = 0.05$$

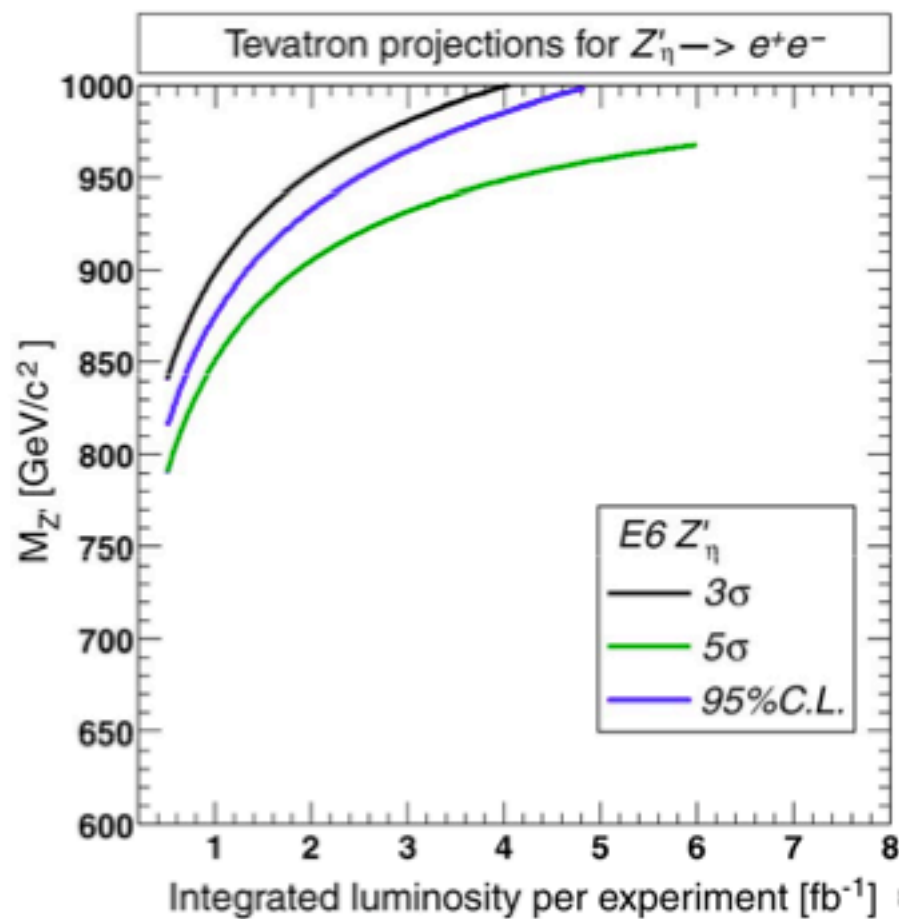
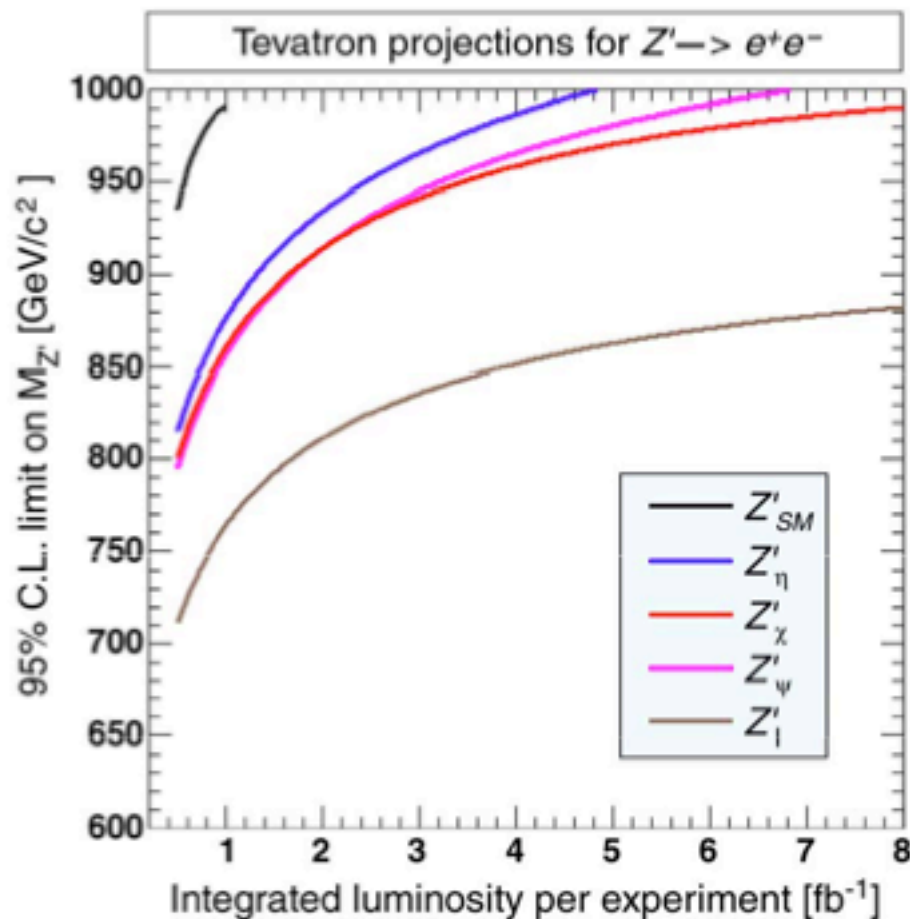
$$g_Z = 0.03$$

$$g_Z = 0.01$$

- Lignes = exclu par LEP



# Avec plus de lumi...



# Z' au LHC

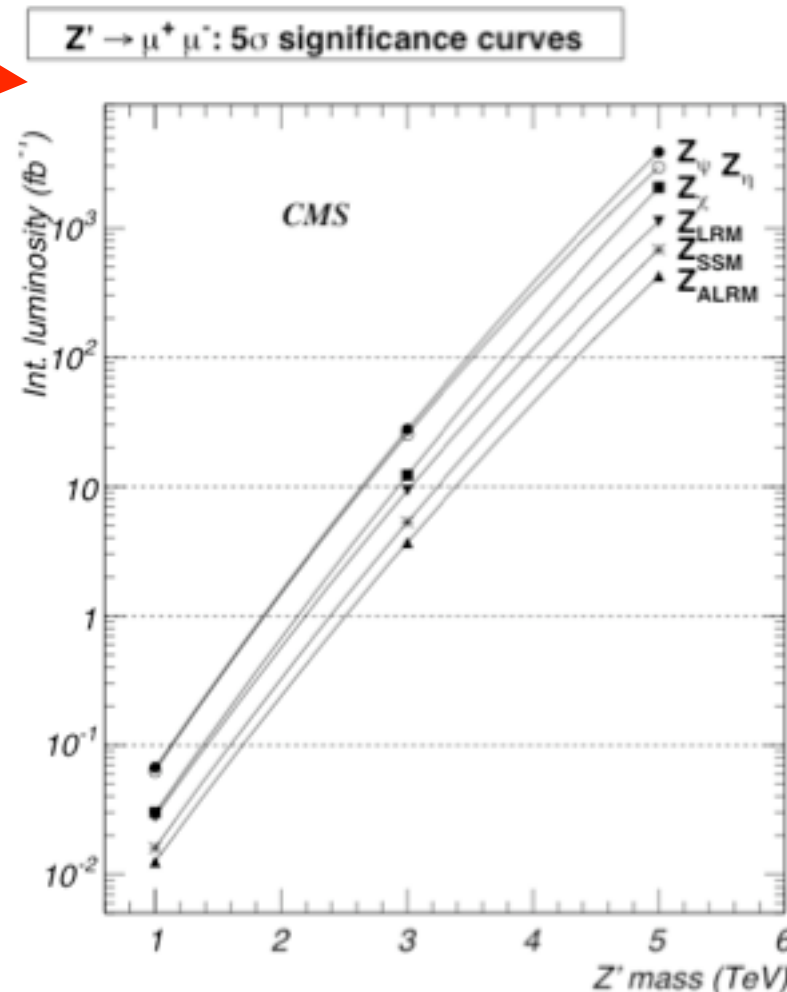


## ■ CMS $Z' \rightarrow \mu\mu$ :

- $0.1 \text{ fb}^{-1}$ ,  $> 1 \text{ TeV}/c^2$
- $10 \text{ fb}^{-1}$ ,  $2.6 - 3.4 \text{ TeV}/c^2$
- $100 \text{ fb}^{-1}$ ,  $3.4 - 4.3 \text{ TeV}/c^2$

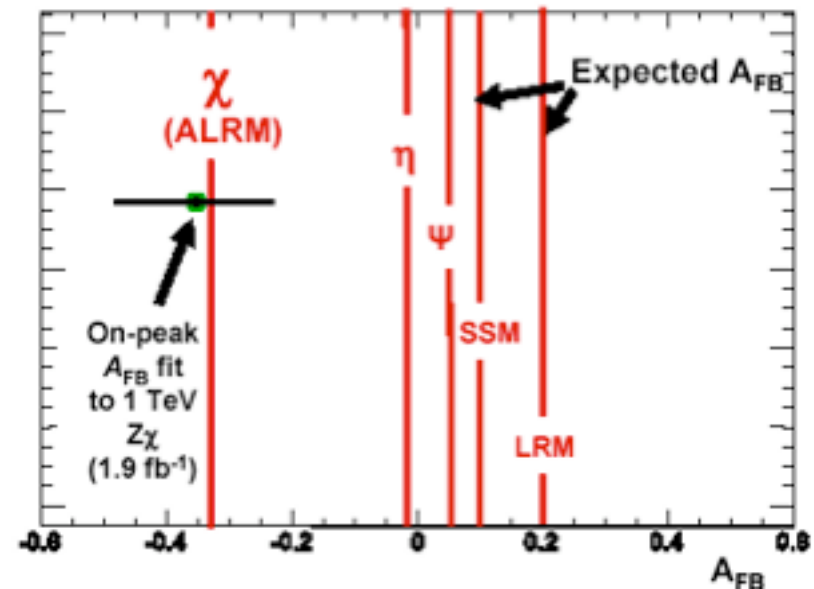
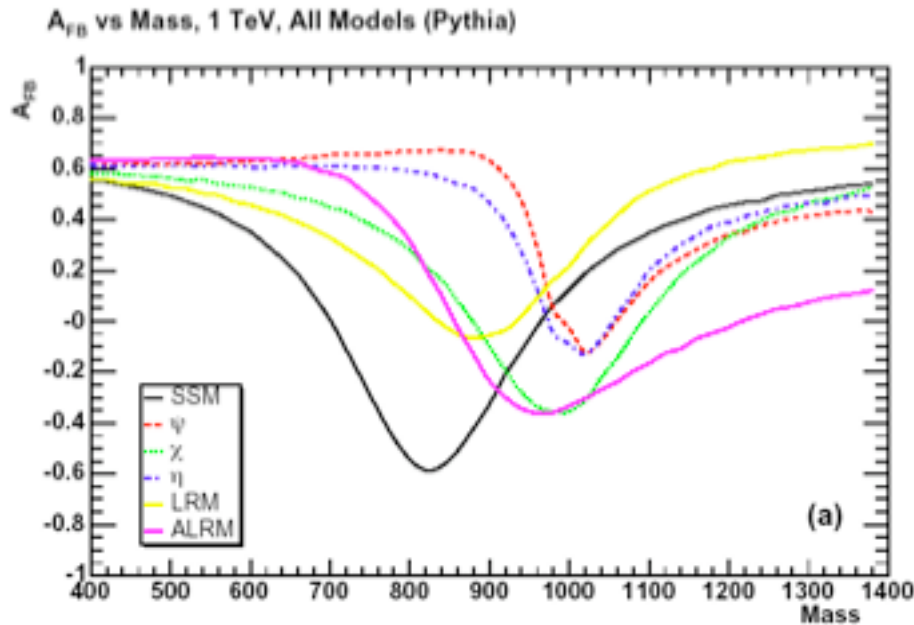
## ■ $Z' \rightarrow ee$ :

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



R. Cousins et al, CMS Note 2005/002

# asymétries



CMS: R. Cousins et al

- $400 \text{ fb}^{-1}$ ,  $Z_\psi$ ,  $Z_\eta$ ,  $Z_{SSM}$ ,  $Z_{LRM}$  peuvent être distingués entre eux jusqu'à  $M_Z \sim 1.0\text{-}1.5 \text{ TeV}/c^2$
- $Z_\chi$  et  $Z_{ALRM}$  distincts des autres jusqu'à  $2\text{-}2.7 \text{ TeV}/c^2$



# Recherche des gravitons

---

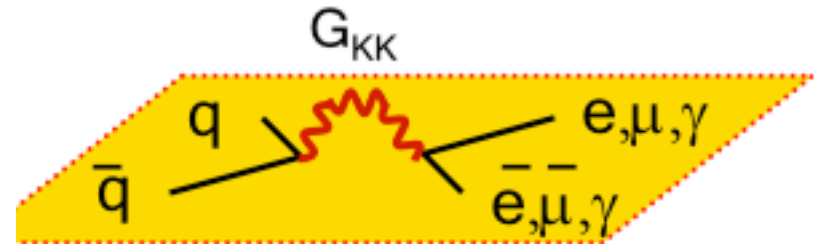


# ADD Gravitons



## ■ 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

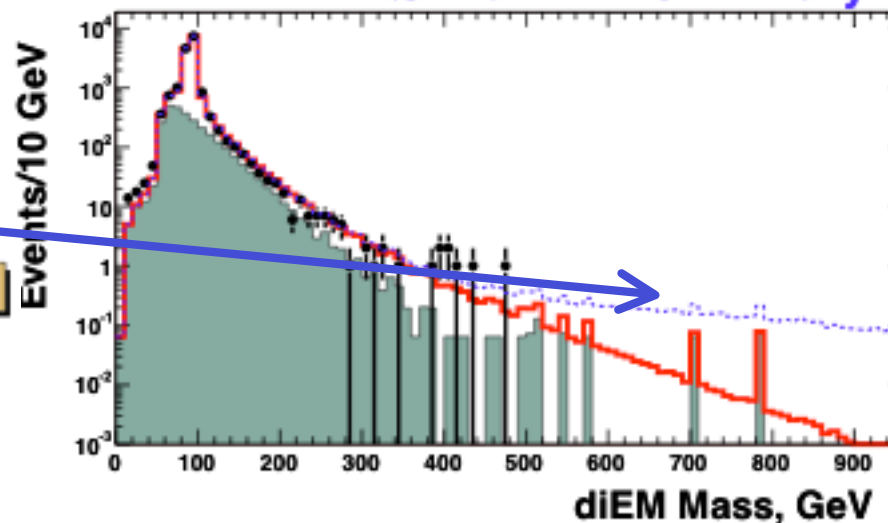


■ D0:  $ee + \gamma\gamma$

✓  $\eta = 0.6$

diEM Mass Spectrum

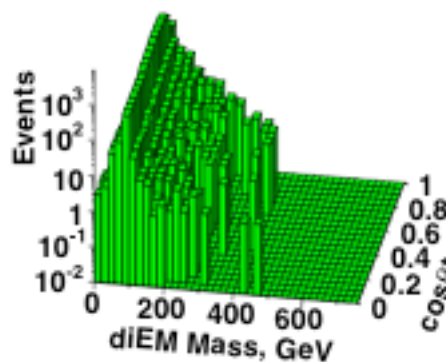
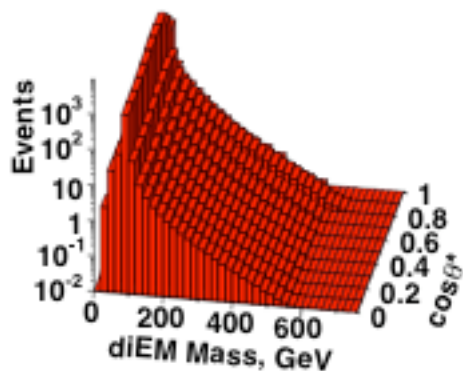
DØ Run II Preliminary



SM Prediction

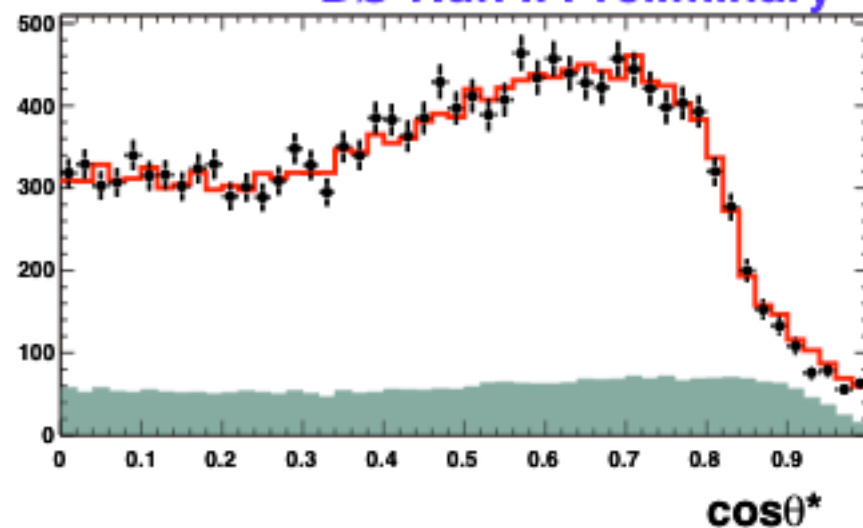
DØ Run II Preliminary

Data

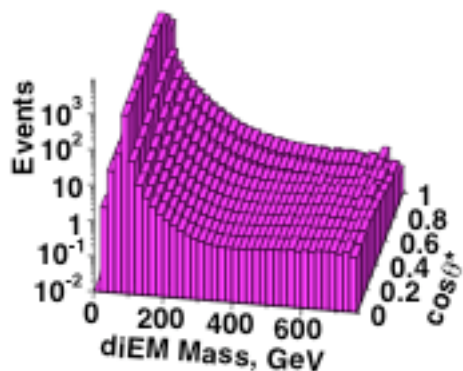


M cosθ\* Spectrum

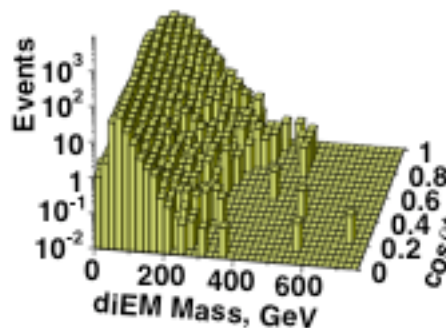
DØ Run II Preliminary



ED Signal



QCD Background



Leinweber,  
AL, 11 mai, 2006

# $M_S$ limites



## ■ Limites D0 ( $200 \text{ pb}^{-1}$ ):

| Limites à 95 % CL ( $\text{TeV}/c^2$ ) |      |      |      |      |      |      |              |              |
|--|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------|
| 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 ( $\text{TeV}/c^2$ ) |     |      |      |      |      |      |              |              |
|--|-----|------|------|------|------|------|--------------|--------------|
| 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

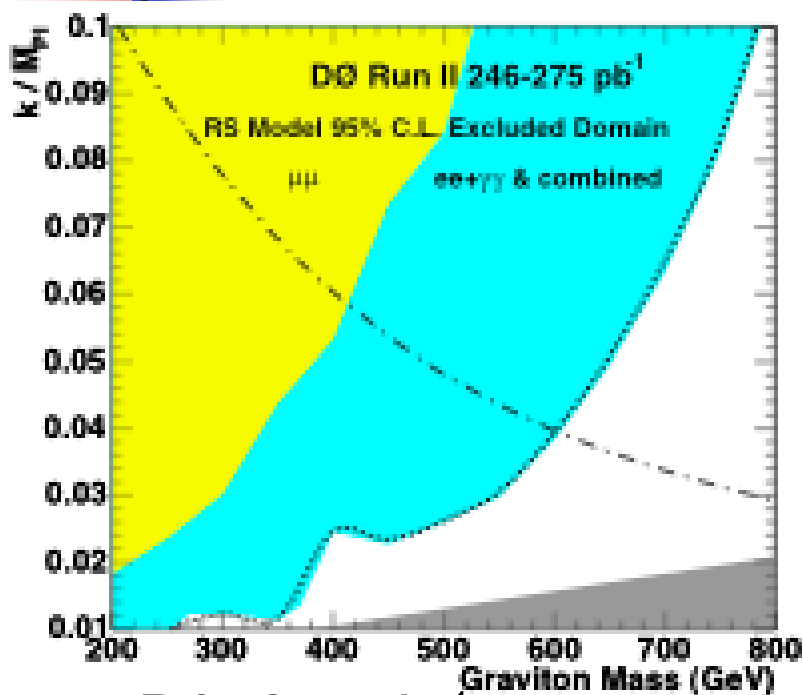


| Expérience                | Luminosité<br>(pb <sup>-1</sup> ) | Limite(TeV)<br>$\lambda = +1 \quad \lambda = -1$ |
|---------------------------|-----------------------------------|--|
| LEP ee                    | 1900                              | 1.20 1.09  |
| D0(I)ee $\gamma\gamma$    | 127                               | 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 <sup>-1</sup> )               | 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

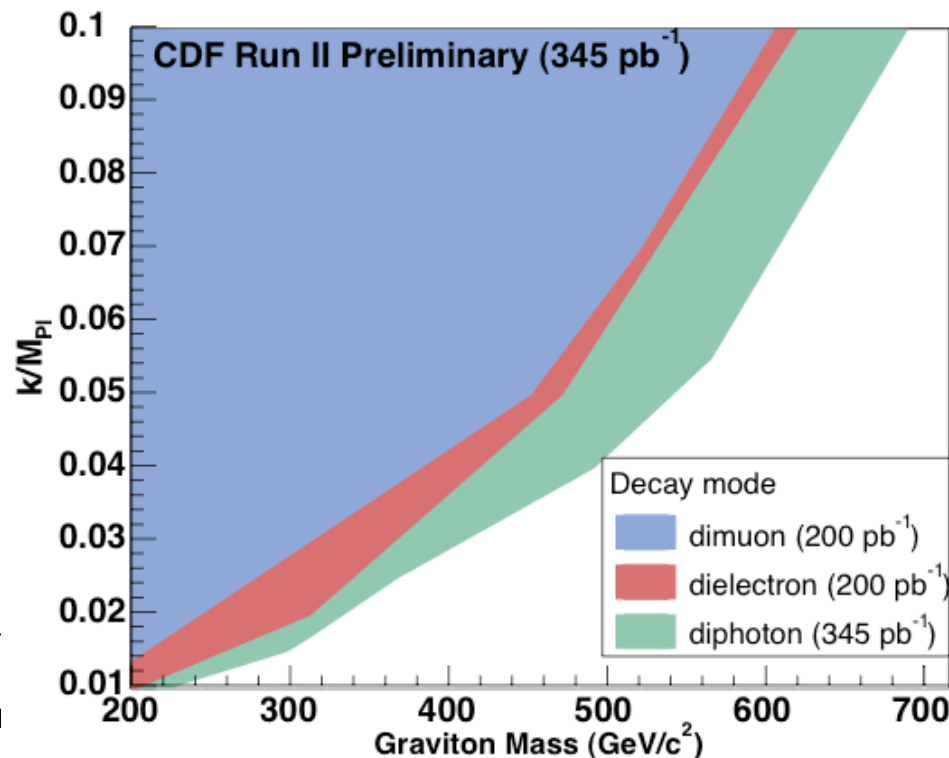


D0, 275pb<sup>-1</sup>, ee+γγ

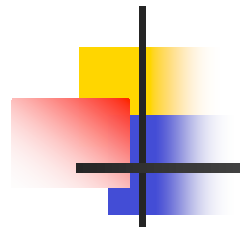
$k$  = courbure

CDF, 345pb<sup>-1</sup>, ee, μμ, γ γ

RS Graviton Searches, 95% C.L. Exclusion Regions



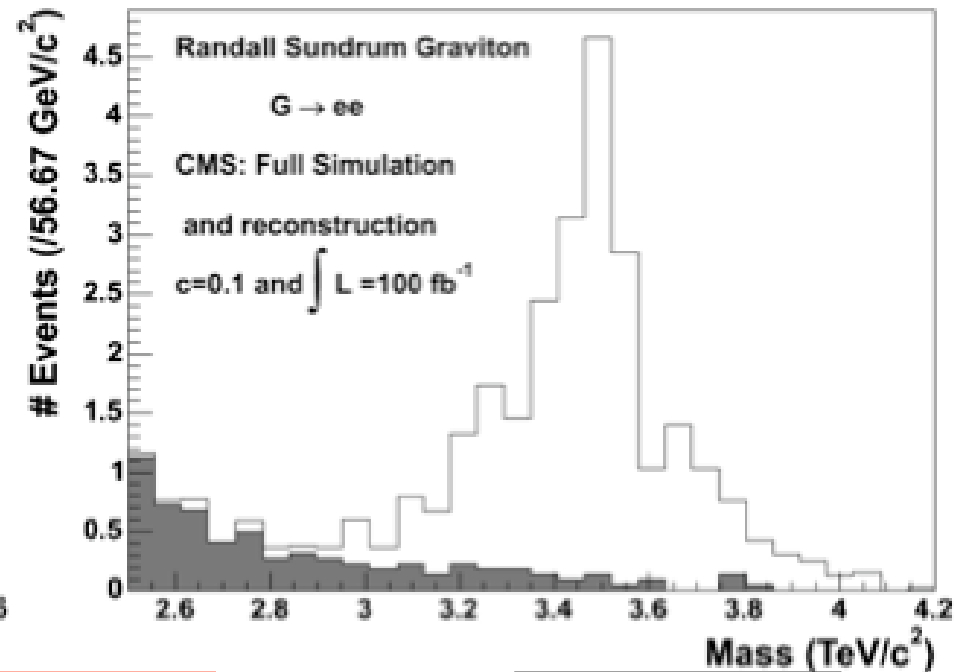
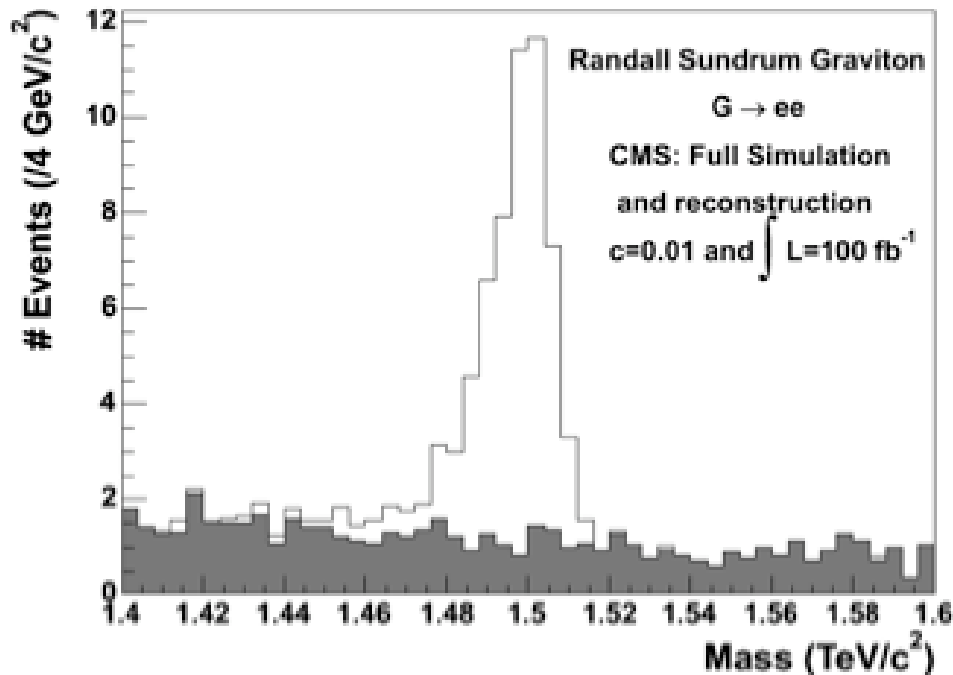
Sém



# RS graviton au LHC



## ■ Canal di-electron dans CMS:



### Avec 30 fb<sup>-1</sup>:

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

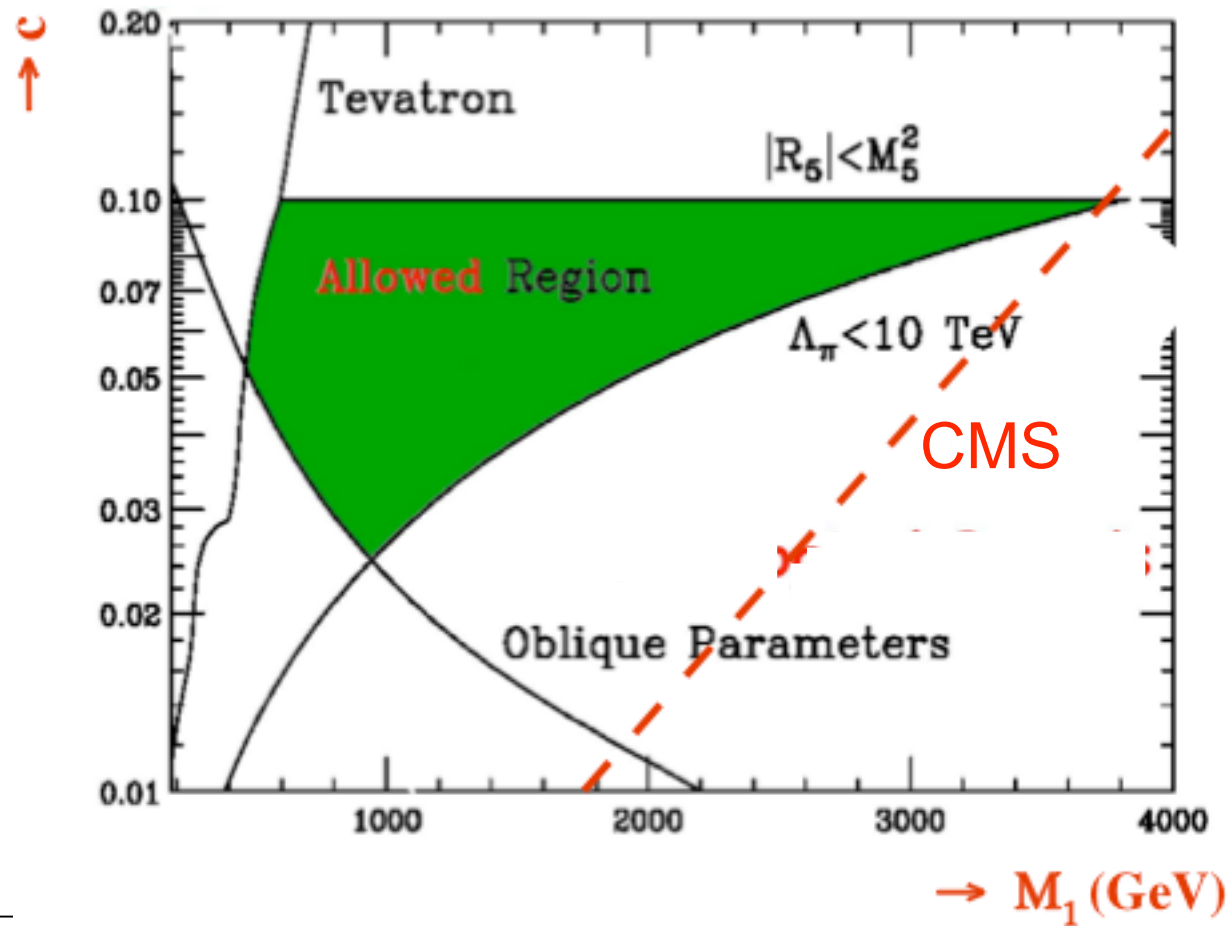
$$c = k/M_{\text{Pl}}$$

C. Collard

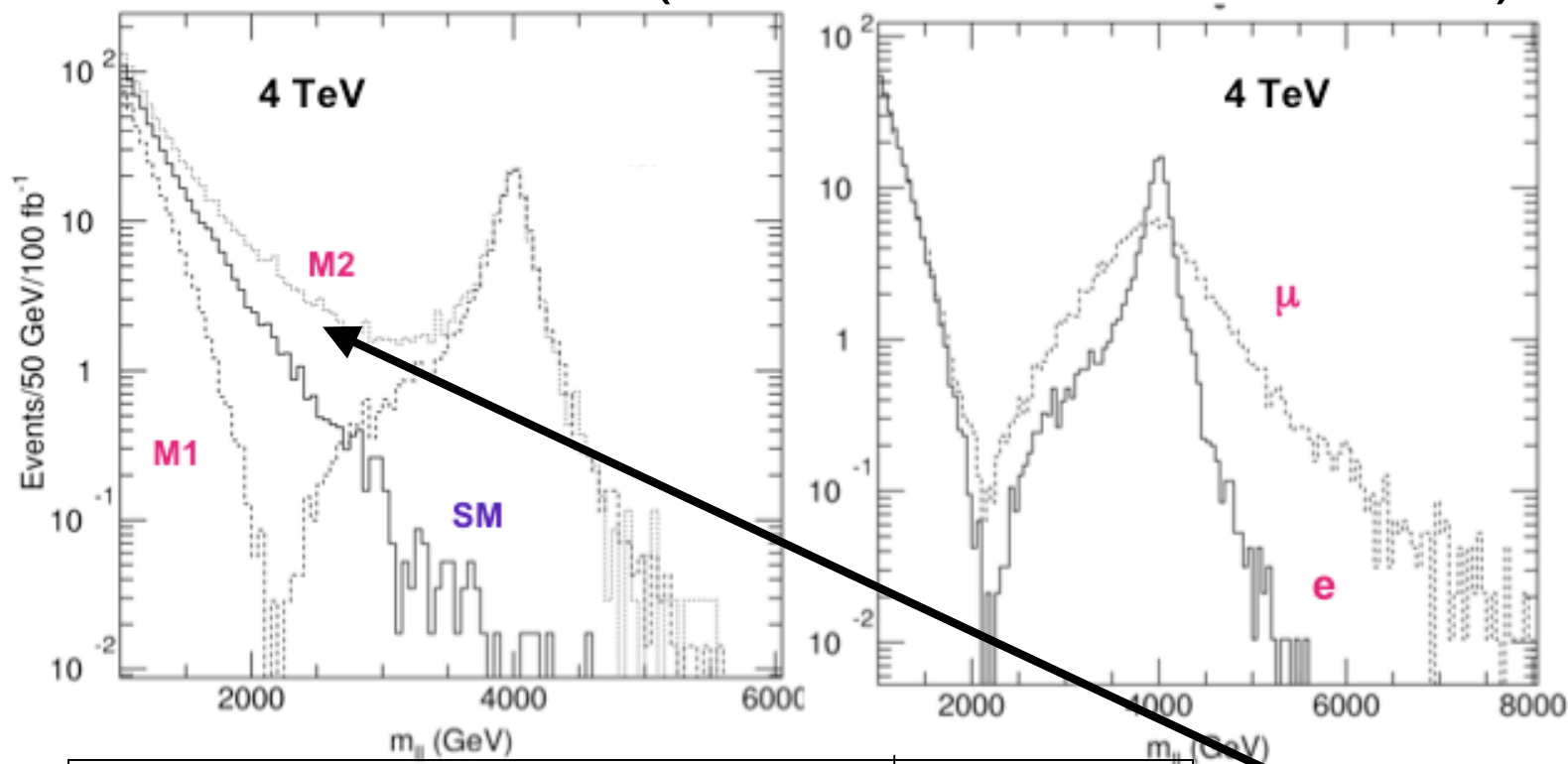
# RS graviton à CMS



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



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



| électrons            |                      |                      | e+ $\mu$             |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 100 fb <sup>-1</sup> | 200 fb <sup>-1</sup> | 300 fb <sup>-1</sup> | 300 fb <sup>-1</sup> |
| 9.5 TeV              | 11 TeV               | 12 TeV               | 13.5 TeV             |

(interférences)



# 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

---





# ADD @ ILC

---



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

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