

# Une brève histoire du Top :

Production et propriétés  
du quark top à DØ.

**Benoit Clément**

Institut de Recherches Subatomiques, Strasbourg

# Au menu

- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ Le quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Au menu

- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ Le quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Une troisième famille ?

1974 : Deux familles de leptons et de quarks:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

1975-77 :

- Expérience Mark I : découverte du lepton  $\tau$  (cinématique de désintégration :  $\nu_\tau$  ?)

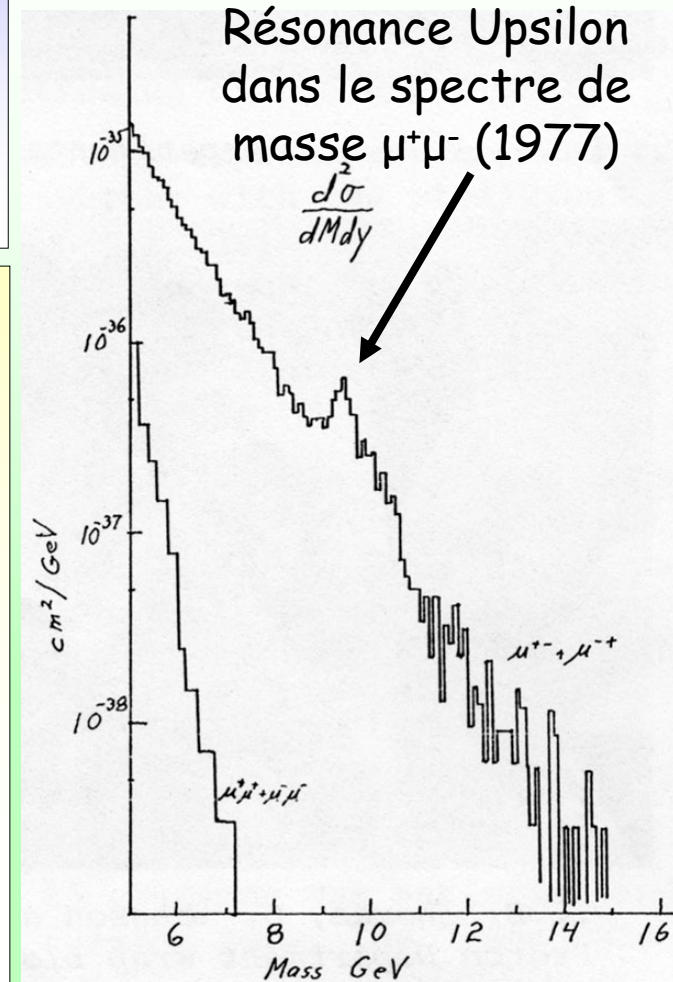
- Découverte de la résonance Upsilon à Fermilab : nouveau quark b.

Ce quark fait-il partie d'un doublet d'isospin?

1984 : DESY asymétrie FB pour  $ee \rightarrow b\bar{b}$  :

$$A_{fb} = 22.5 \pm 6.5\%$$

(SM isodoublet : 25.2%; isosinglet : 0%)



Partenaire du quark b : **top**.  
masse s/c/b : 0.5/1.5/4.5  $\rightarrow m_{top} \sim 15 GeV/c^2$  ???

# A la recherche du top

$e^+e^-$  : Résonances «toponium» :

PETRA ( $m_{\text{top}} > 23 \text{ GeV}/c^2$ )

TRISTAN ( $m_{\text{top}} > 30 \text{ GeV}/c^2$ )

$Z \rightarrow t\bar{t}$  : LEP/SLC ( $m_{\text{top}} > 45 \text{ GeV}/c^2$ )

$p\bar{p}$  : UA1 recherche  $W \rightarrow t\bar{b} \rightarrow l\nu b\bar{b}$

2 ou 3 jets, 1 lepton de grand  $p_T$ .

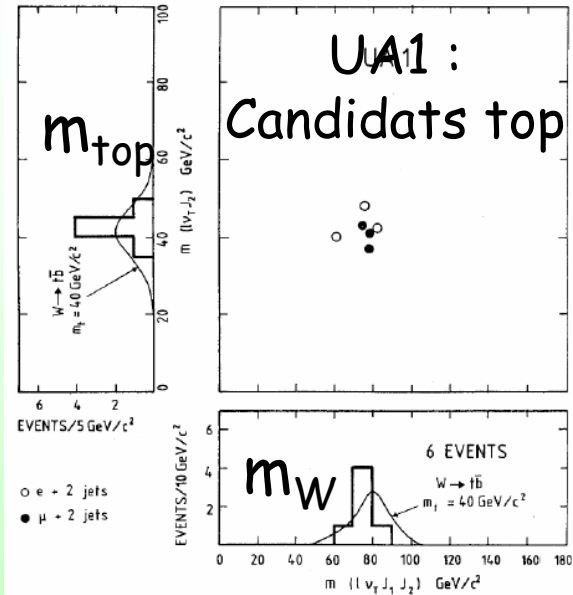
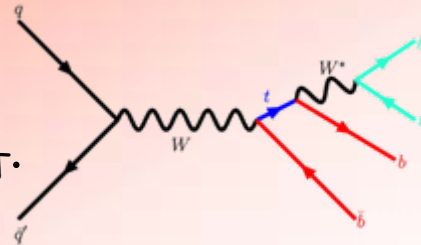
**1984** ( $\sim 100 \text{ nb}^{-1}$ ):

9 événements compatibles avec  $m_{\text{top}} = 40 \text{ GeV}/c^2$ .

0.2 événements de fond attendus.

Mais bruit de fond  $W$ +jets sous-estimé !

**1988** ( $\sim 600 \text{ nb}^{-1}$ ): limite  $m_{\text{top}} > 44 \text{ GeV}/c^2$ .

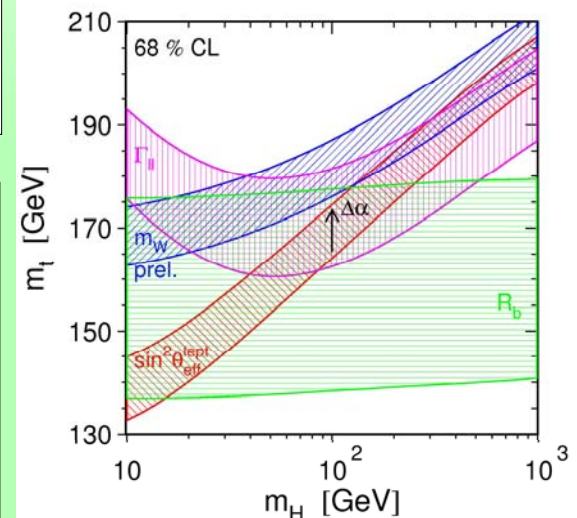


Mesures de précision à LEP 1.

Certains paramètres EW sont sensibles à  $m_{\text{top}}$ :

- Corrections radiatives à la masse du Z ( $\sim m_{\text{top}}^2$ )
- Vertex Zbb ( $R_b = Z \rightarrow bb / Z \rightarrow \text{hadrons}$ )

$m_{\text{top}} \sim 170 \text{ GeV}/c^2$



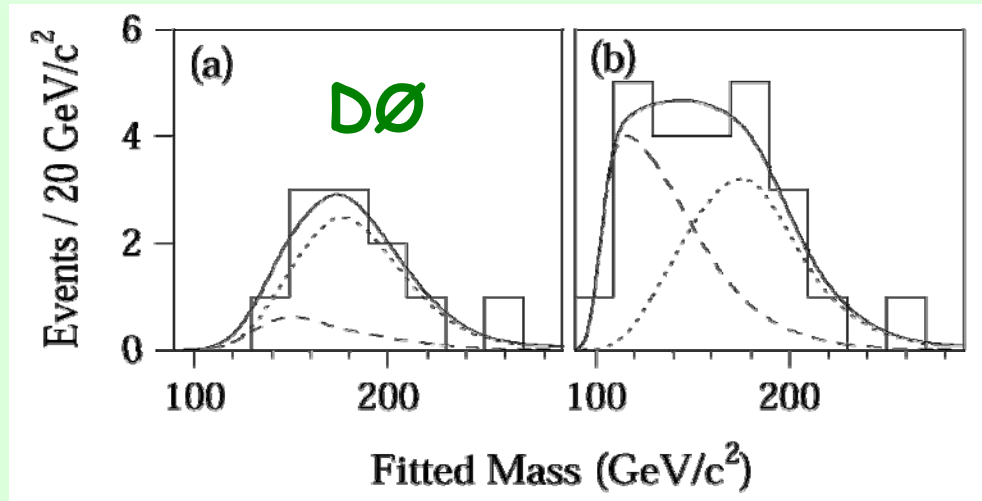
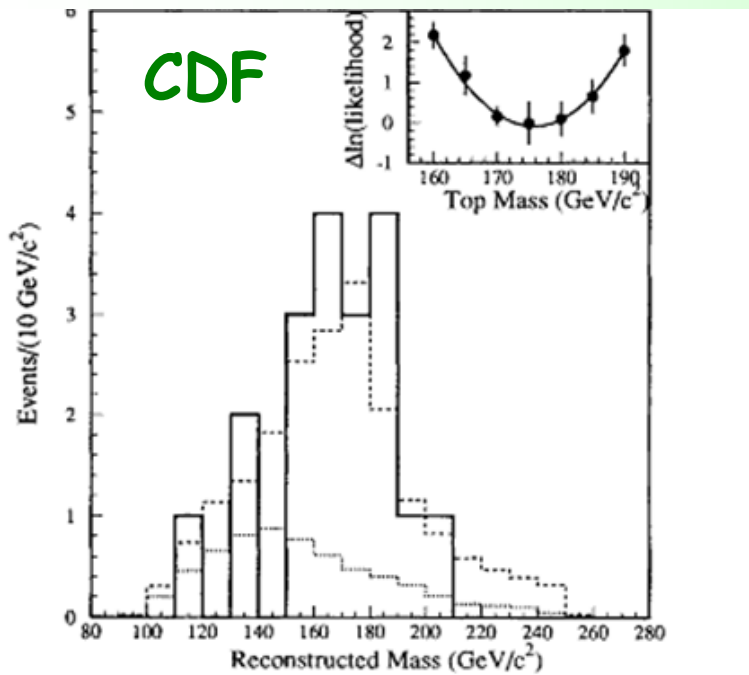


# Découverte du quark top

Le top est plus lourd que le W :

- faible section efficace de production
- Difficile de séparer le signal de W+jets

Tevatron RunI (92-95) :  $p\bar{p}$  1.8 TeV, CDF+DØ,  $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b}$   
Découverte en 1995



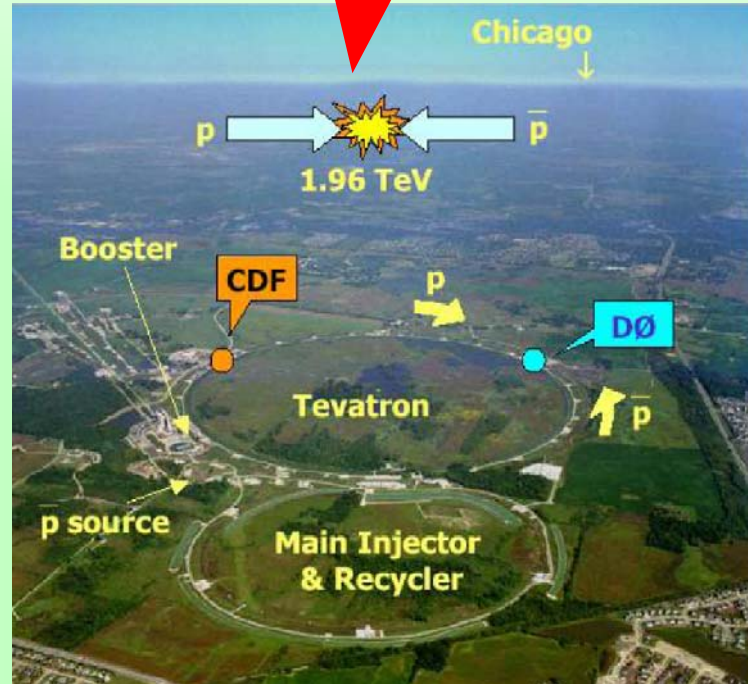
DØ :  $m_{\text{top}} = 199 \pm 20 \text{ GeV}/c^2$   
CDF :  $m_{\text{top}} = 176 \pm 10 \pm 6 \text{ GeV}/c^2$

# Au menu

- ① Historique de la découverte du top
- ② **Le Tevatron et l'expérience DØ**
- ③ Le quark top au Tevatron
- ④ Production par paires
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Le complexe d'accélération

	Run I	Run IIa	Run IIb
Paquets / tour	6 × 6	36 × 36	36 × 36
$\sqrt{s}$ (TeV)	1.8	1.96	1.96
Luminosité ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$1.6 \times 10^{30}$	$1 \times 10^{32}$	$3 \times 10^{32}$
$\int \text{Ldt}$ ( $\text{pb}^{-1}/\text{semaine}$ )	3	17	50
Temps de croisement (ns)	3500	396	396
Interactions/croisement	2.5	2.3	8
Periode	92/98	01/06	06/09



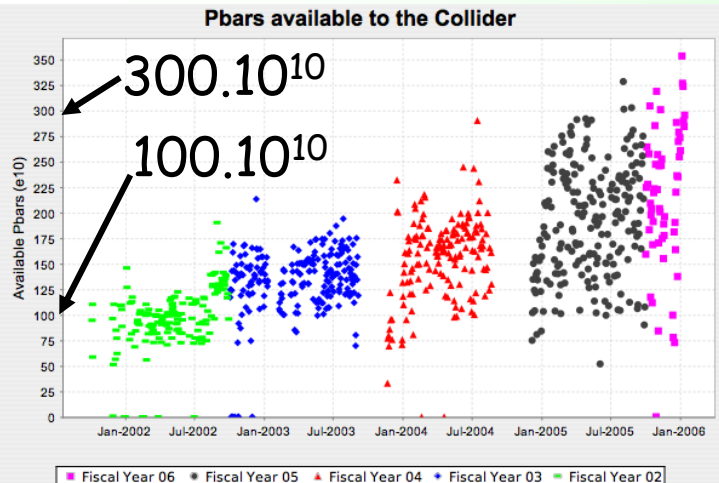
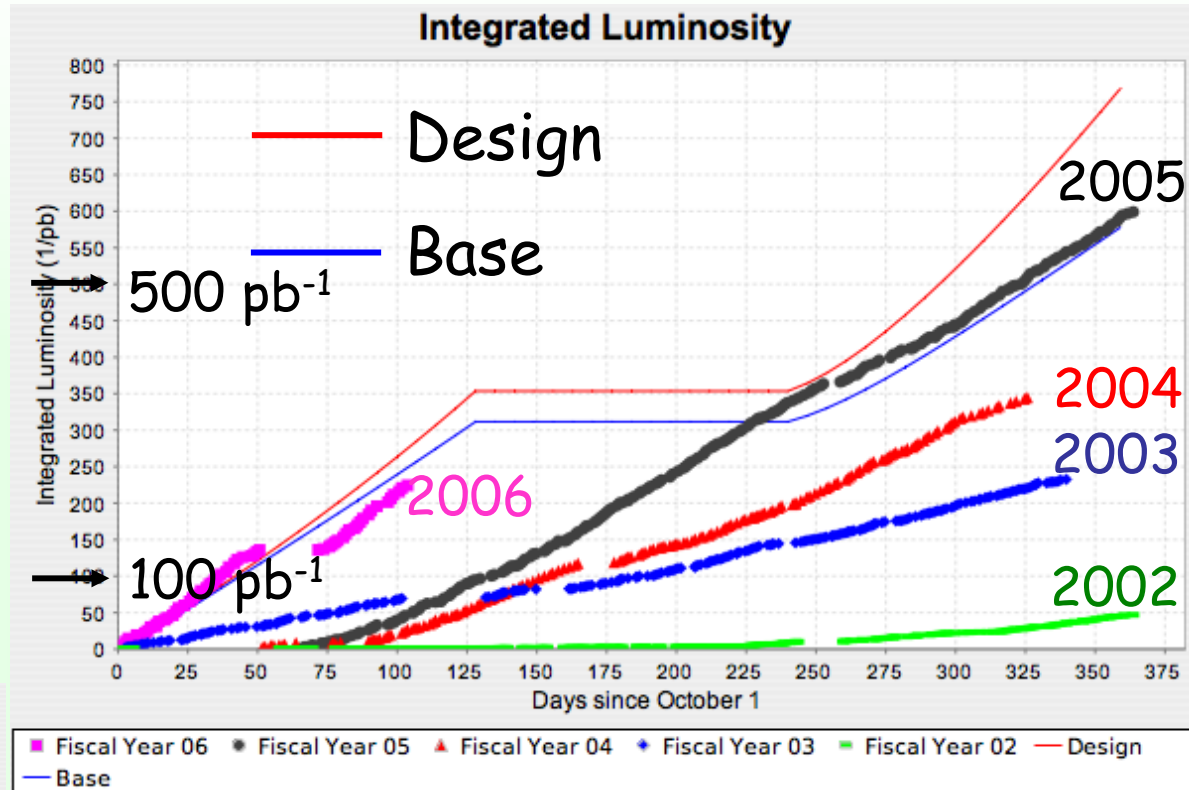
amélioration de la production d'antiprotons:  
 recycleur d'antiprotons (automne 2004)  
 electron cooling (été 2005)



# Luminosité

depuis avril 2002:  
 $\sim 1.4 \text{ fb}^{-1}$  délivrés  
 $\sim 1.15 \text{ fb}^{-1}$  enregistrés

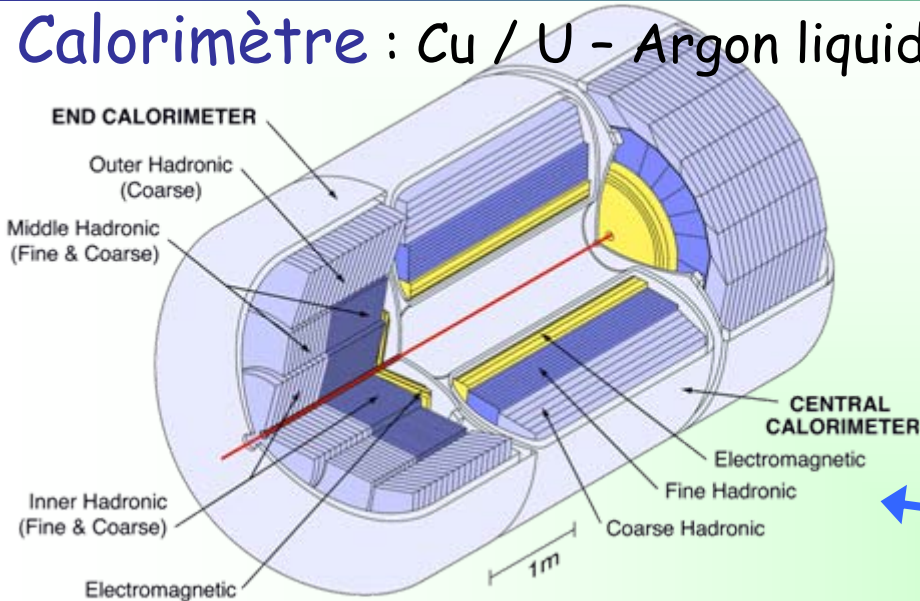
Efficacité :  $\sim 83\%$



$\leftarrow$  Nombre d'anti-protons disponibles

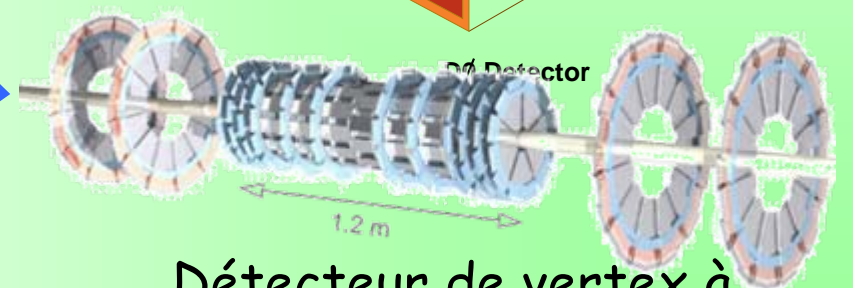
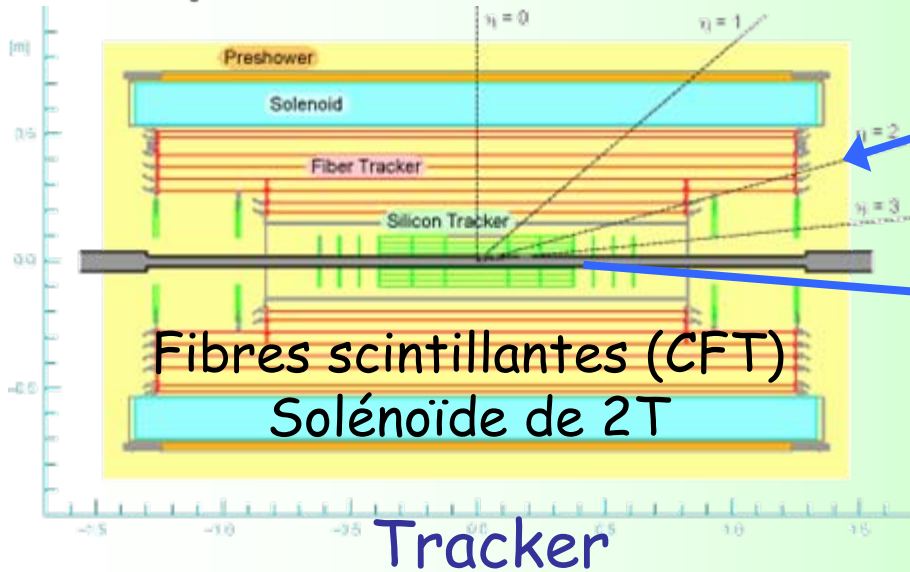
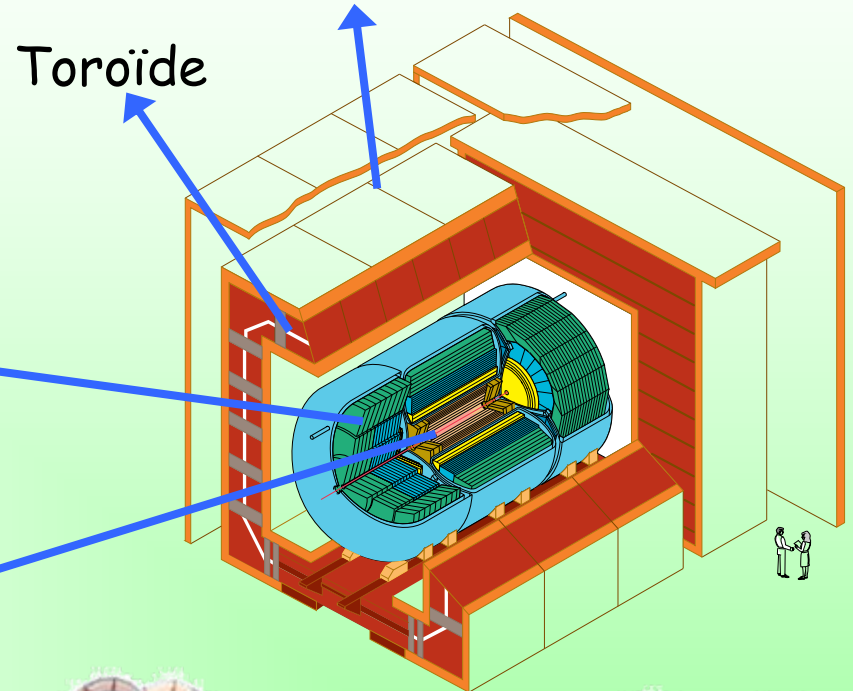
# Détecteur DØ

Calorimètre : Cu / U - Argon liquide



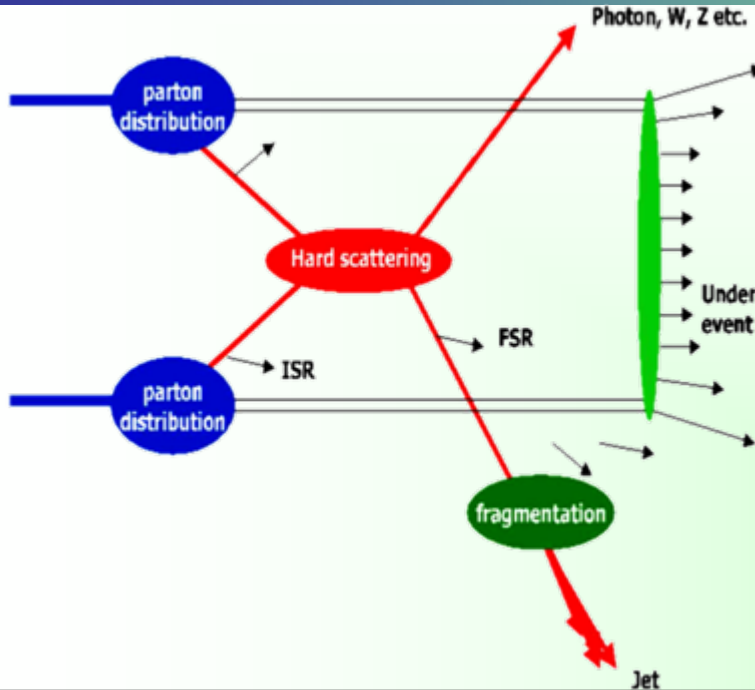
Détecteur de muons :  
Chambres à dérives et scintillateurs

Toroïde



Détecteur de vertex à  
micropistes de silicium (SMT)

# De la collision au détecteur



**Collision  $p\bar{p}$**  : seul des sous-structures du proton (partons) interagissent:

- Quark de valence (u,d)
- Quark de la mer (u,d,s,c,b,t)
- Gluons

**ISR, FSR** : radiation de gluon/photon

**Fragmentation** : Quarks et gluons s'habillent en hadron.

## Détecteur :

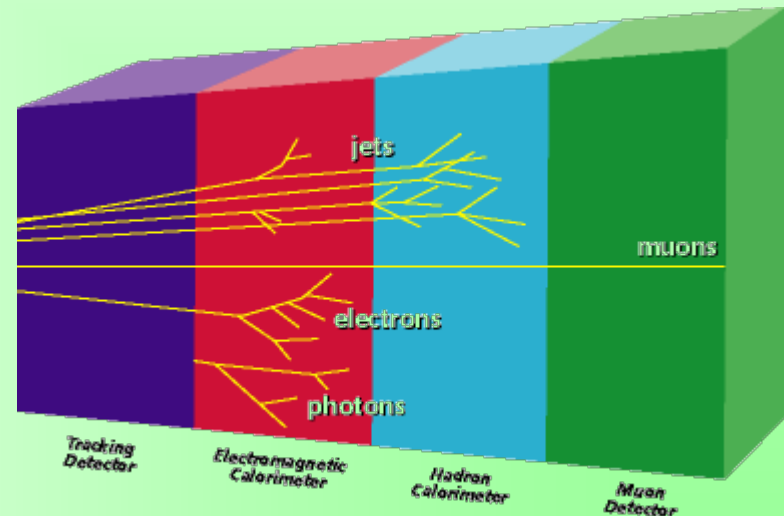
**Tracker** : Particules chargées

**Calorimètre EM** : électrons, photons, jets

**Calorimètre HAD** : jets

**Système à muons** : muons

Les neutrinos sortent du détecteur :  
énergie manquante

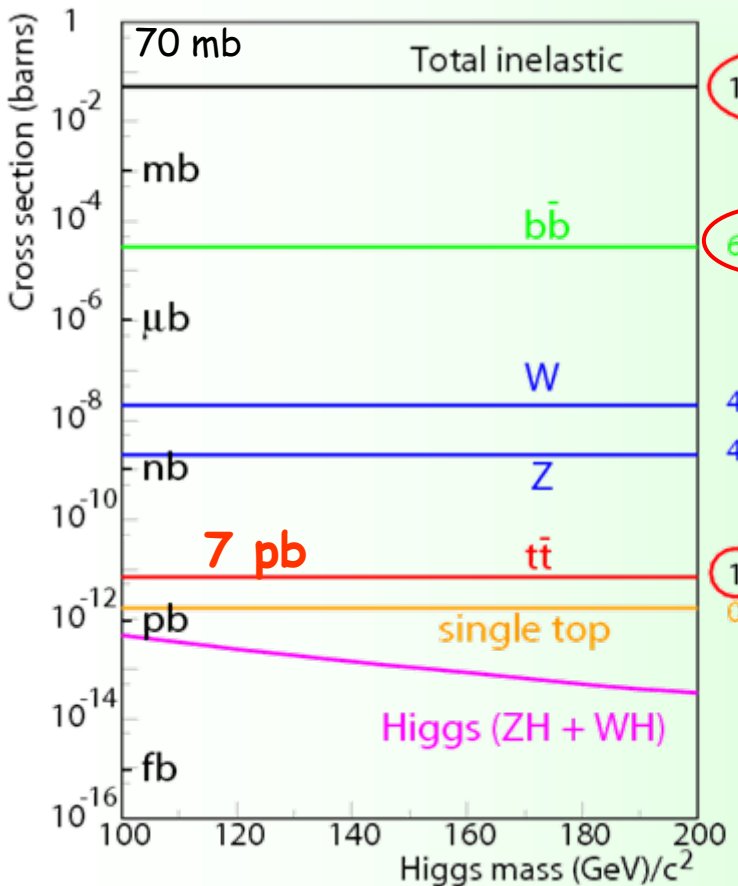


# Quelques sections efficaces

$$\sigma_{p\bar{p} \rightarrow X} = \sum_{\text{partons } i, j} \int_0^1 \int_0^1 f_i^p(x_1) f_j^{\bar{p}}(x_2) \hat{\sigma}_{ij \rightarrow X} dx_1 dx_2$$

Distribution de partons

Sections efficaces partoniques (pQCD)



$1 \times 10^{10}$

$6 \times 10^6$

1  
0.3

$\sim 7 \cdot 10^6$  événements / seconde

$\sim 20 \cdot 10^6$   $b\bar{b}$  / heure

$\sim 3$   $t\bar{t}$  / heure

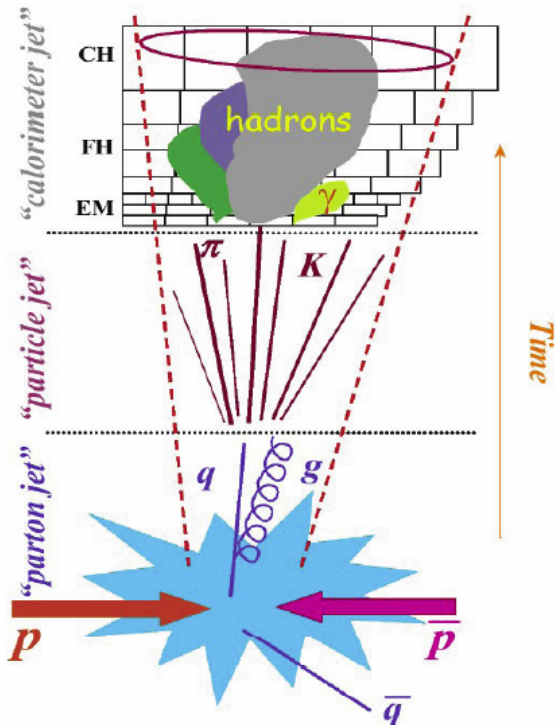
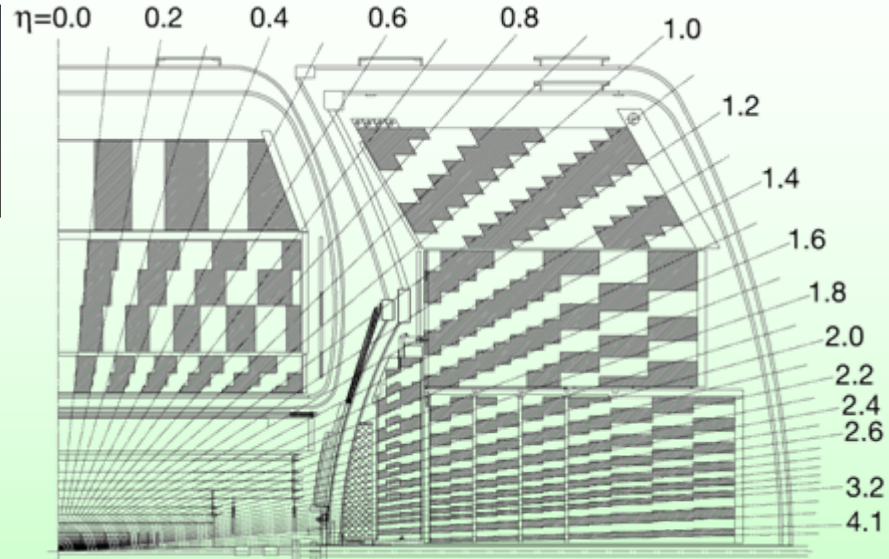
Pour  $L=10^{32}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



# Reconstruction des jets

Calorimètre organisé en tours pseudo-projectives :  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$   
Couverture :  $|\eta| < 4.2$

Jets reconstruit à partir des tours du calorimètre avec un **algorithme de cône** :  $R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} = 0.5$



Echelle d'énergie des jets (JES)  
Jet calorimétrique  $\rightarrow$  jet de particules

$$E_{\text{jet}}^{\text{particules}} = \frac{E_{\text{jet}}^{\text{mesuré}} - E_{\text{offset}}}{R_{\text{jet}} \times S_{\text{cone}}}$$

$E_{\text{offset}}$  : Energie ne provenant pas du vertex d'interaction (bruit uranium, *underlying event*).

$R_{\text{jet}}$  : réponse du calorimètre.

$S_{\text{cone}}$  : Energie en dehors du cône.



# Identification des jets b

Important pour étudier le **top**, mais aussi le **Higgs** ( $H \rightarrow b\bar{b}$ )  
où la **SUSY** (sbottom, stop)

## Caractéristiques des hadrons beaux

Désintégration par interaction faible,  
grande durée de vie ( $\sim 10^{-12}$ s)

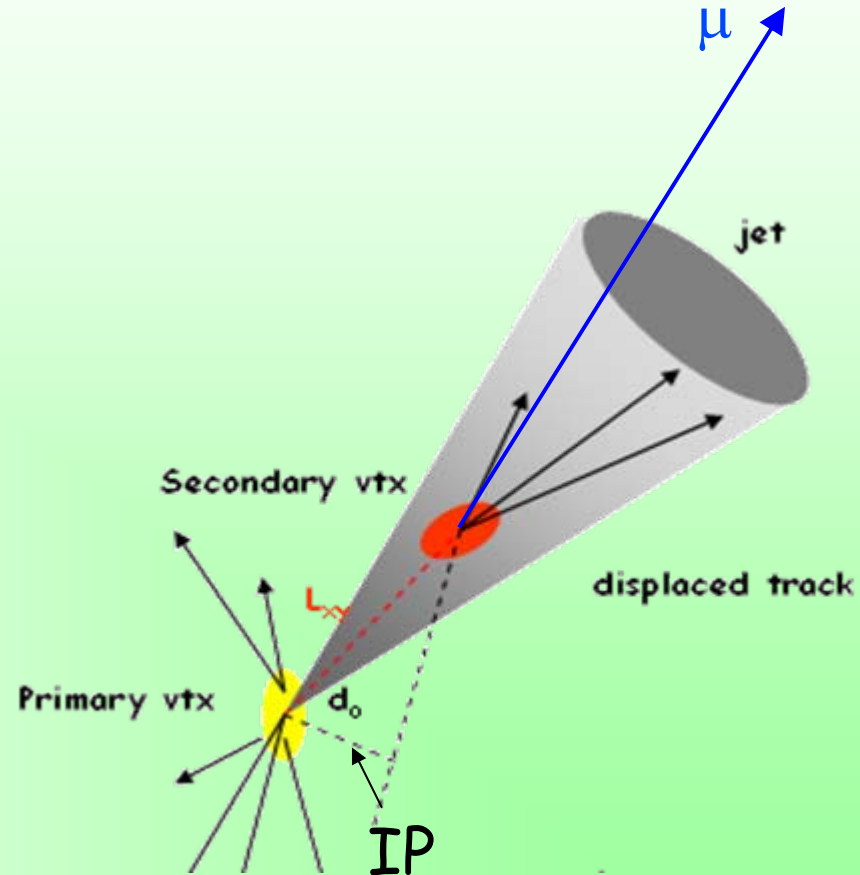
- Traces à grand paramètre d'impact (IP)  $\rightarrow$  **JLIP**
- Vertex secondaire (distance de vol  $\sim$  qq mm)  $\rightarrow$  **SVX**

Masse élevée ( $\sim 4.5 \text{ GeV}/c^2$ ) :

- Masse du vertex secondaire élevée.
- Fragmentation plus dure.

Taux de désintégration semi-leptonique important ( $\sim 20\%$ ) :

- Muons ou électrons dans les jets.  
 $\rightarrow$  **SLT**



# Identification des jets b

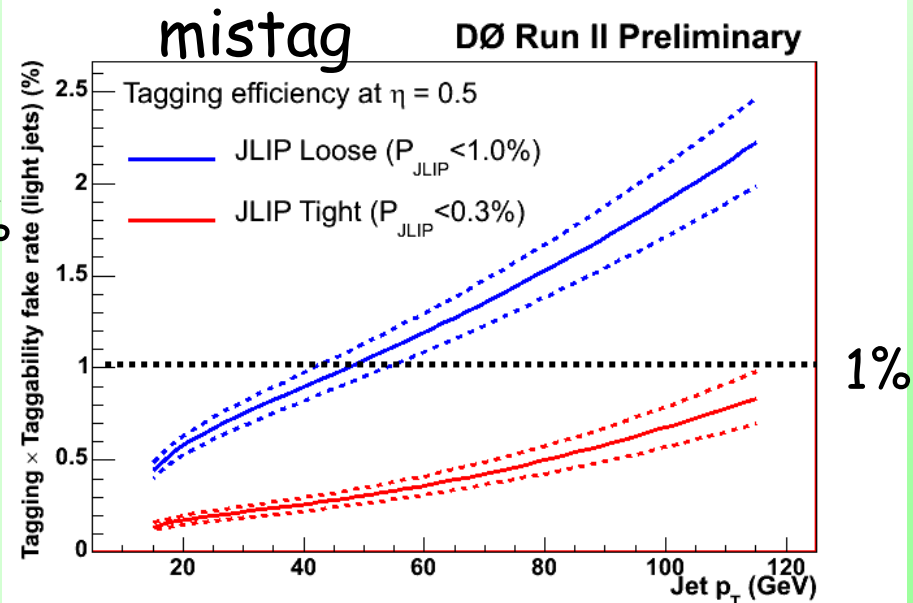
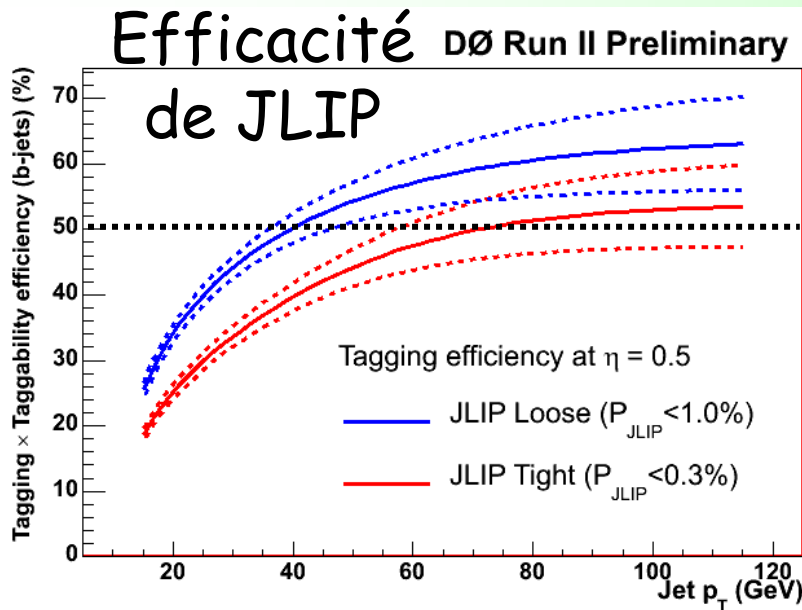
Trois algorithmes à DØ :

**SLT** : *Soft Lepton Tagger*, muon/électron dans les jets.

**SVX** : Reconstruction de vertex secondaire.

**JLIP** : *Jet Life Time Probability*, utilise l'IP des traces pour calculer la probabilité qu'un jet provienne du vertex primaire.

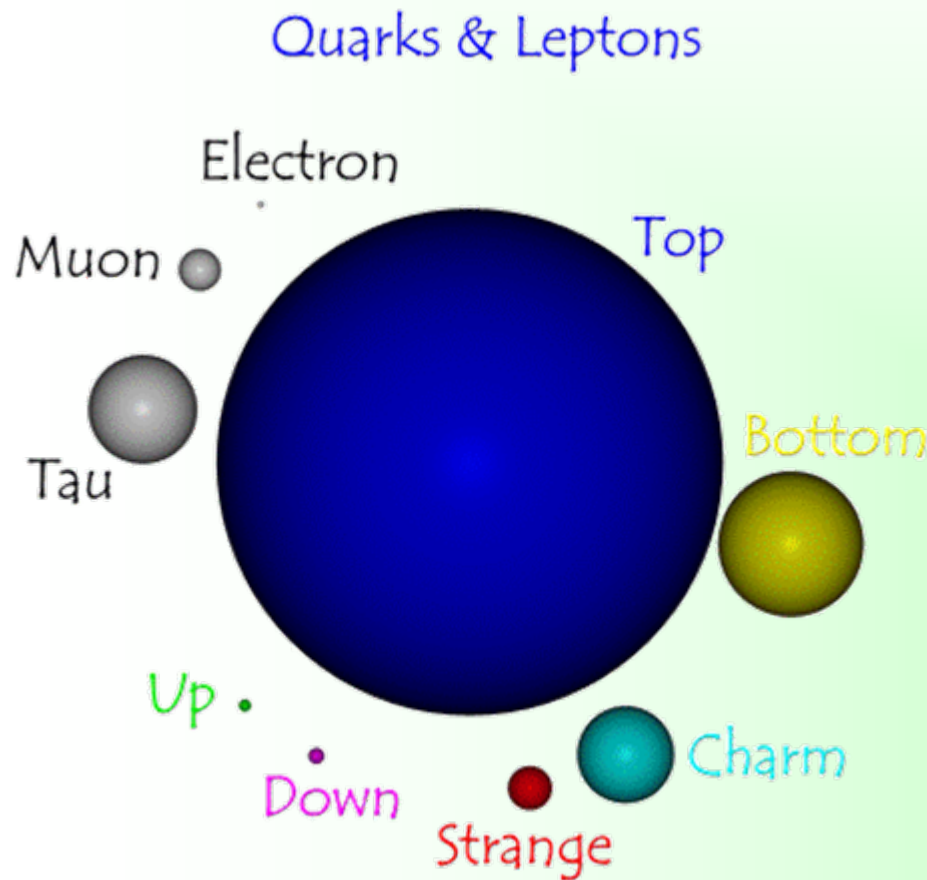
Efficacité et mistag sont évalués dans les données.



# Au menu

- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ Le quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Que sait-on du quark top ?



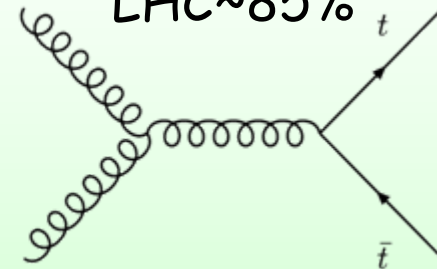
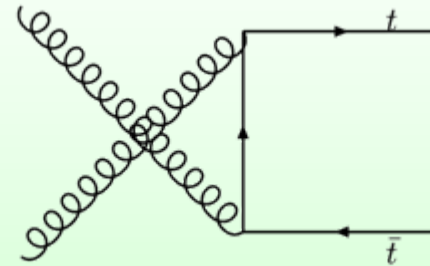
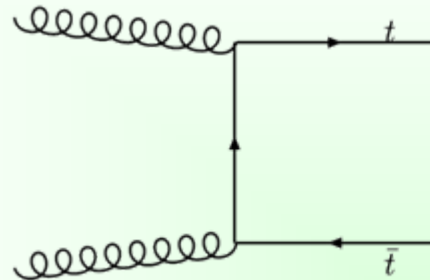
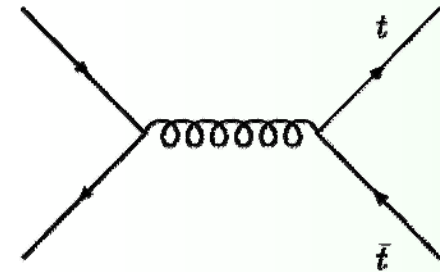
- Quark :
  - > participe à toutes les interactions (EW, forte)
- Désintégration :  $t \rightarrow Wb \sim 100\%$ 
  - > Couplage  $Wtb$ , CKM ( $|V_{tb}|$ )
- Particule la plus massive connue :
  - $m_{\text{top}} = 172.7 \pm 2.9 \text{ GeV}/c^2$
  - Couplage de Yukawa  $\sim 1$  : Permet d'explorer la physique à l'échelle d'énergie électrofaible
    - > physique au-delà du Modèle Standard ?
  - Pas d'hadronisation :
    - $\tau_{\text{top}} \sim 10^{-24} \text{ s} < \Gamma_{\text{QCD}} \sim 10^{-23} \text{ s}$
    - Pas d'états liés.
    - Spin et impulsion transmis au produits de décroissance.
    - > Hélicité du W, corrélations de spin.

# Production du top avec un collisionneur hadronique

Fusion de quarks  
Tevatron ~ 85%  
LHC ~ 15%

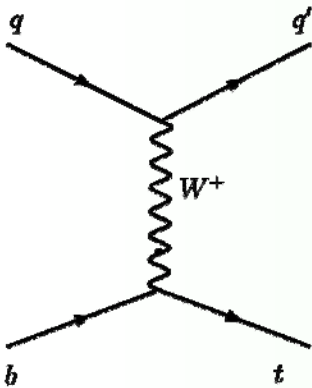
Production par paire (interaction forte)

Fusion de gluons  
Tevatron ~ 15%  
LHC ~ 85%

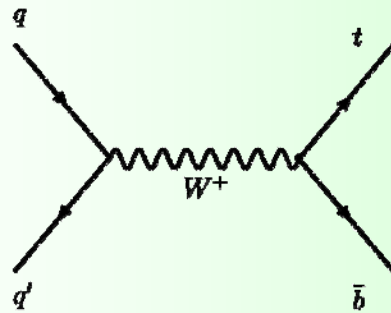


Single top (interaction électrofaible)

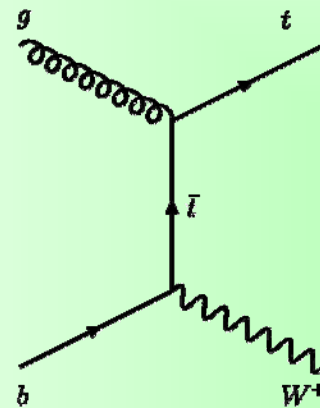
Sections efficaces (pb)



(a)  
voie t



(b)  
voie s



(c)  
Production associée

		Tevatron p $\bar{p}$ 2 TeV	LHC pp 14 TeV	
			t	$\bar{t}$
QCD t $\bar{t}$		6.77	825	
E W	t	1.88	156	91
	s	0.98	6.6	4.1
	tW	0.09	34	34



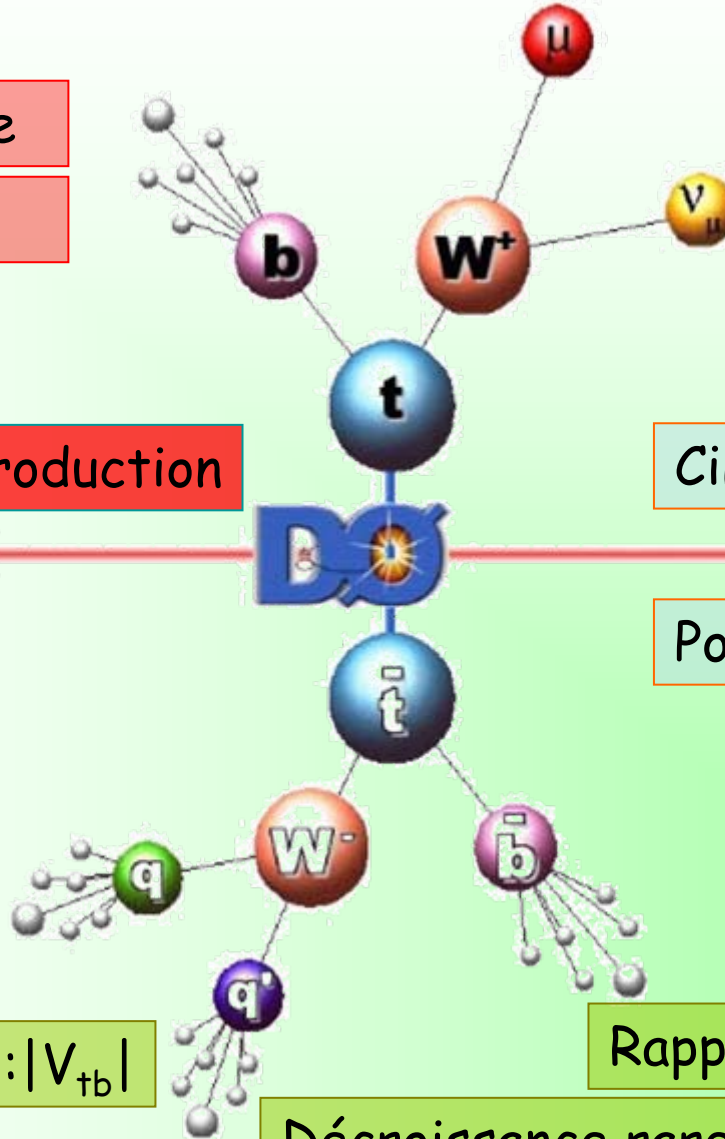
# Toute la physique du top

Largeur

Charge

Masse

Spin



Hélicité du W

Violation de CP

Couplage anormaux

Section efficace de production

Cinématique

Production résonante

Polarisation du top

CKM :  $|V_{tb}|$

Rapports d'embranchements

Décroissance rares/non SM

# Au menu

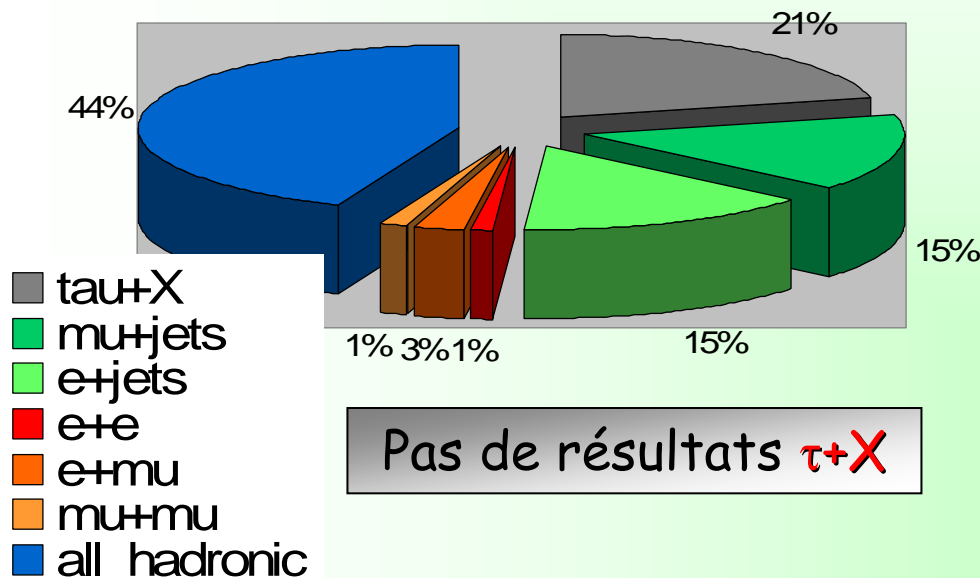
- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ Le quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Production de paires $t\bar{t}$

Production par interaction forte.

Décroissance du top :  $t \rightarrow Wb$

Les canaux d'analyse sont caractérisés par les décroissances des W.



**Alljet : BR ~ 44 % (6 jets)**

Statistique importante  
Fond multijet colossal

**Lepton+jet : BR ~ 30 % (4 jets)**  
e+jet,  $\mu$ +jet

1 lepton chargé + 1 neutrino  
Meilleur compromis signal/bruit

**Dilepton : BR ~ 5% (2 jets)**  
ee, e $\mu$ ,  $\mu\mu$

Très peu de fond  
Faible statistique

**2 jets b**

dans tous les canaux

- >identification des b réduit le  
bruit de fond

# Mesure de la section efficace

Section efficace = Comptage d'événements sélectionnés

## Dilepton :

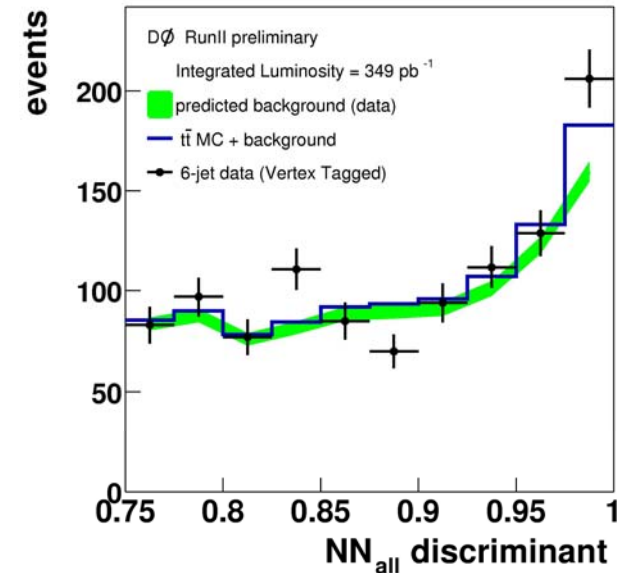
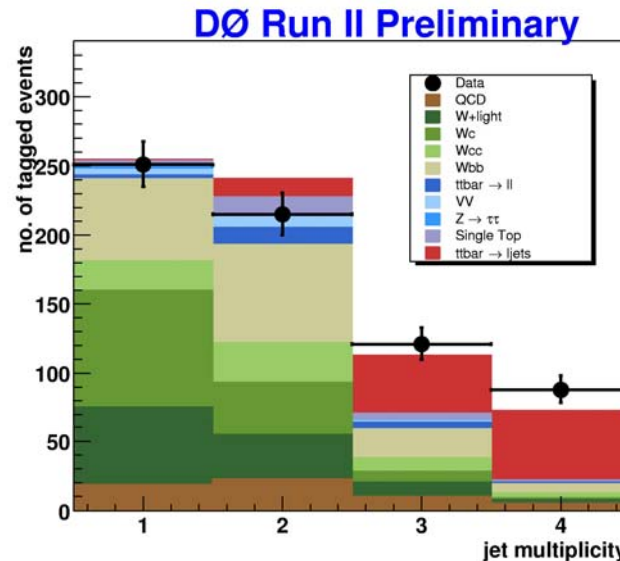
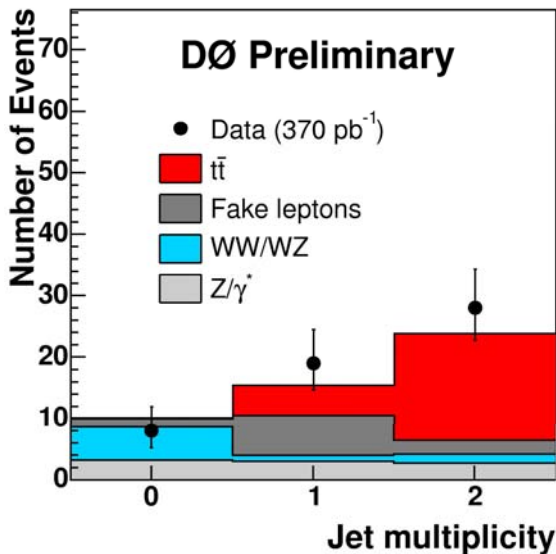
Sélection topologique, pas de b-tagging.

## Lepton+jet :

Sélection topologique (Likelihood) ou b-tagging (SVX,SLT).

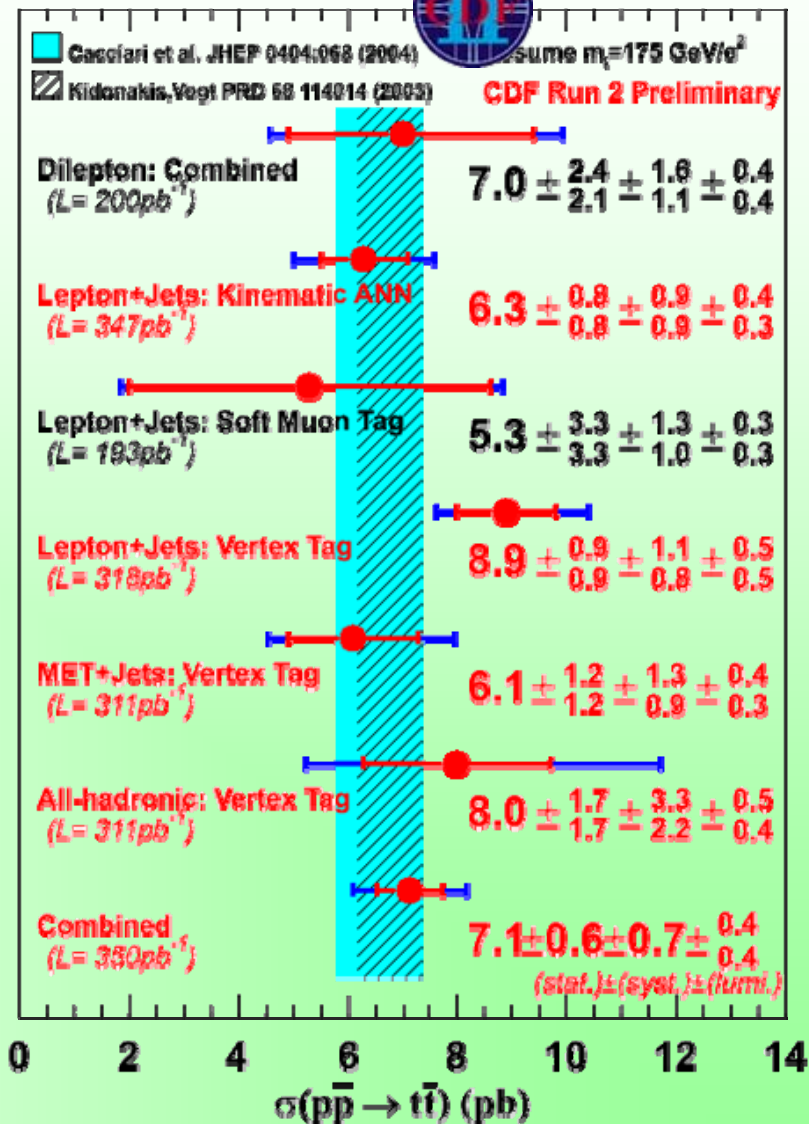
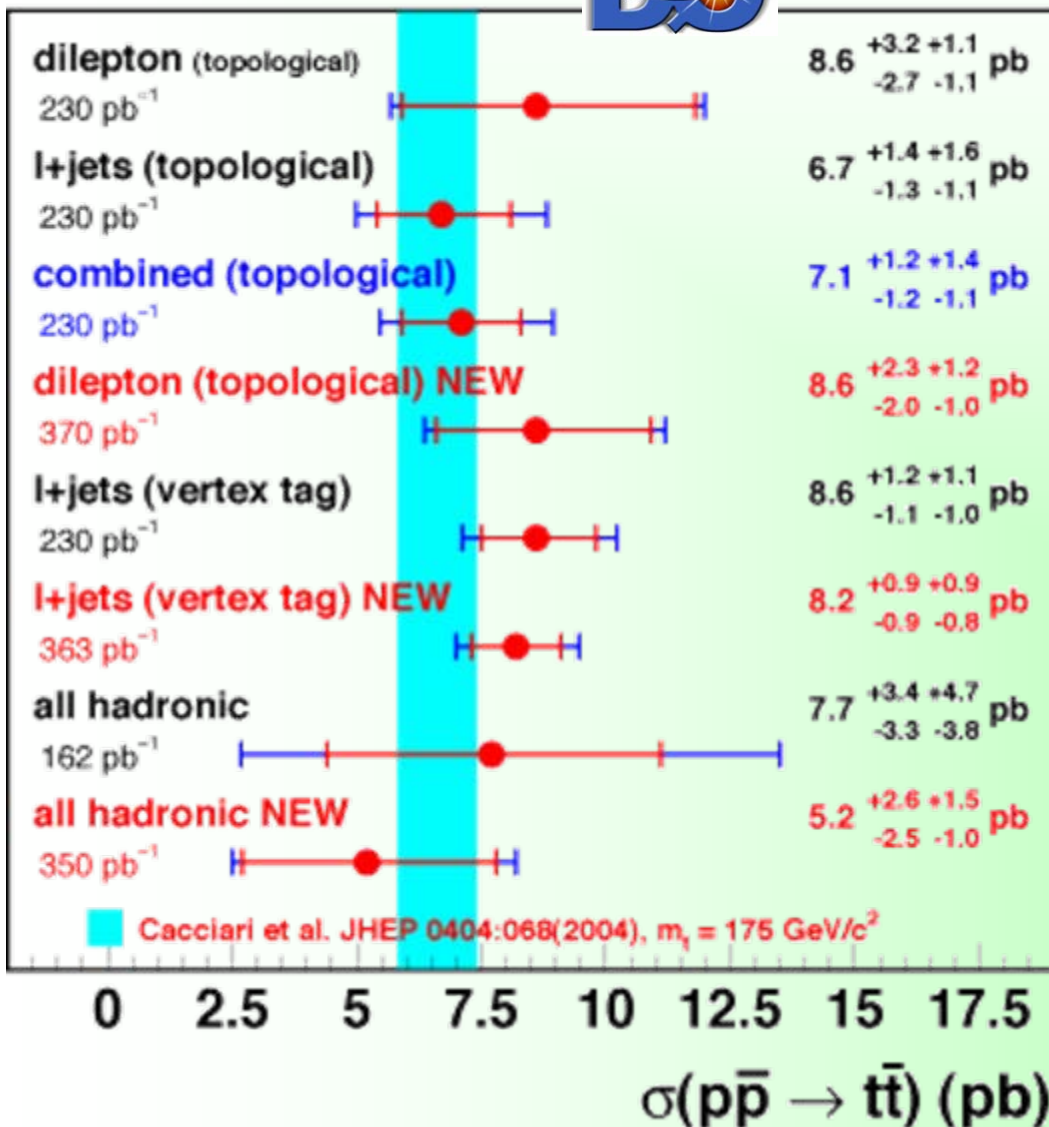
## Alljet :

Sélection topologique (réseau de neurones) et b-tagging (SVX).



# Sections efficaces

DØ Run II Preliminary





# Au menu

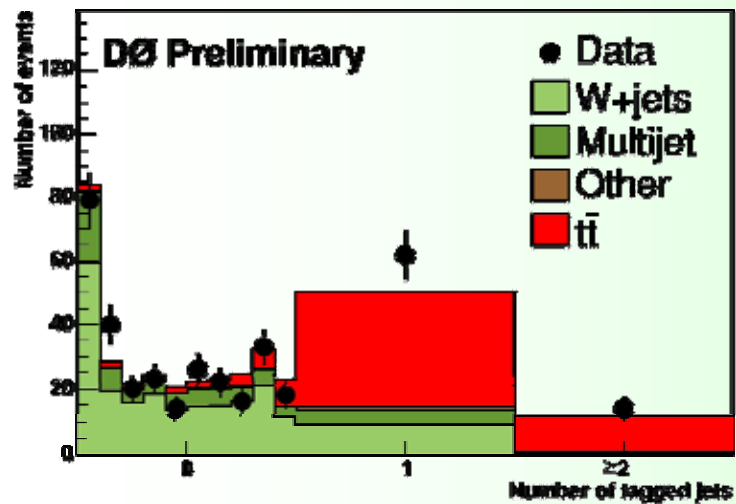
- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ La quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

# Mesure simultanée de $\sigma_{tt}$ et R

- Rapport d'embranchement  $B(t \rightarrow Wb)/B(t \rightarrow Wq)$ :

$$R = \frac{B(t \rightarrow Wb)}{B(t \rightarrow Wq)} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2 + |V_{tb}|^2} = |V_{tb}|^2 \sim 0.998 \leftarrow \text{Dans le MS}$$

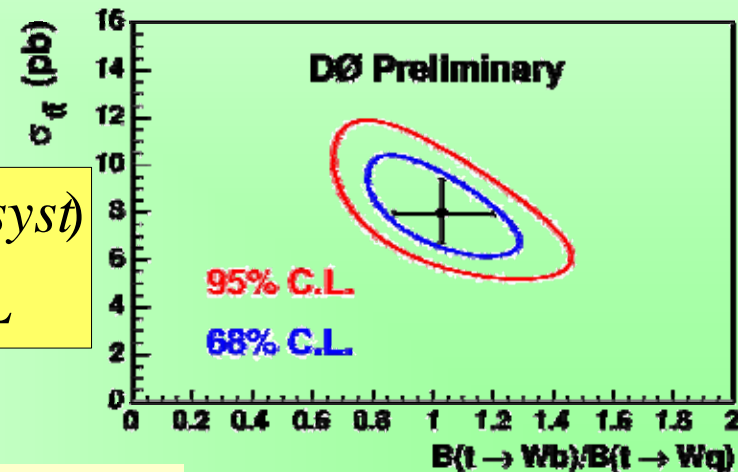
- R est mesuré en comparant le nombre de candidats tt avec 0, 1 et 2 jets b-taggués.
  - Pour les événements sans tag, un discriminant topologique est utilisé (fonction de vraisemblance)



$$R = 1.03^{+0.19}_{-0.17} (stat + syst)$$

$$R > 0.64 @ 95\% CL$$

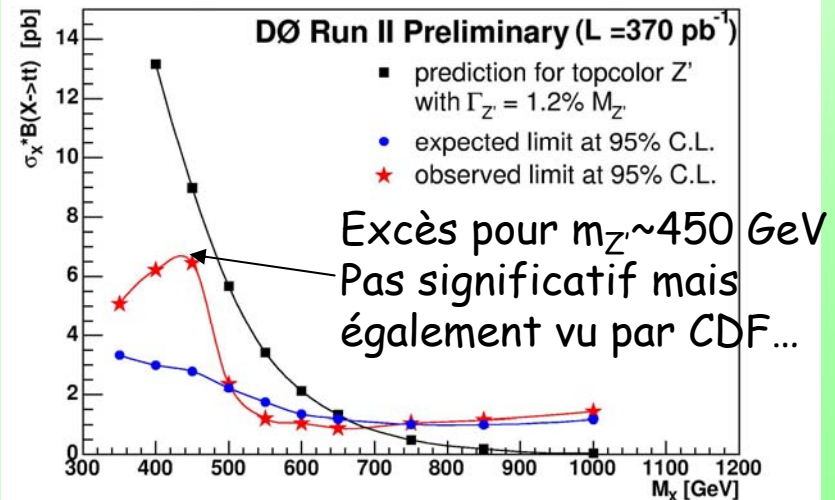
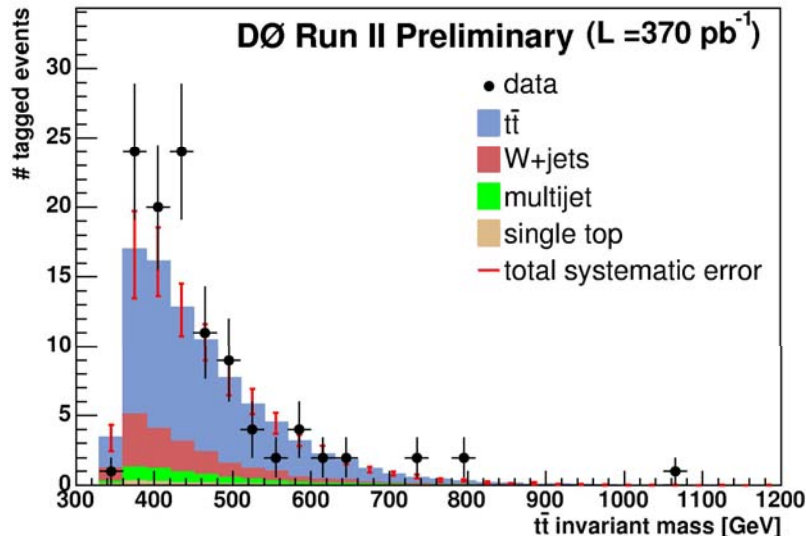
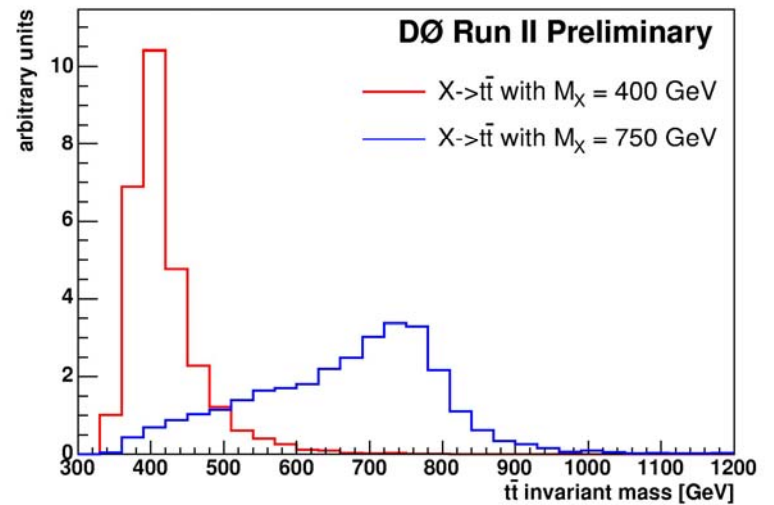
Lepton+jets ( $\sim 230 \text{ pb}^{-1}$ )



# Production résonante X->tt

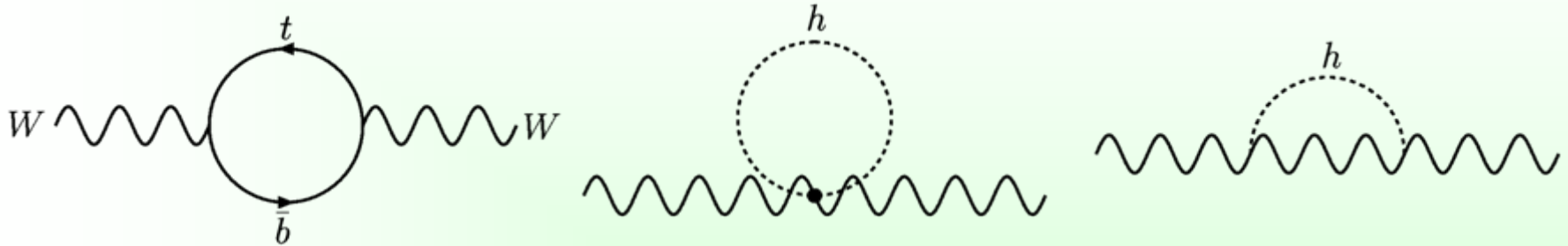
Recherche de boson lourd:  
Dimensions supplémentaires,  
théorie de grande unification.

Reconstruction de la masse  
invariante du système tt  
Lepton+jet.



# Masse du top et masse du Higgs

Corrections radiatives à la masse du W :  $m_W$  et  $m_{\text{top}} \rightarrow m_{\text{Higgs}}$



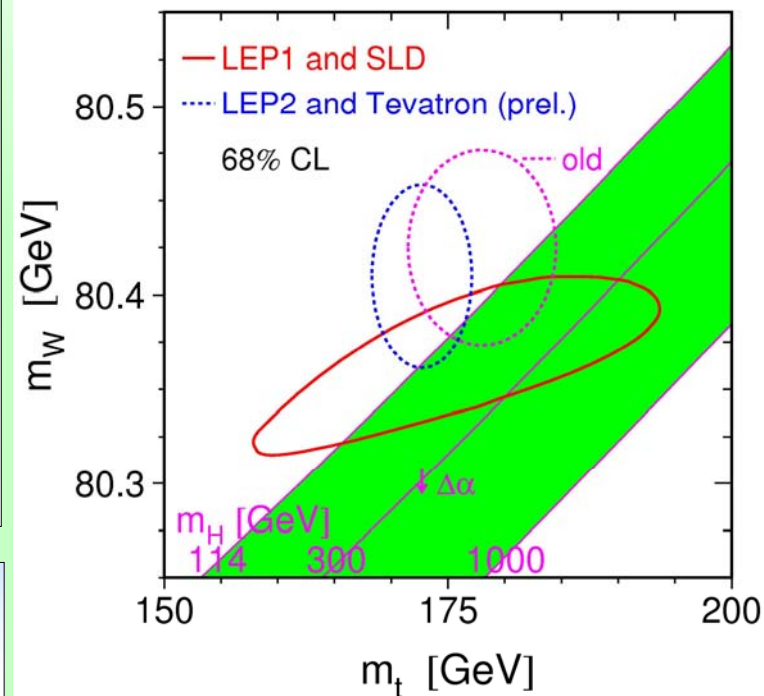
$$m_W = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F \sin^2 \theta_W} \frac{1}{(1 + \Delta r)}$$

$$\Delta r_{\text{top}} \approx -\frac{3G_F m_t^2}{8\sqrt{2}\pi^2 \tan^2 \theta_W} \propto m_t^2$$

$$\Delta r_{\text{Higgs}} \approx \frac{11G_F M_Z^2 \cos^2 \theta_W}{24\sqrt{2}\pi^2} \ln \frac{m_h^2}{M_Z^2} \propto \ln(m_h)$$

$$m_W = 80.425 \pm 0.038 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_{\text{top}} = 172.7 \pm 2.9 \text{ GeV}/c^2$$



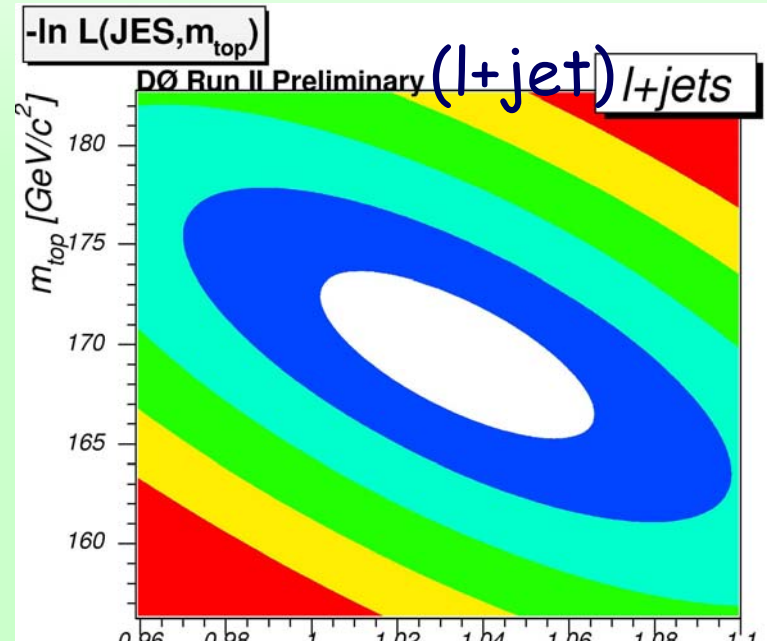
# Masse du top

Différentes méthodes :

- ajustements dynamiques (éléments de matrices) : fonction de vraisemblance événement par événement utilisant toute l'information reconstruite.
- ajustements topologiques (templates)

Erreur systématique dominante :  
Echelle en énergie des jets :

-> ajustement simultané de la masse et de l'échelle en énergie grâce à la masse du W.

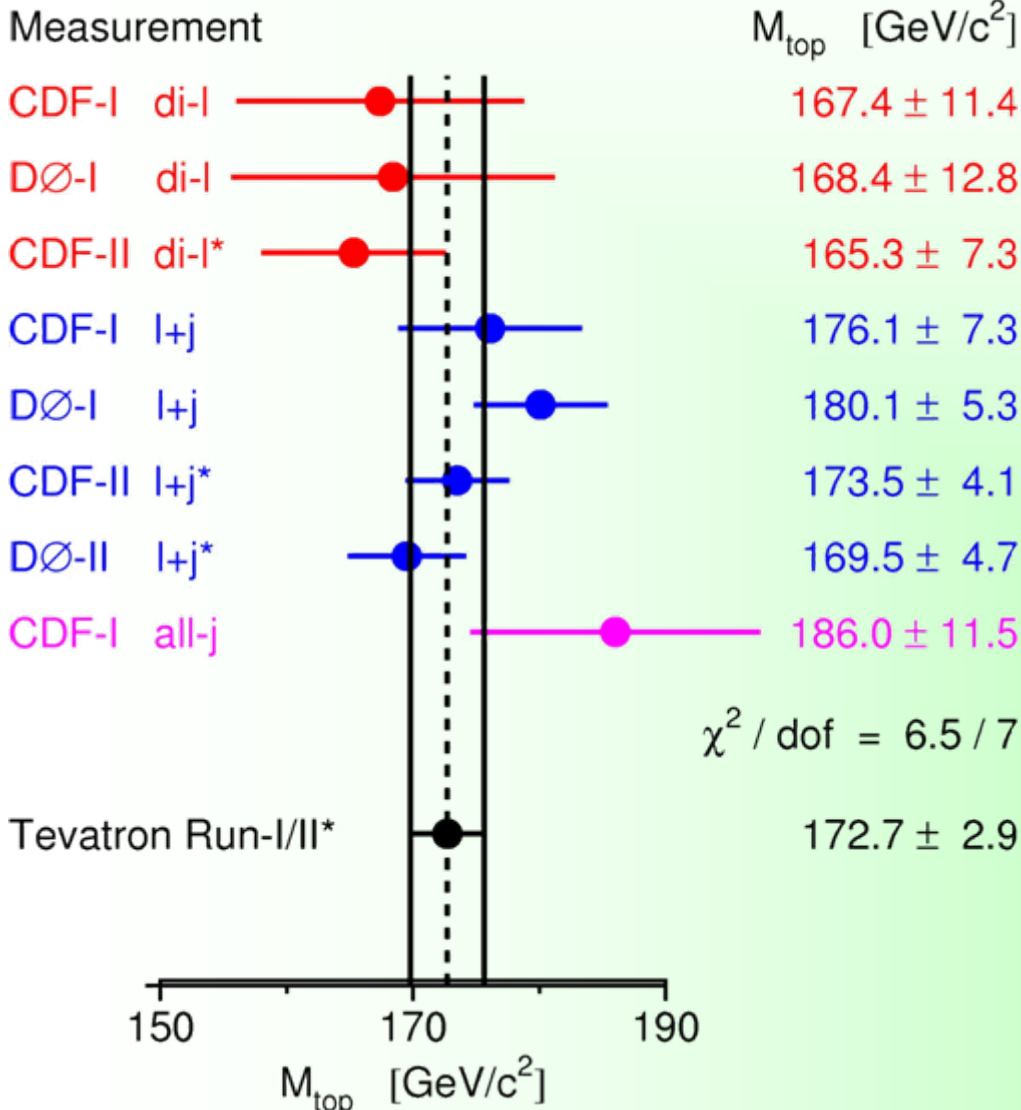


$$m_t = 169.5 \pm 4.4(\text{stat} + \text{JES})_{-1.6}^{+1.7}(\text{syst}) \text{ GeV}$$



# Masse du top

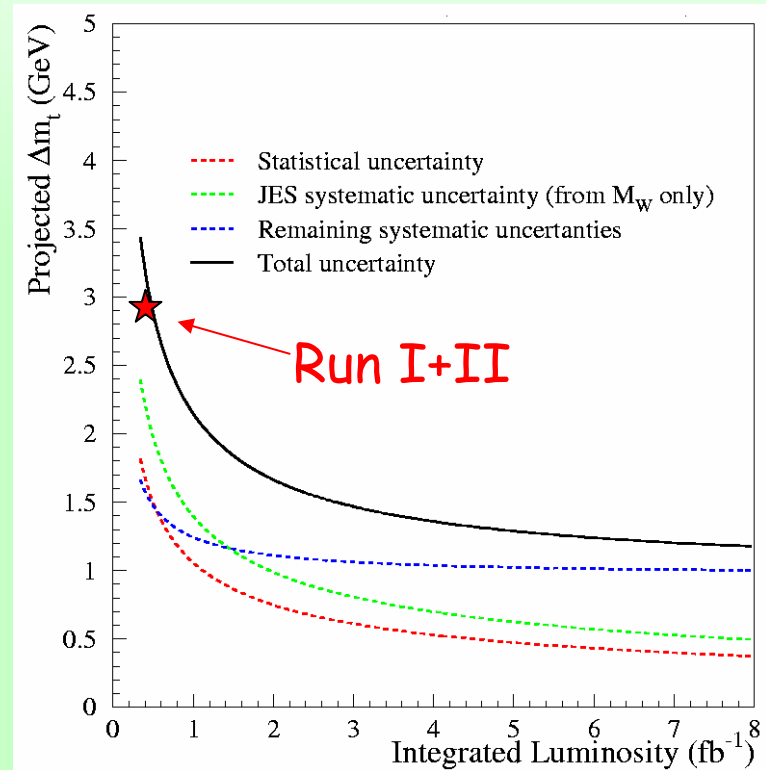
Mass of the Top Quark (\*Preliminary)



Objectif du RunII (CDF+DØ)

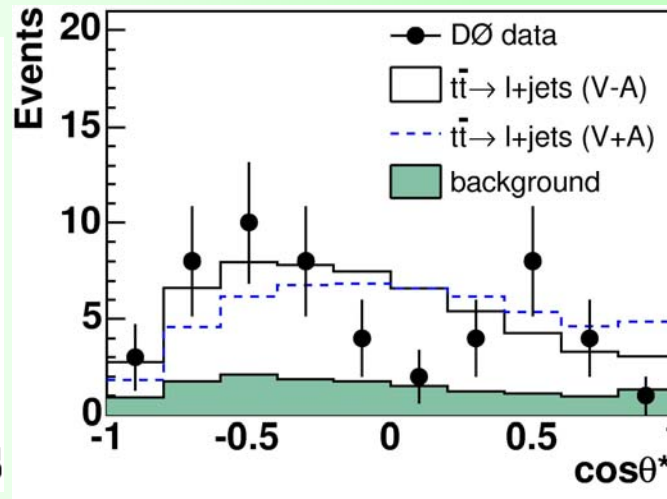
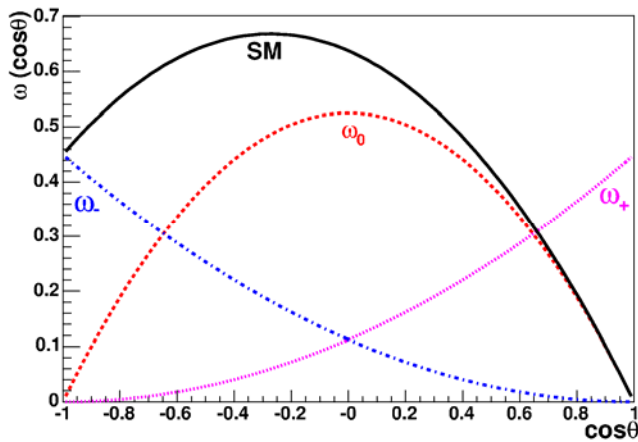
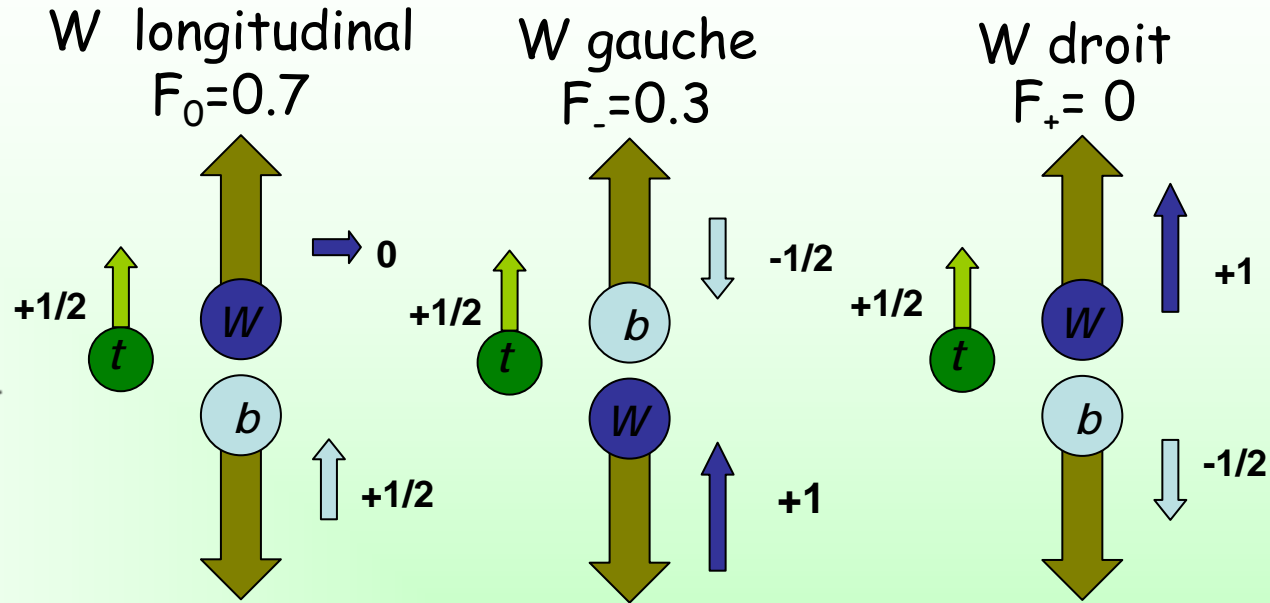
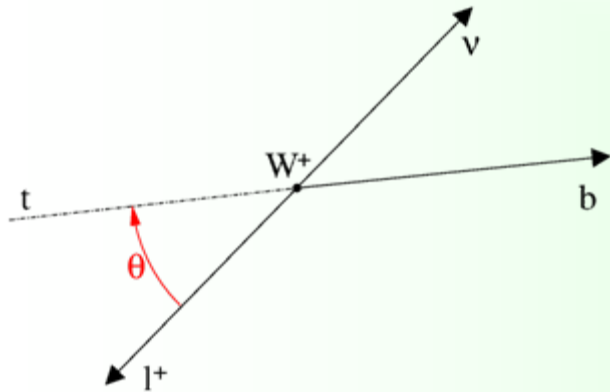
$$\Delta m_{\text{top}} < 1.5 \text{ GeV}/c^2$$

- Augmenter la statistique
- Réduire les systématiques, notamment JES



# Hélicité du W

$M_{\text{top}} \gg M_b$  : W droit fortement supprimé par le couplage V-A

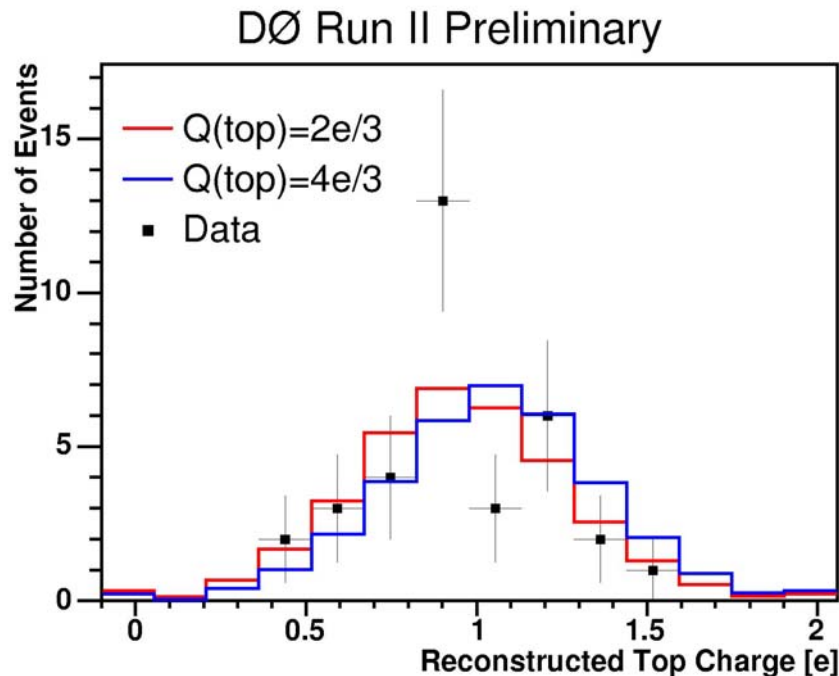


$F_+ = 0.00 \pm 0.13 \pm 0.07$   
 $F_+ < 0.25 @ 95\% CL$

# Charge du quark top

La particule observé de masse  $\sim 175 \text{ GeV}/c^2$  est-elle le quark top ou quark exotique de charge  $4/3$  ?

-> modèles compatibles avec les mesures électrofaibles (LEP)  
W.-F. Chang et al., hep-ph/9810531, E. Ma et al. , hep-ph/9909537



Utilise la charge du jet b et du lepton.

Algorithme de charge d'un jet :

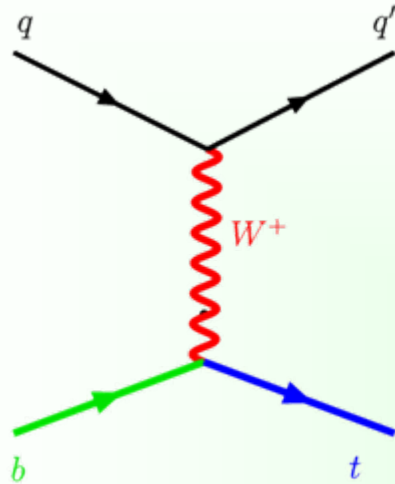
$$Q_{\text{jet}} = \frac{\sum_{\text{traces}} q \cdot p_T}{\sum_{\text{traces}} p_T}$$

$Q = 4/3$  exclue à 94% CL

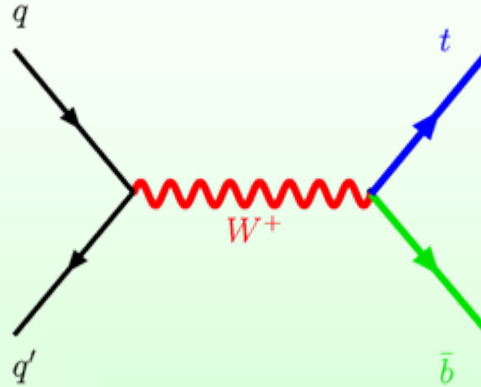
# Au menu

- ① Historique de la découverte du top
- ② Le Tevatron et l'expérience DØ
- ③ La quark top au Tevatron
- ④ Production de paires de top
- ⑤ Propriétés du quark top
- ⑥ Production électrofaible (single top)

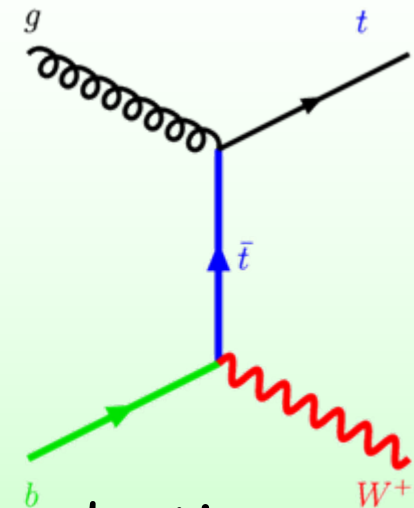
# Production électrofaible



voie t :  
 $1.98 \pm 0.3 \text{ pb}$



voie s :  
 $0.98 \pm 0.14 \text{ pb}$



Production associée  
 $0.09 \text{ pb}$

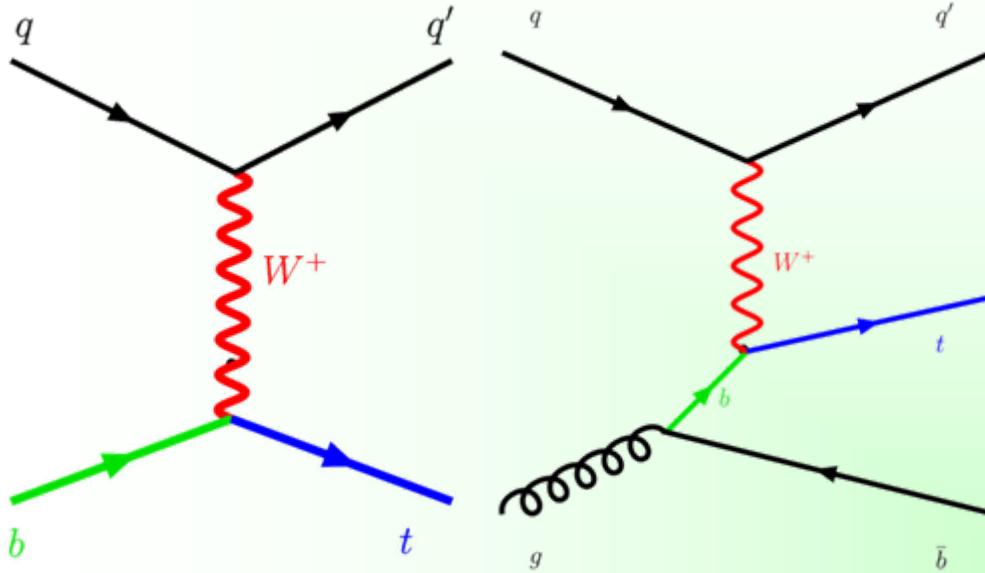
Pas encore observé :

- Sections efficaces plus faible que  $t\bar{t}$ .
- Bruit de fond ( $W+\text{jet}$ ) plus important.

Mesure directement le couplage  $Wtb$  : mesure directe de  $|V_{tb}|$ .

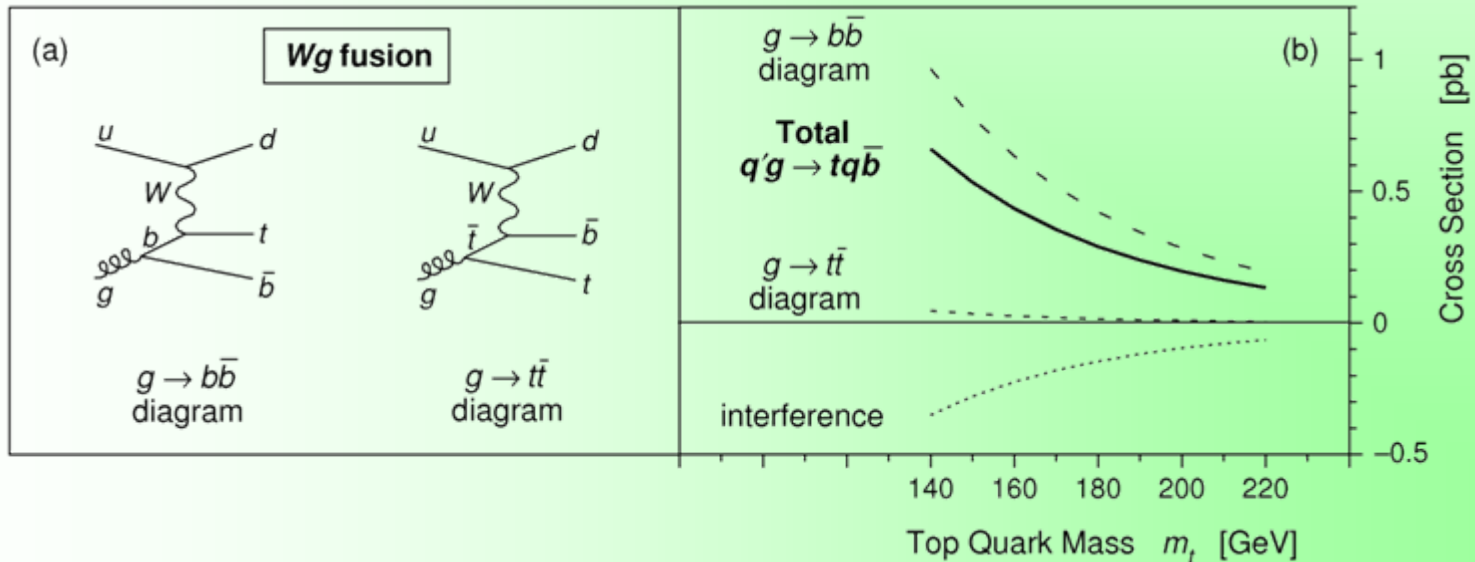
Sensibilité à de la nouvelle physique : bosons lourds chargés ( $H^+, W''$ ), quatrième génération, ...

# La voie t au Tevatron



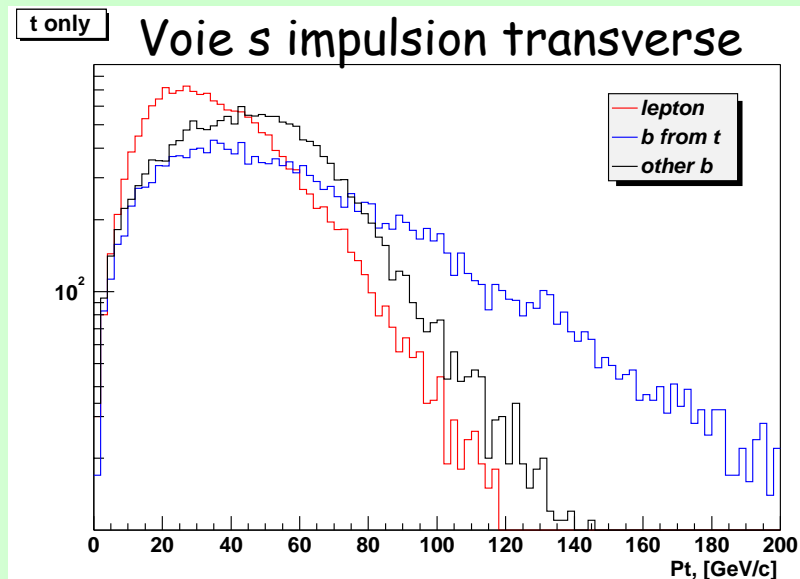
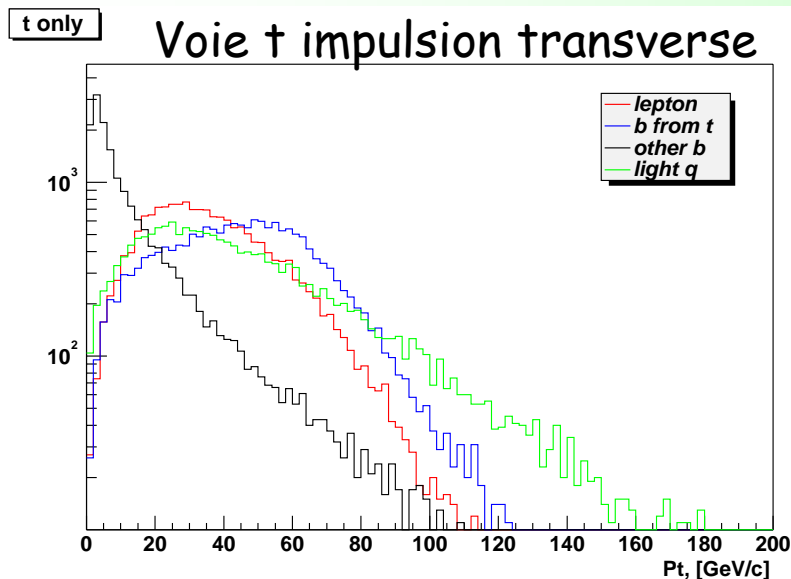
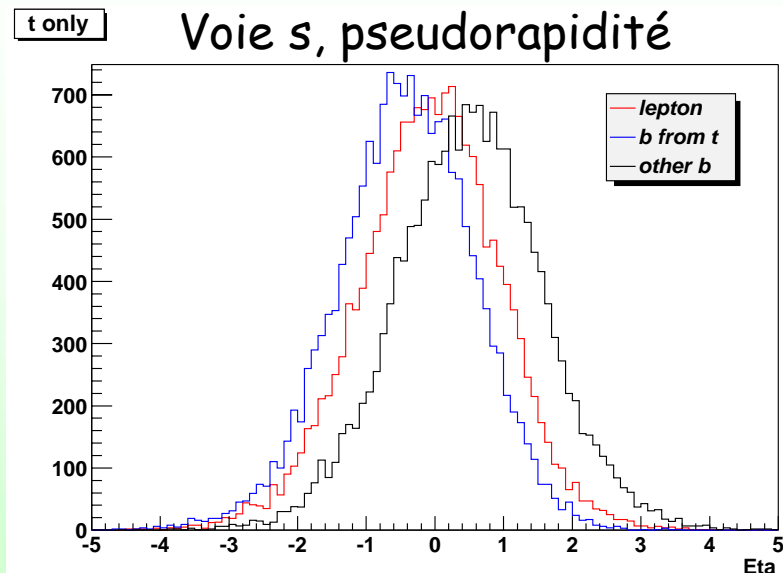
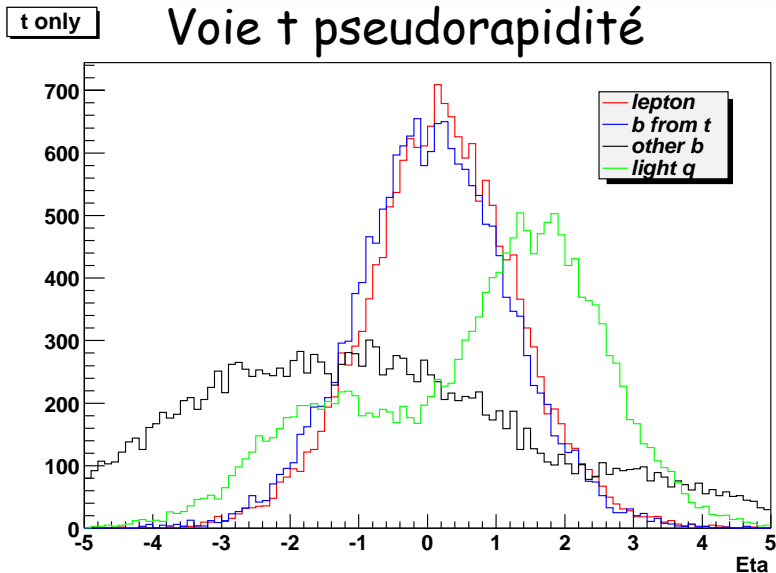
Quark b dans la voie d'entrée peut provenir d'une conversion de gluon.

Contribution des 2 diagrammes (problèmes de double comptage)

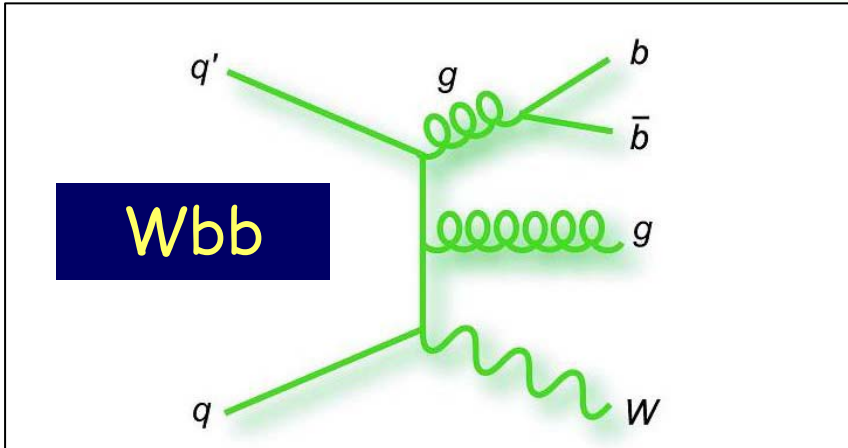




# Cinématique au niveau partonique



# Principaux fonds

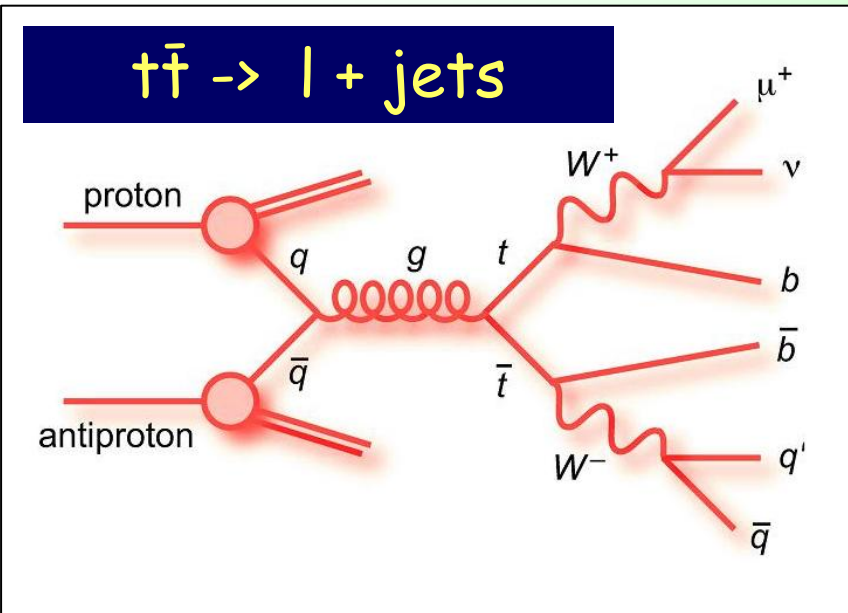


Production associée d'un **boson W et de jets**,

$Wjj$  ( $\sigma \approx O(100)$  pb),

$Wbb$  ( $\sigma \approx O(1)$  pb), irréductible

**Paire de quarks top** ( $\sigma \approx 7$  pb) dans les canaux lepton+jet et dileptons



**Dibosons** en lepton, neutrino et 2 jets:  $WW$  ( $\sigma \approx 12$  pb),  $WZ$  ( $\sigma \approx 4$  pb)

Événements **multijet** ("QCD") avec un "faux" lepton isolé :

- électron : jet identifié comme un électron.

- muon : muon provenant de la décroissance d'un hadron beau ou charmé, apparaissant isolé.

# Stratégie de l'analyse

**s-/t-channel**

**Full dataset**

electron

muon

selection

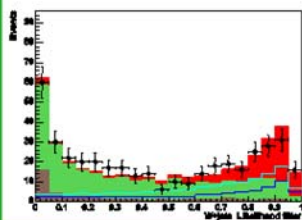
selection

=1 b-tag

≥2 b-tags

=1 b-tag

≥2 b-tags



**Likelihood  
discriminant  
method**

2d histograms : W+jets / tt filter

Bayesian fit

**95% CL Limits**

Modes leptoniques du W :  
1 lepton, énergie manquante, 1 jet b  
(top), 1 ou 2 autres jets

2 analyses : voies s et t.  
4 canaux orthogonaux pour chaque  
analyse :  
- électron/muon  
- simple/double b-tag

B-tagging : **JLIP**  
Deux modes de simple/double tag  
différents :  
Simple tag : exactement 1 jet Tight  
et aucun jet Loose supplémentaires.  
Double tag : au moins 1 jet Tight et  
1 jet Loose.

Améliore la séparation s/t

# Estimer les fonds dans les données

## Distribution pour des variables discriminantes

### Formes

**En général** : événements simulés, corrigés des efficacités de déclenchement et d'identification des jets  $b$ , qui ne sont pas simulés.

**Multijets** : lot de données enrichi en multijet en inversant une coupure de sélection du lepton.

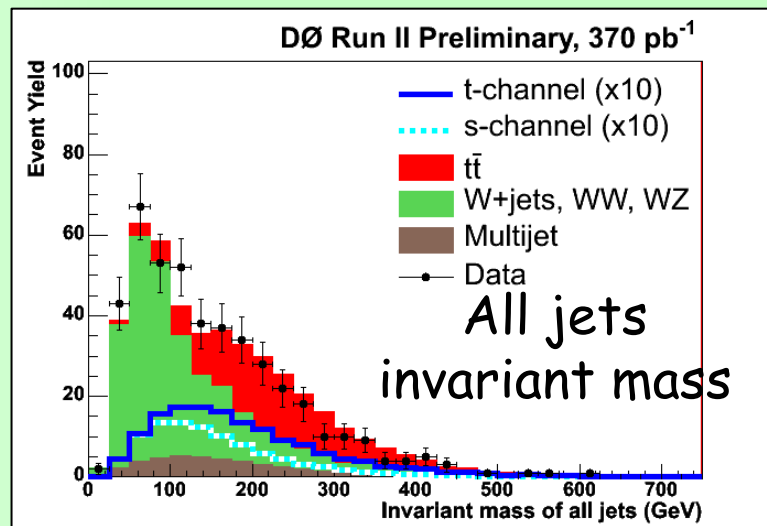
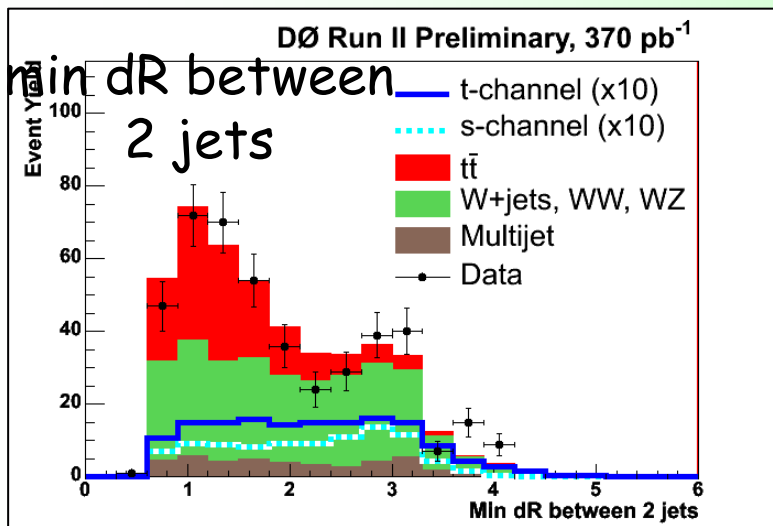
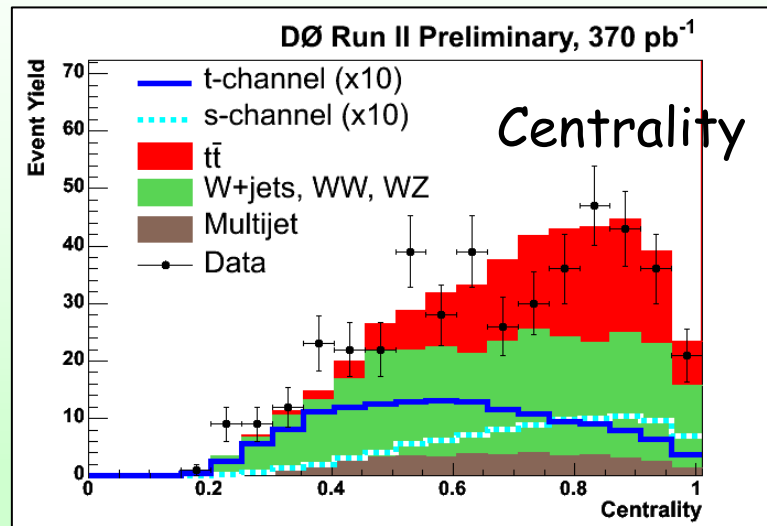
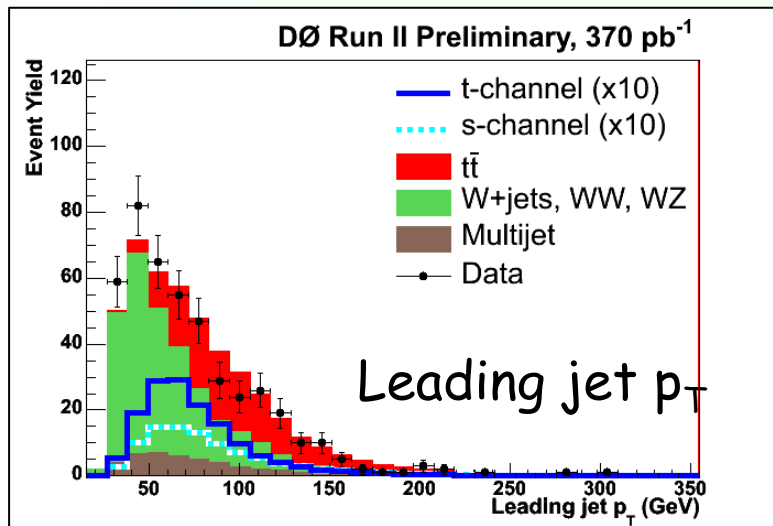
### Normalisation

**W+jet et Multijets** (lepton+jet) : Mesure le taux de vrai/faux leptons isolés en relâchant une coupure d'isolation dont l'efficacité de sélection est connue:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{Loose} = N_{real} + N_{fake} \\ N_{Tight} = \varepsilon_{real} \cdot N_{real} + \varepsilon_{fake} \cdot N_{fake} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} N_{real} = \frac{N_{Tight} - \varepsilon_{fake} \cdot N_{Loose}}{\varepsilon_{real} - \varepsilon_{fake}} \\ N_{fake} = \frac{N_{Tight} - \varepsilon_{real} \cdot N_{Loose}}{\varepsilon_{fake} - \varepsilon_{real}} \end{array} \right.$$

# VARIABLES discriminantes

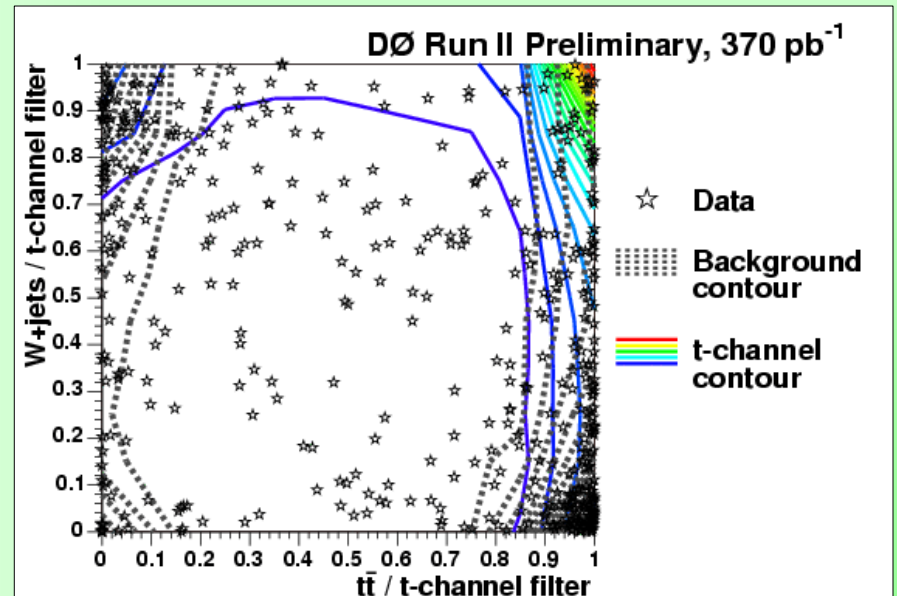
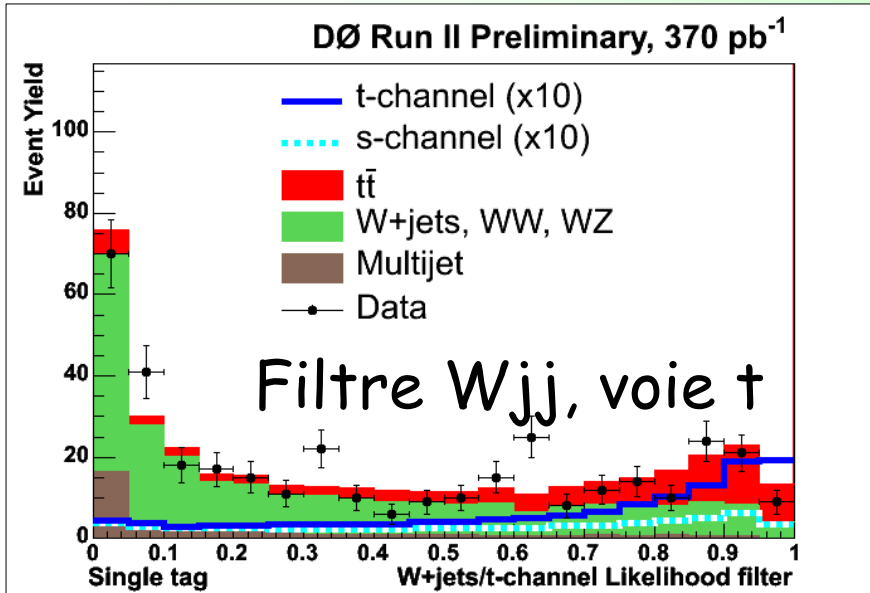
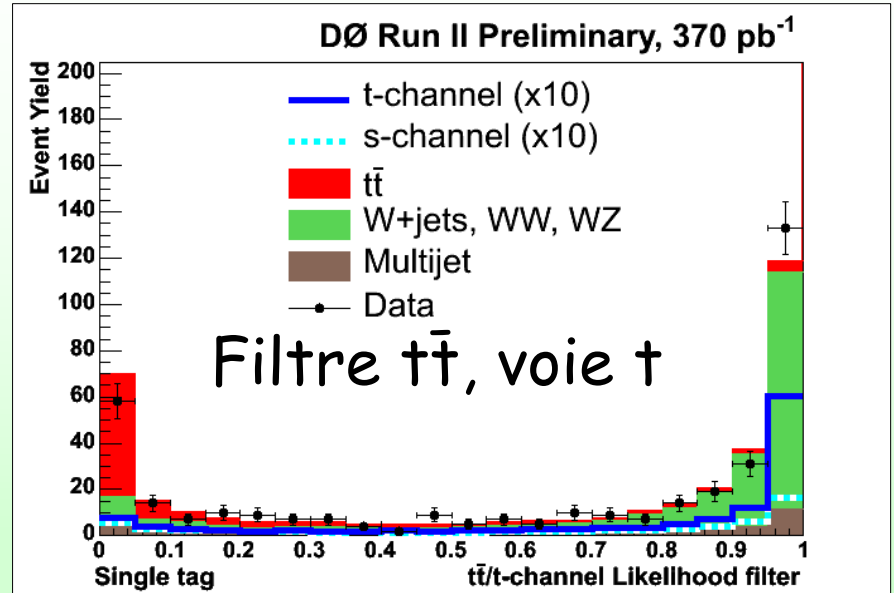
Canaux combinés : electron + muon, simple + double tags



# Fonction de vraisemblance

Canaux combinés :  
electron + muon, simple tag

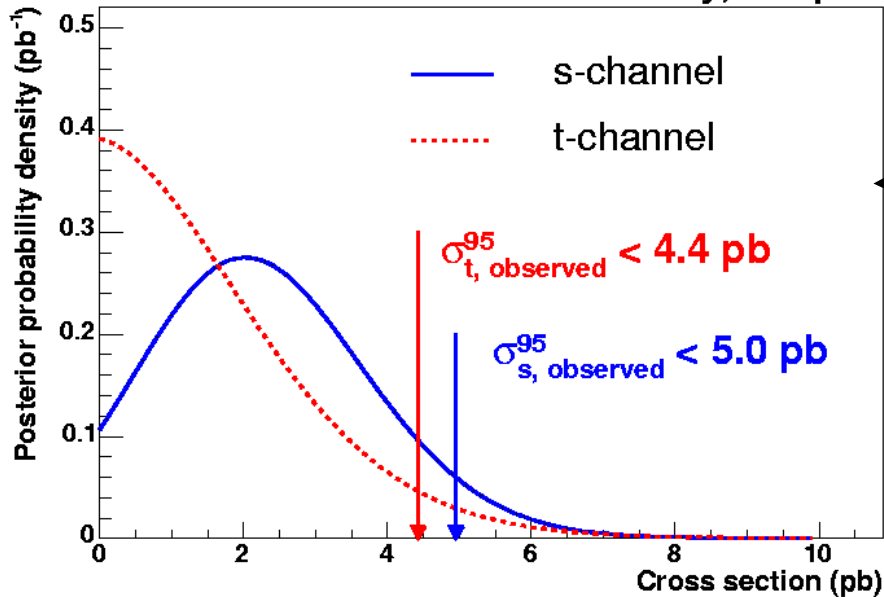
La distribution à 2D est utilisée pour calculer les limites bayésiennes en utilisant fit par maximum de vraisemblance





# Limites à 95% CL

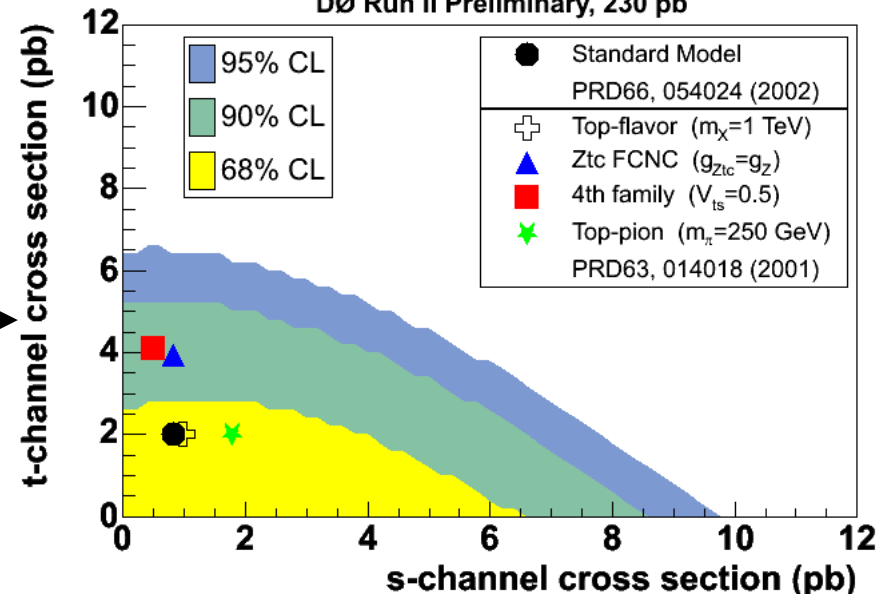
DØ Run II Preliminary, 370 pb<sup>-1</sup>



Limites bayésienne mesurée sur les sections efficaces de production dans les voies s et t

Comparaison avec différents modèles de nouvelle physique

DØ Run II Preliminary, 230 pb<sup>-1</sup>



# Single Top au Run II

95 % CL Expected/Observed Upper Limits in pb

s-channel,  $tb$        $t$ -channel,  $tqb$

CDF Run II,  $162 \text{ pb}^{-1}$       12.1/13.6      11.2/10.1

DØ Run II,  $230 \text{ pb}^{-1}$

Cuts      9.8/10.6      12.4/11.3

DTs & binned likelihood      4.5/8.3      6.4/8.1

NNs & binned likelihood      4.5/6.4      5.8/5.0

DØ Run II,  $370 \text{ pb}^{-1}$

**LHs & binned likelihood      3.3/5.0      4.3/4.4**

NLO theory      = 0.88      = 1.98

PRD 71, 012005

PLB 622,  
265-276

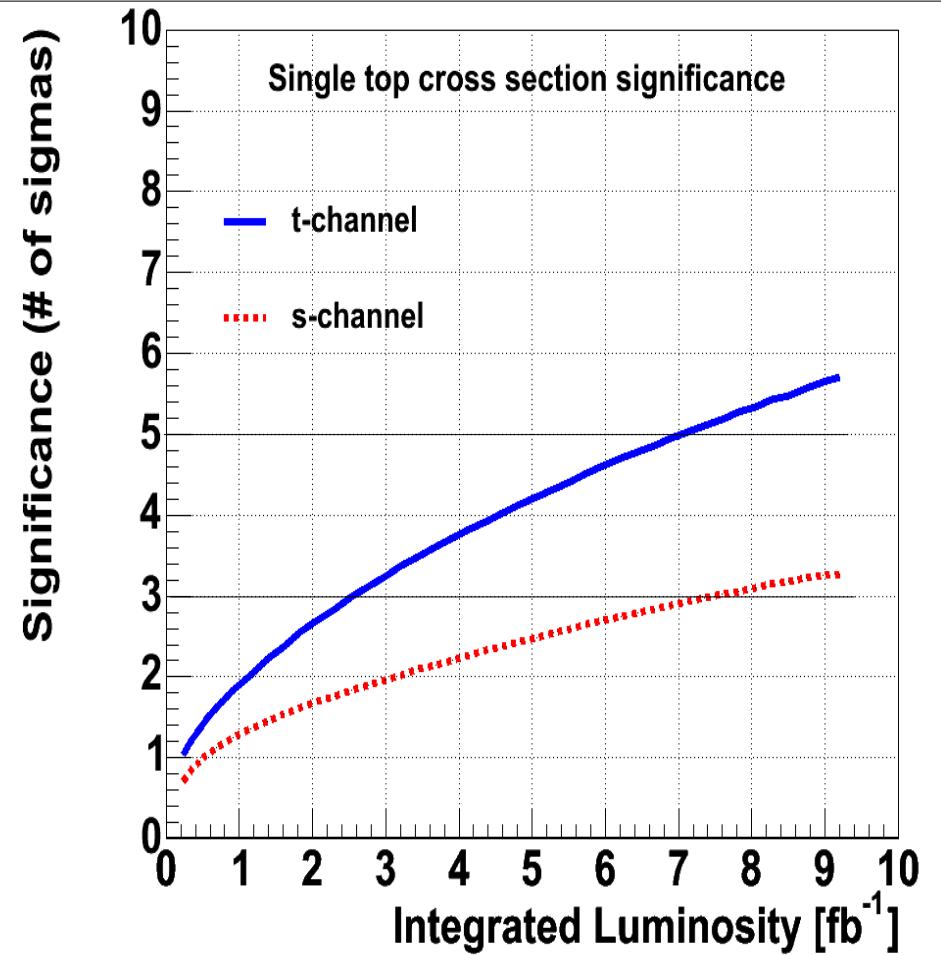
# Perspectives

## Augmenter l'acceptance

- canaux tau et alljets.
- 1 jet, 2-4 jets.

## Optimiser la séparation signal/bruit

- Super-NN
- Arbres de décision
- Autre ???



Première évidence fin 2006 ?

# Conclusion

La physique du top est un secteur primordial pour tester le modèle standard et ses limites.

Permet de sonder la physique à l'échelle de brisure de symétrie électrofaible.

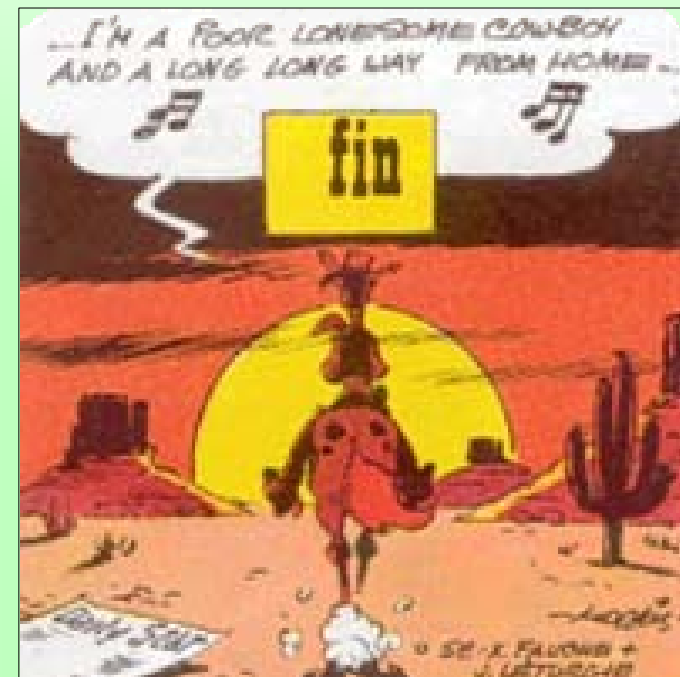
Tevatron est le seul accélérateur capable de produire des quarks top et d'étudier ses propriétés.

## A suivre :

- masse du top ( $\Delta m \sim 1 \text{ GEV} ?$ )
- single top
- production résonante ?

## Bientôt le LHC :

- mesures plus précises
- le top devient un bruit de fond aux processus de nouvelle physique !



# Comparaison avec l'analyse NN

Même analyse avec  $230\text{pb}^{-1}$  pour se comparer à l'analyse NN (publiée).

- Limites attendues **sans systématiques** : teste la sensibilité des deux analyses LH/NN.

-> Pas de différence significative

- Limites attendues **avec systématiques** : réduction des systématiques (JES, b-tagging) :  $\sim 0.3\text{ pb}$

Comparison of expected limits  
between DØ Neural Network (NN)  
and Likelihood (LH) analyses  
for an integrated luminosity of  $230\text{ pb}^{-1}$

	s-channel		t-channel	
	NN	LH	NN	LH
without systematics	3.6 pb	3.6 pb	4.6 pb	4.8 pb
with systematics	4.4 pb	4.1 pb	5.8 pb	5.5 pb



# Une collision hadronique

