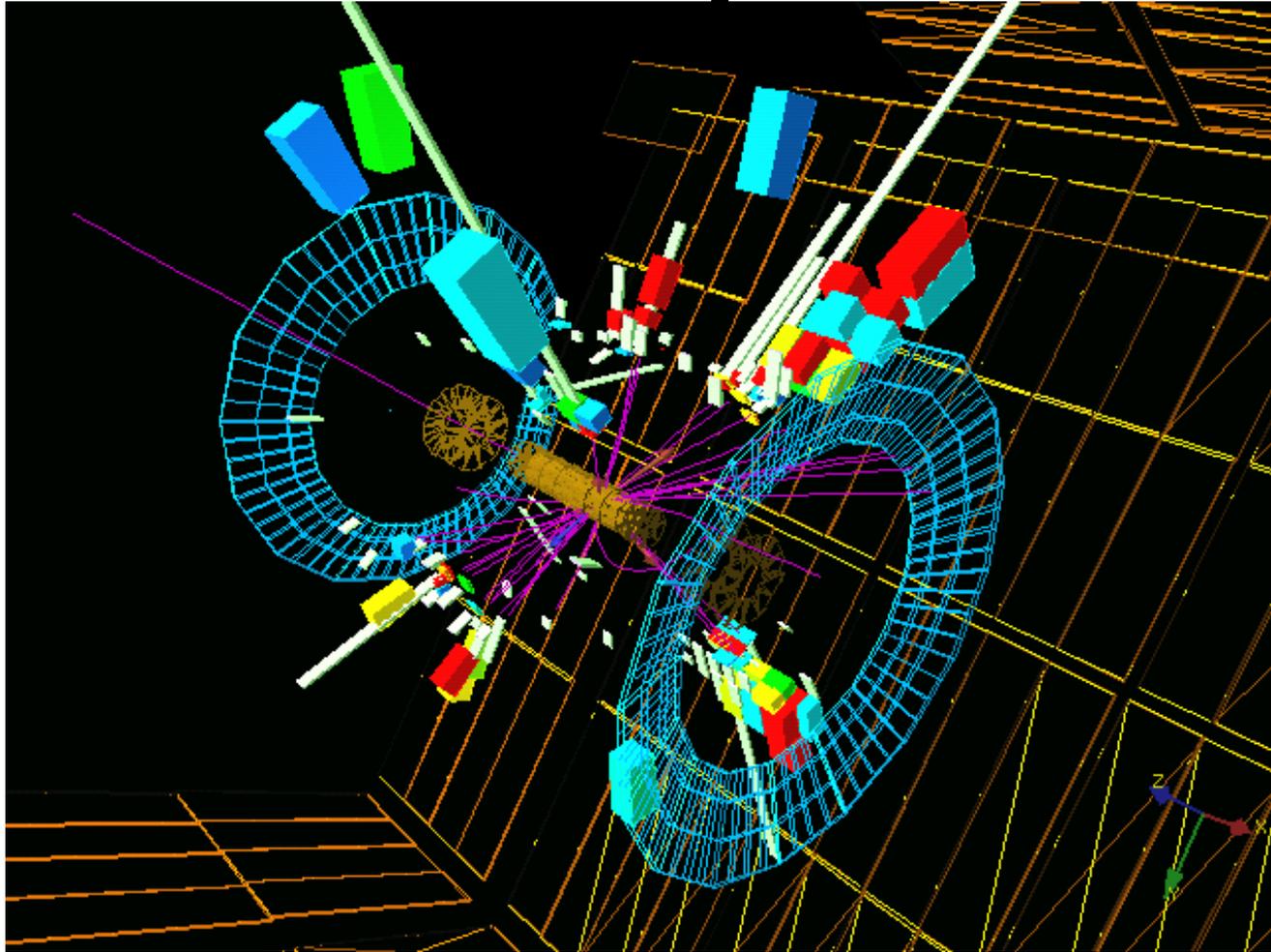


Le quark Top : de la découverte aux mesures de précision

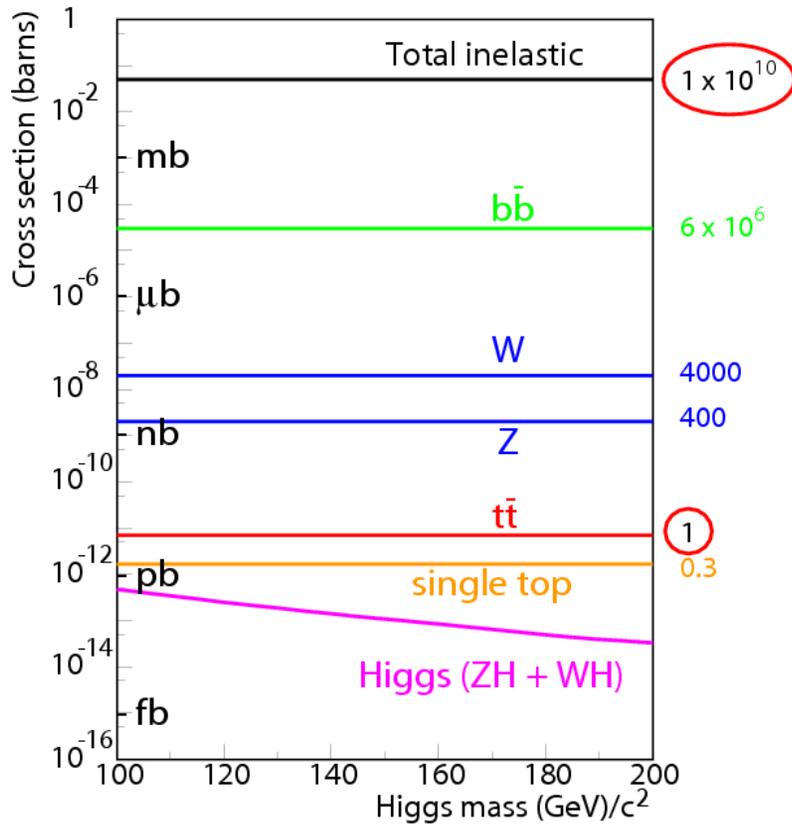


Daniel BLOCH
IReS
Strasbourg

LPSC Grenoble,
19 Mai 2005

le quark top

- découvert au Tevatron en 1994-1995 par les expériences CDF et DØ (avec $50\text{-}120\text{ pb}^{-1}$)
- c'est le plus lourd de tous les fermions : 35 fois la masse du b



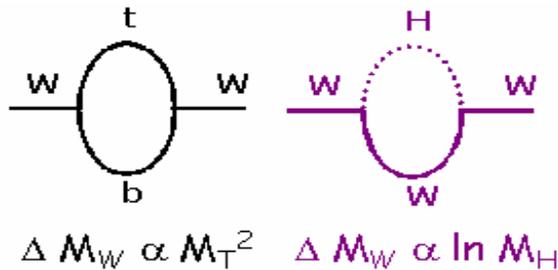
LEPTONS			
Charge			
0	Electron neutrino Mass: 0?	Muon neutrino 0?	Tau neutrino 0?
-1	Electron .511	Muon 105.7	Tau 1,777
QUARKS			
Charge			
$+2/3$	Up Mass: 5	Charm 1,500	Top ~180,000
$-1/3$	Down 8	Strange 160	Bottom 4,250

- mais il est produit une fois sur 10 milliards !

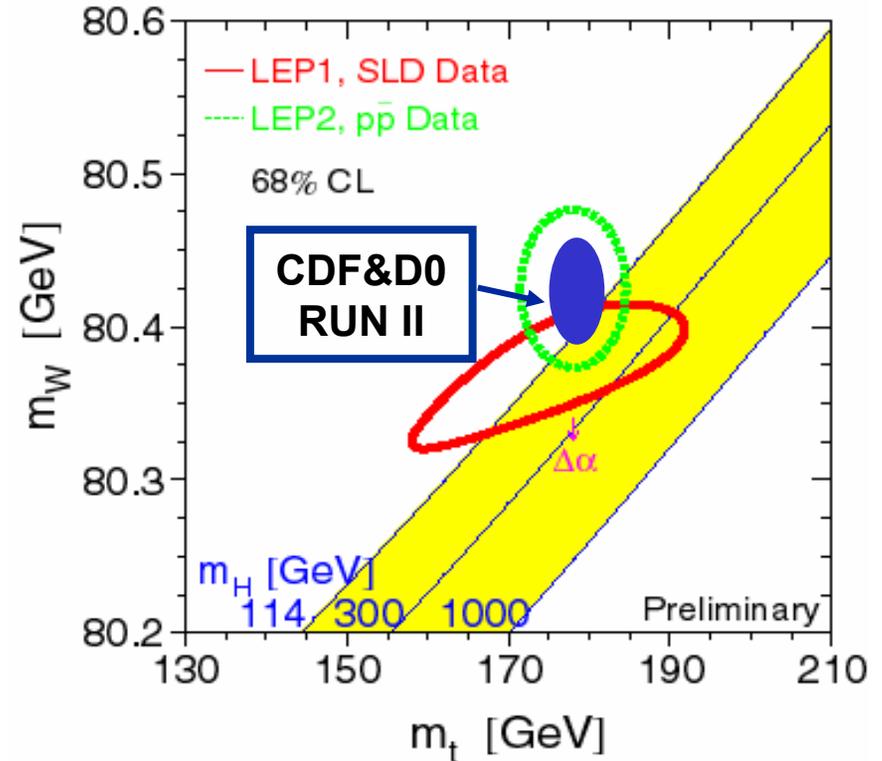
pourquoi s'intéresser au top ?

➤ la masse du top est un paramètre fondamental du Modèle Standard

- corrections radiatives importantes:



- **couplage au Higgs $\sim M t^2$**
- avec M_W (mesures directes et indirectes) : forte contrainte sur la valeur attendue pour M_{Higgs} (< 280 GeV, à 95% C.L. actuellement)
- le top peut avoir un couplage privilégié ($\sim M^2$) à de nouvelles particules



production du top au Tevatron

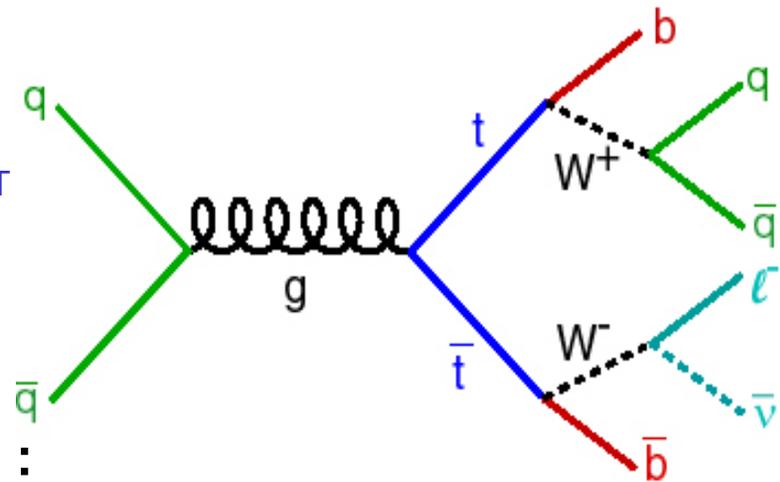
principalement **produit en paires** ($\sigma \sim 6.7 \text{ pb}$, th.NLO)
via $q\bar{q}$ (85%) et gg (15%) (contrairement au LHC via gg (90%))

durée de vie plus courte que le temps d'hadronisation:
 $\tau_{\text{top}} \sim 4 \times 10^{-25} \text{ s}$ (due à sa masse), $\Lambda^{-1} \sim (200 \text{ MeV})^{-1} \sim 10^{-23} \text{ s}$
il se désintègre donc comme un quark libre :
excellent outil pour étudier les couplages électrofaibles

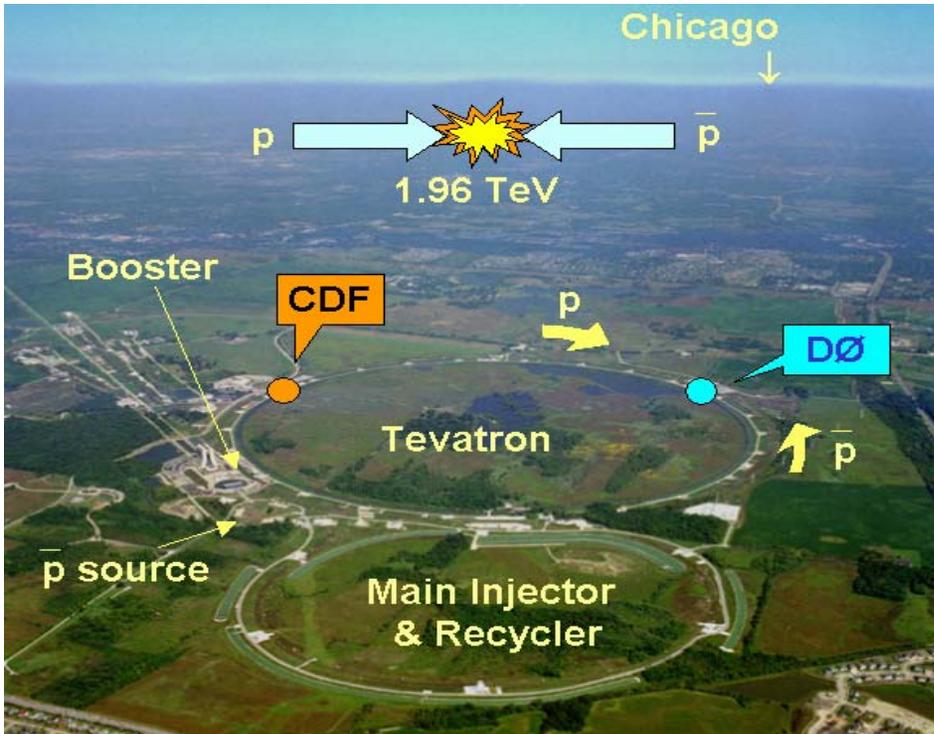
Modèle Standard (3 familles): $\text{Br}(t \rightarrow Wb) = 0.999$

Etats finals :

- **Dilepton (5%, faible bruit de fond) :**
2 leptons (e/μ) à grand p_T + 2 jets b +
grande énergie transverse manquante \cancel{E}_T
- **Lepton+jets (30%, bdf acceptable) :**
1 lepton (e/μ) à grand p_T
+ 4 jets (dont 2 b) + \cancel{E}_T
- **Tout hadronique (44%, très grand bdf) :**
6 jets dont 2 jets b
- **τ + jets (21%) :** très grand bdf



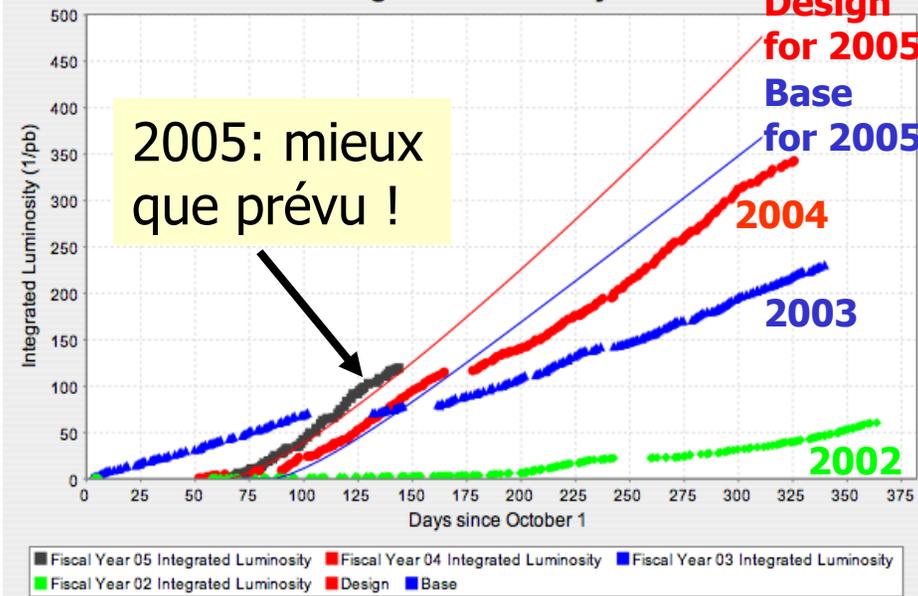
le Tevatron : le collisionneur de plus haute énergie à ce jour



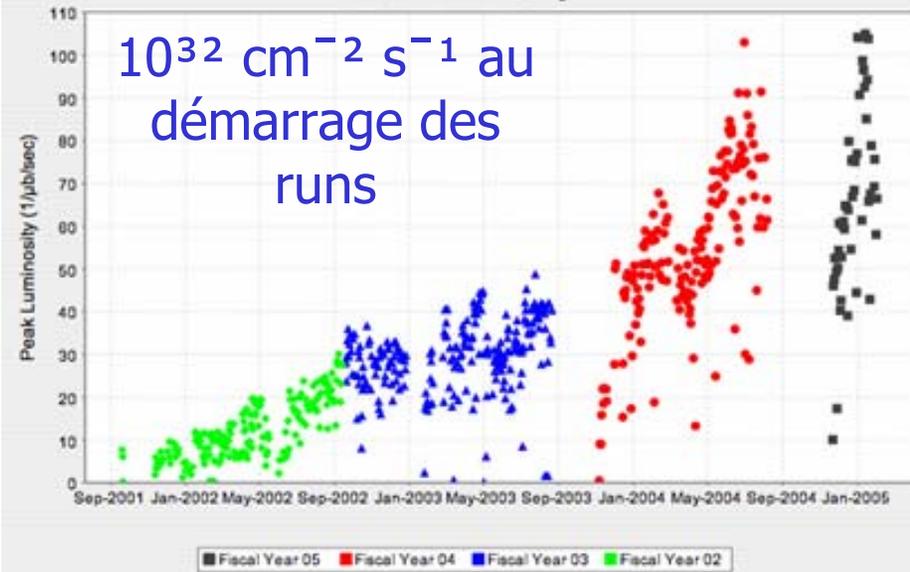
	Run I	Run IIa	Run IIb
Bunches in Turn	6 × 6	36 × 36	36 × 36
\sqrt{s} (TeV)	1.8	1.96	1.96
Typical L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.6×10^{30}	9×10^{31}	3×10^{32}
$\int L dt$ ($\text{pb}^{-1}/\text{week}$)	3	17	50
Bunch crossing (ns)	3500	396	396
Interactions/ crossing	2.5	2.3	8
Run I → Run IIa → Run IIb 0.1 fb^{-1}			

par rapport au Run I :
 $\sqrt{s} = 1.8 \nearrow 2 \text{ TeV} : \sigma(tt) \times 1.3$
 Run II depuis 2001 : **luminosité pic x 50**

Integrated Luminosity

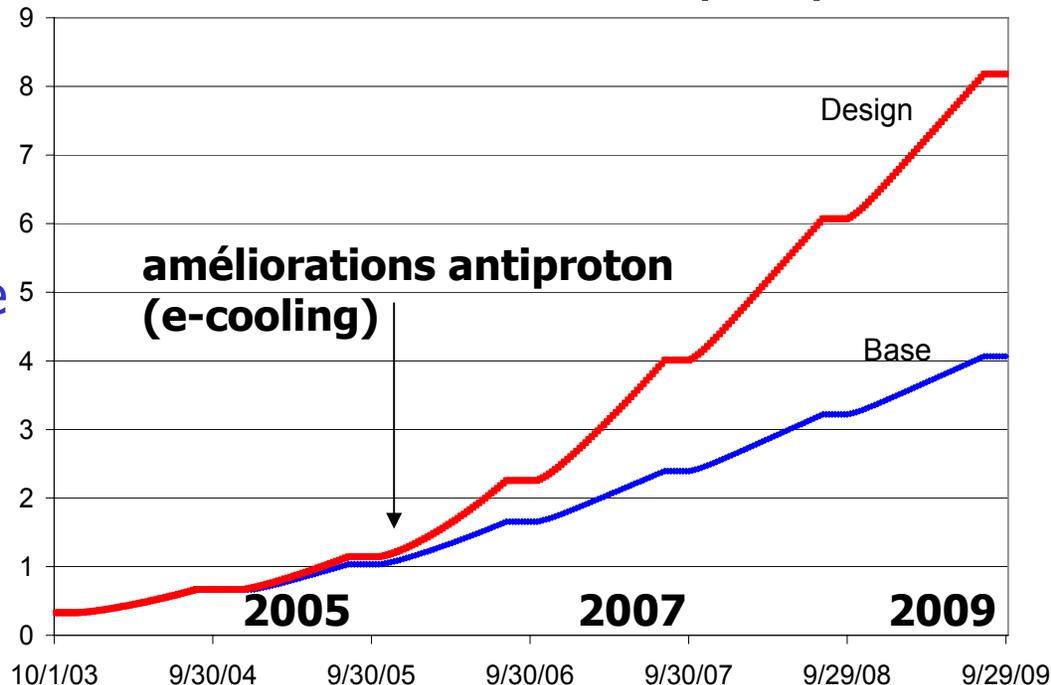


Peak Luminosity



Luminosité totale (fb^{-1})

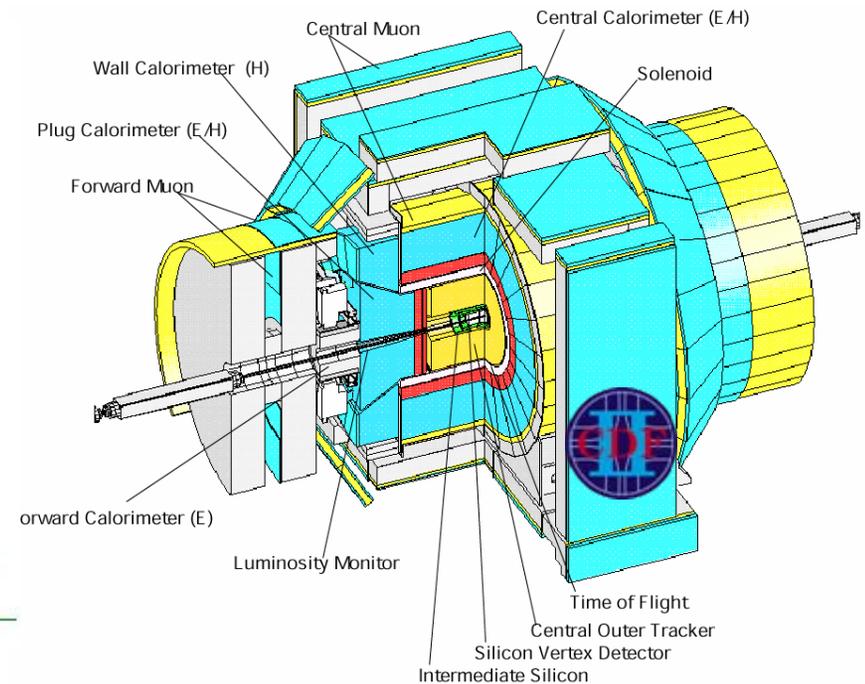
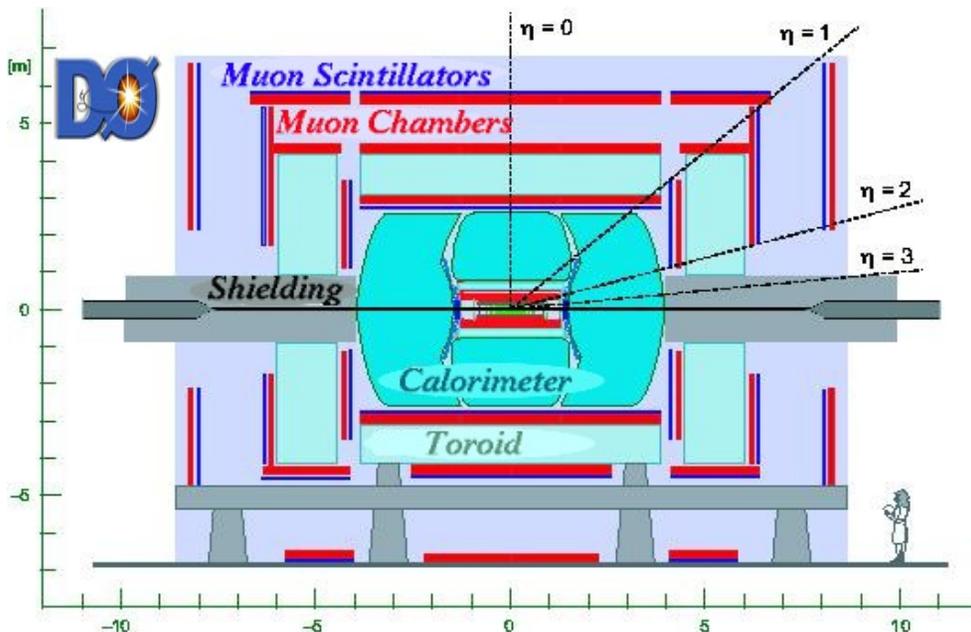
efficacité d'acquisition $\sim 85\%$
 700 pb^{-1} sur bande
 $\sim 200 - 400 \text{ pb}^{-1}$ analysés



des détecteurs améliorés pour le Run II

- nouveaux trajectographes internes au Silicium (L0 CDF, 4 couches Si DØ) + chambres à derive (CDF), fibres scintillantes (DØ) + solénoïde (nouveau pour DØ, 2T)
- Calorimètres EM et Hadroniques (jets, électrons, γ) finement segmentés, hermétiques : acceptance étendue (CDF) , pieds de gerbe (DØ)
- Détecteurs à muons: acceptance étendue ($|\eta| < 2$ DØ, < 1.5 CDF)
- électronique plus rapide, nouveaux triggers (L2 vertex secondaires CDF), DAQ

DØ : 8 MHz \rightarrow L1 \rightarrow 1.5 kHz \rightarrow L2 \rightarrow 1 kHz \rightarrow DAQ / L3 \rightarrow 50 Hz

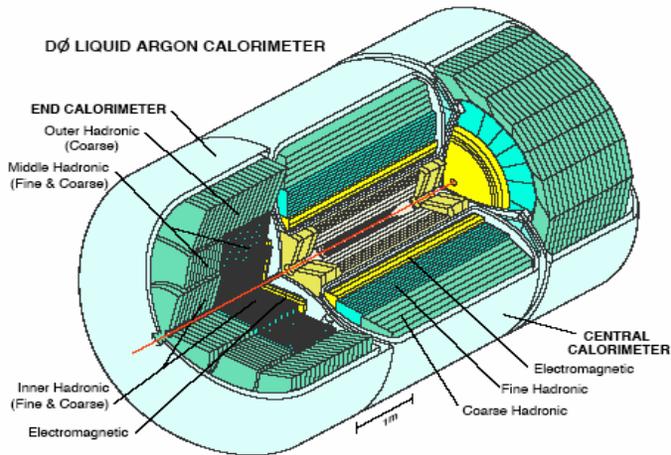


les calorimètres

- **D0 Uranium-Liquid Argon calorimètre à échantillonnage $|\eta| < 4.2$:**
 - compensation $e/\pi < 1.05$, $E > 30$ GeV
 - réponse uniforme, hermétique
 - grande couverture angulaire (sauf ICD, inter-cryostats-det.)
 - fine segmentation spatiale 0.1×0.1

Electrons: $\sigma_E / E = 15\% / \sqrt{E} \oplus 0.3\%$

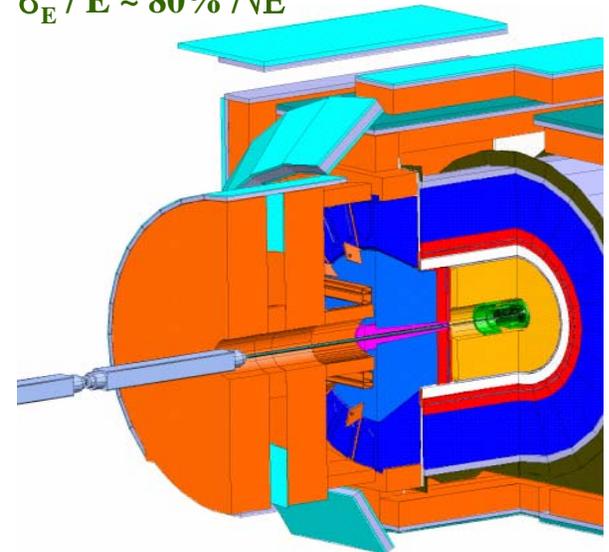
Jets: $\sigma_E / E \sim 80\% / \sqrt{E}$ (Run I)



- **CDF sandwich scintillateur – Pb/Fe $|\eta| < 3.6$:**
 - réponse différente aux électrons et aux hadrons chargés
 - bouchons étendus (plug)
 - segmentation $\Delta\eta \Delta\phi = 0.1 \times 0.25$

Electrons: $\sigma_E / E = 13.5 - 16\% / \sqrt{E}$ (central-plug)

Jets: $\sigma_E / E \sim 80\% / \sqrt{E}$

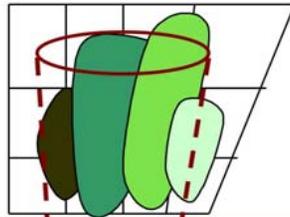


correction en énergie des jets

remonter de l'énergie mesurée (dans cône de rayon $R = \sqrt{(\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2)} \sim 0.5$)
à l'énergie du parton initial

calorimeter jet

non-uniformité



soustraction du bruit calorimétrique (cellules chaudes, pile up), uniformité en ϕ ($D\phi$), en η (CDF), non-linéarité

particle jet

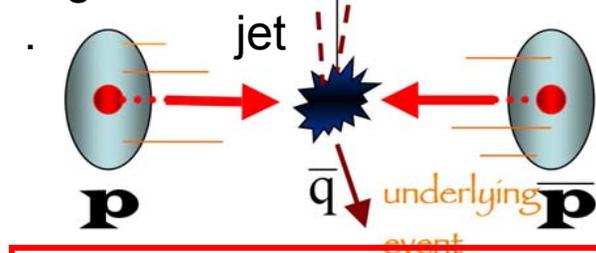
différente réponse π^0/π^- (CDF)



calibration avec evts photon+jet ($D\phi$) di-jets (CDF), test E/p des électrons, calibration $Z \rightarrow e+e^-$ (data), correction hors-cône (MC et data)

parton jet

fragmentation

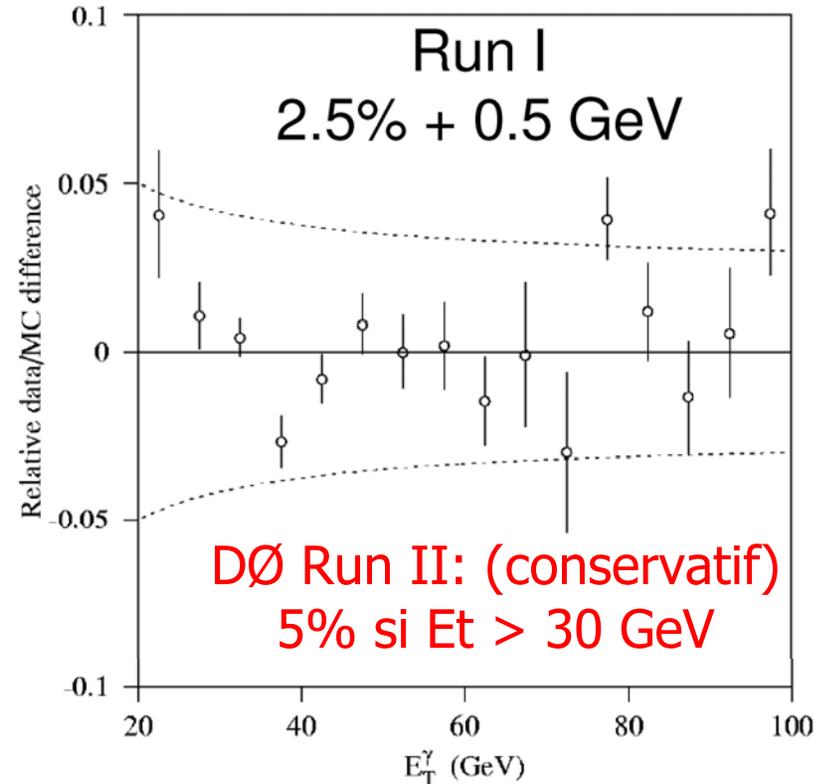
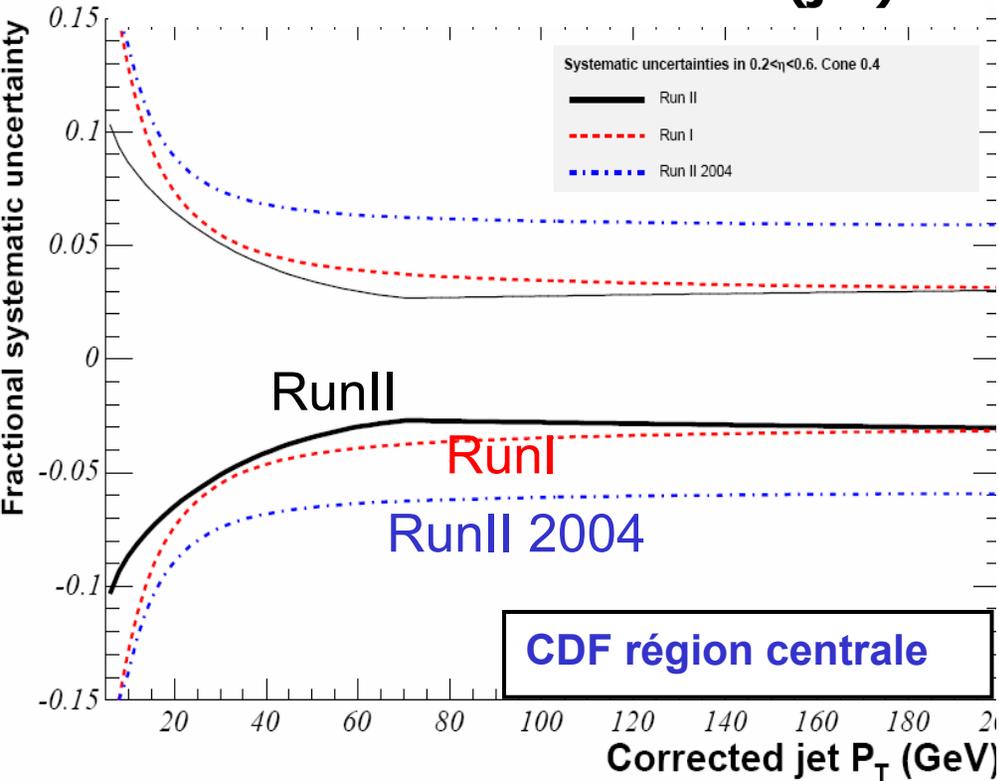


différence jets légers / jets b (MC) (b semi-leptoniques, plus de traces si $B \rightarrow$ hadrons)

PDF's, physique à grand P_t + fragments des p/\bar{p} , interactions multiples

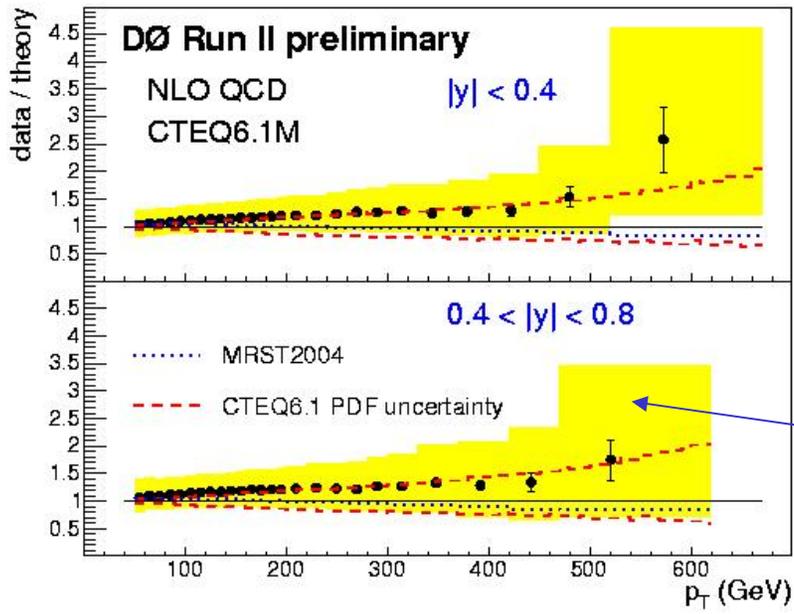
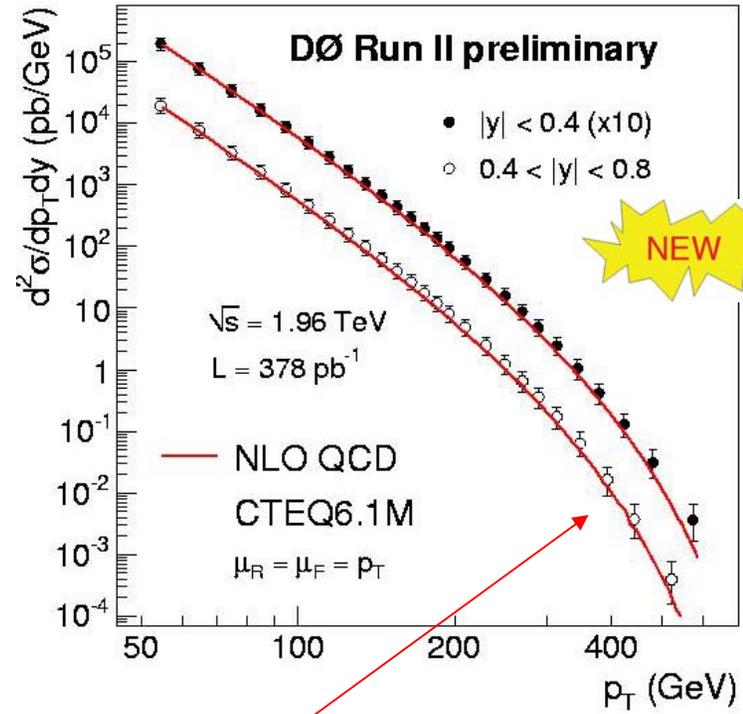
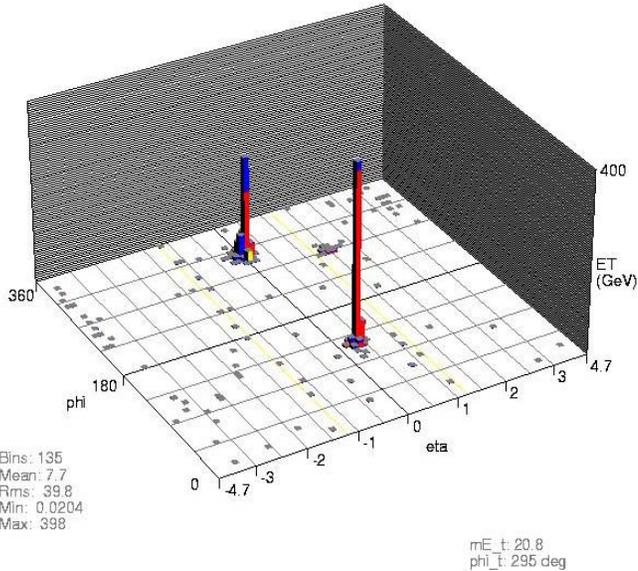
systematiques sur l'énergie des jets

incertitude relative vs $E_t(\text{jet})$



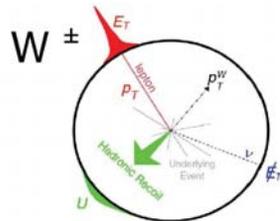
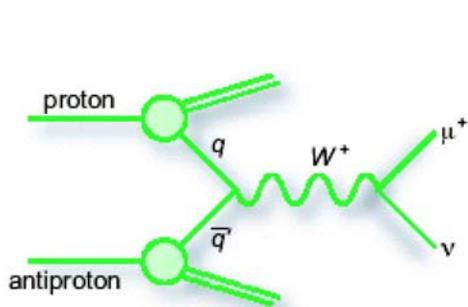
- CDF a maintenant une incertitude systématique sur l'énergie des jets qui est comparable, voir meilleure qu'au Run I (~3%)
- DØ est plus conservatif (la résolution est moins bonne qu'au Run I) mais devrait pouvoir s'améliorer

application à la QCD: section efficace de production inclusive de jets

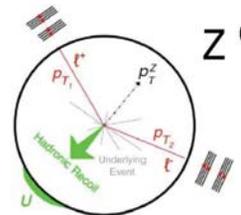
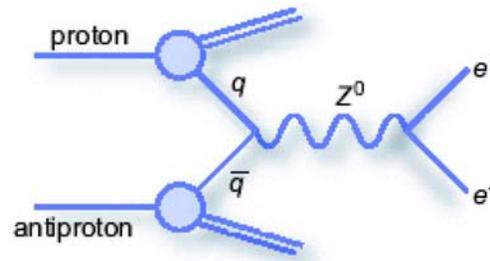


- bon accord avec NLO QCD sur 8 ordres de grandeur
- syst. exp. dominées par la calibration en énergie des jets

identification des leptons

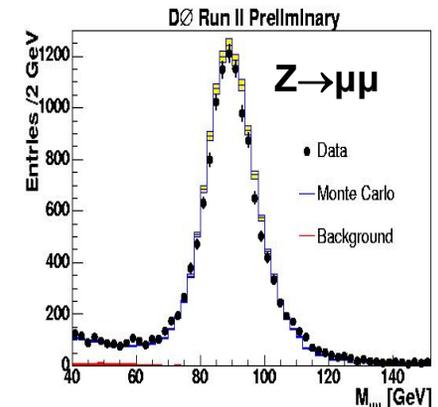
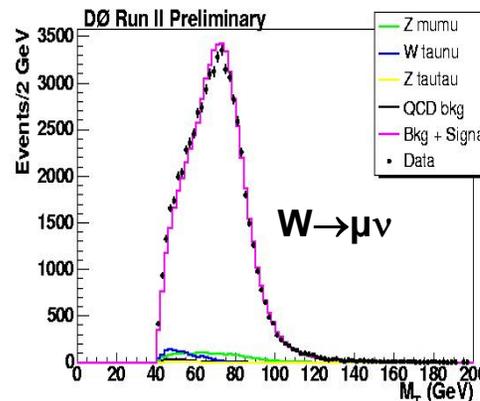
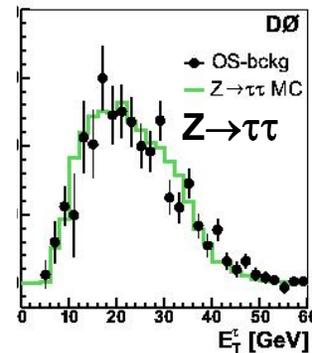
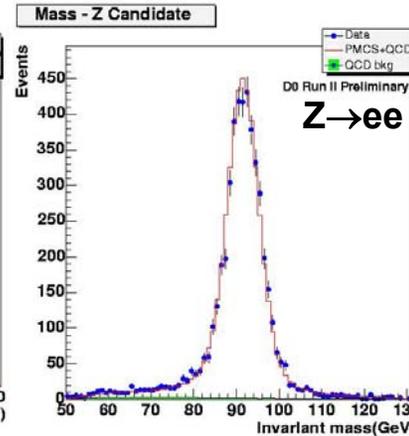
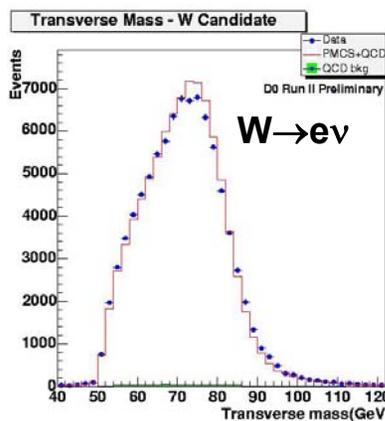


- energetic lepton
- missing E_T (" E_T^{miss} ")



- 2 energetic leptons
- (leptons w/ opposite sign)

testée sur les W et Z reconstruits: nos "chandelles standards" au Tevatron



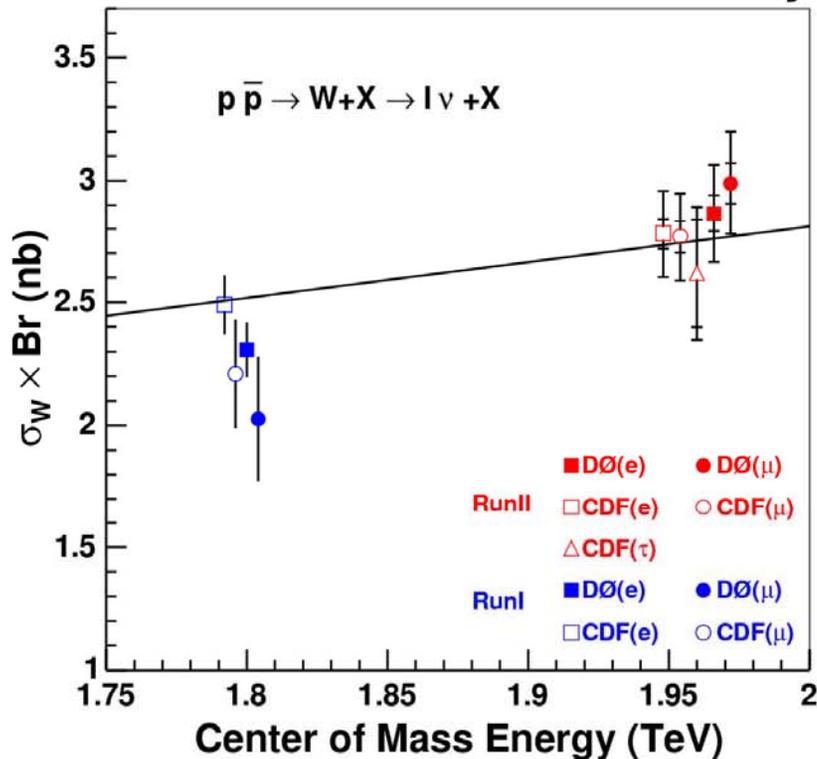
sections efficaces W et Z

en bon accord avec le Modèle Standard (Hamberg et al., Nucl.Phys. B359, 343 (1991), Frixione, Mangano hep-ph/0405130: $\pm 2\%$)

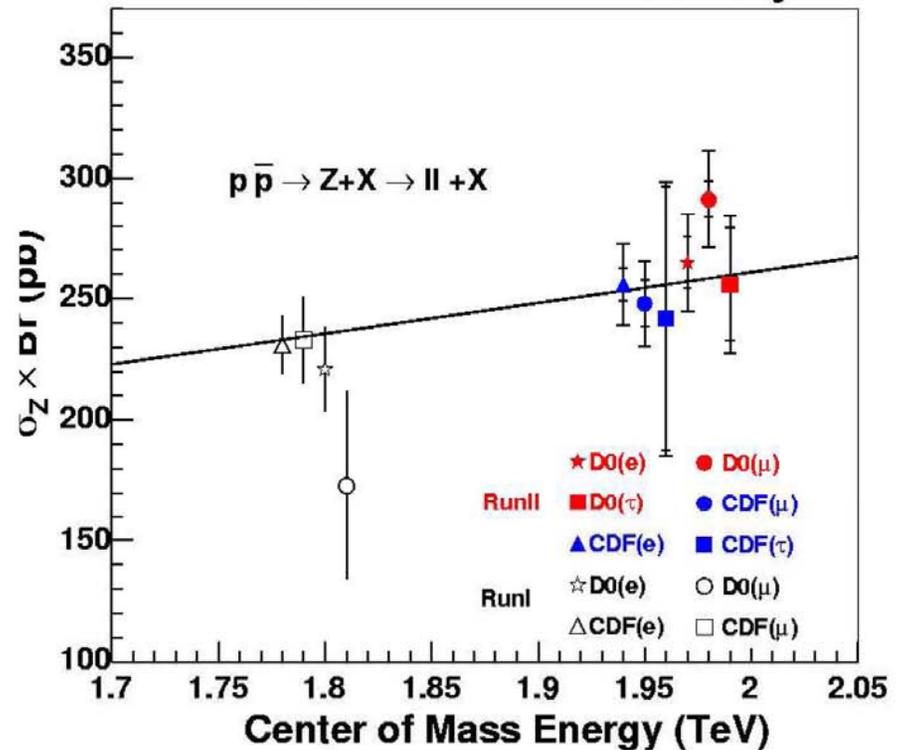
limitations: luminosité ($\pm 6.5\%$), PDF ($\pm 1.5\%$)

permet aussi de valider l'identification des leptons !

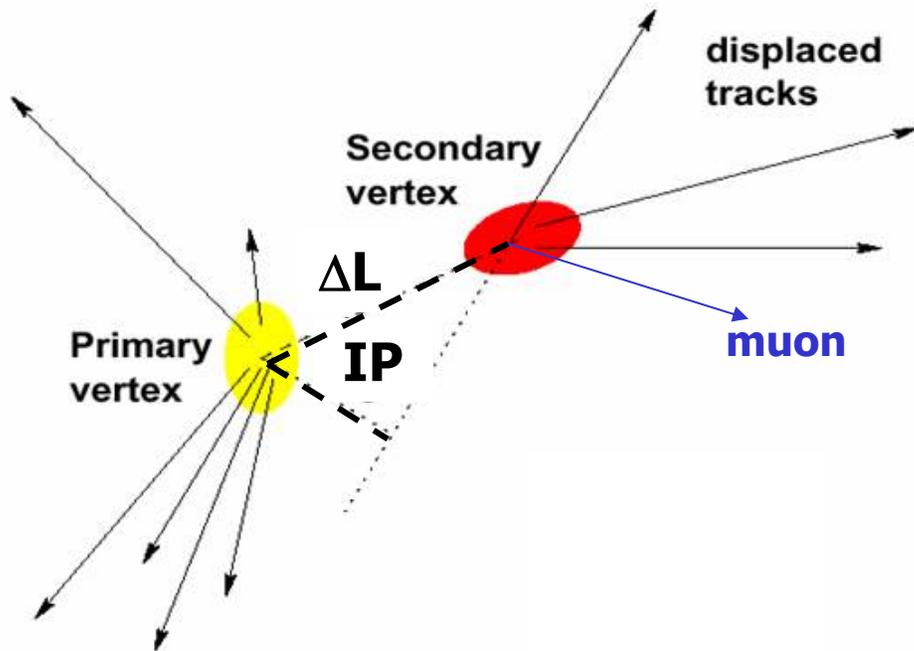
CDF and DØ RunII Preliminary



CDF and DØ RunII Preliminary



étiquetage des jets de quark b



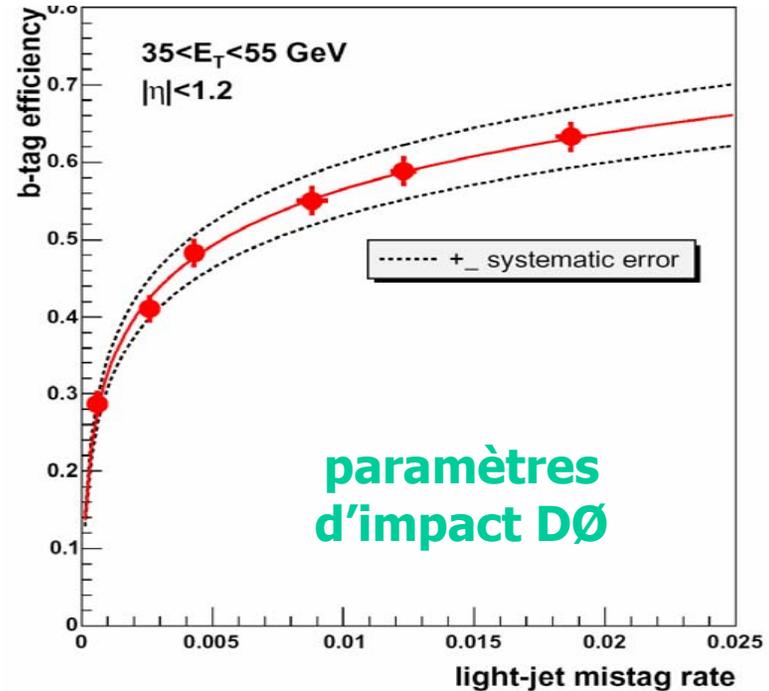
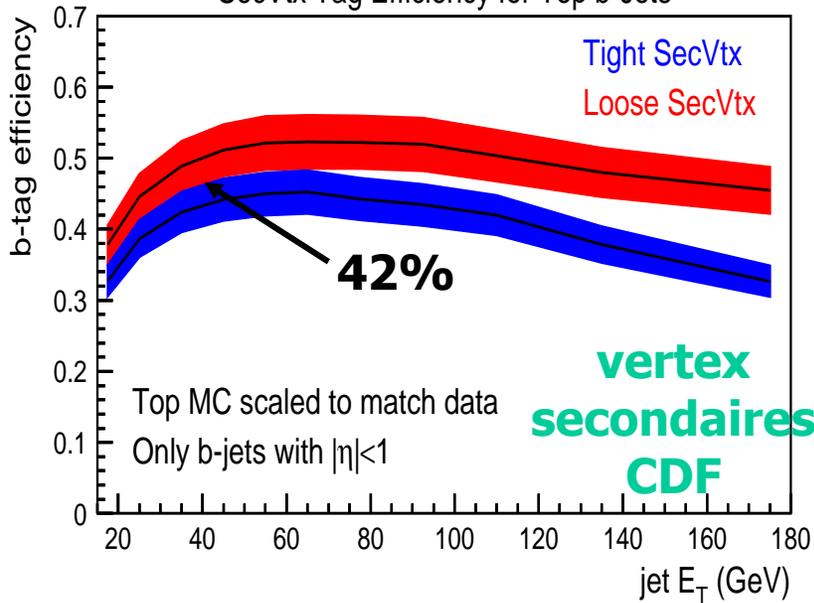
évaluation de l'efficacité

- "mistags" (quarks légers) : avec les ΔL et IP de signe négatif
- b-tagging: avec les jets b semi-leptoniques ($D\emptyset$: $b \rightarrow \mu$) ou avec la masse au vertex secondaire (CDF)

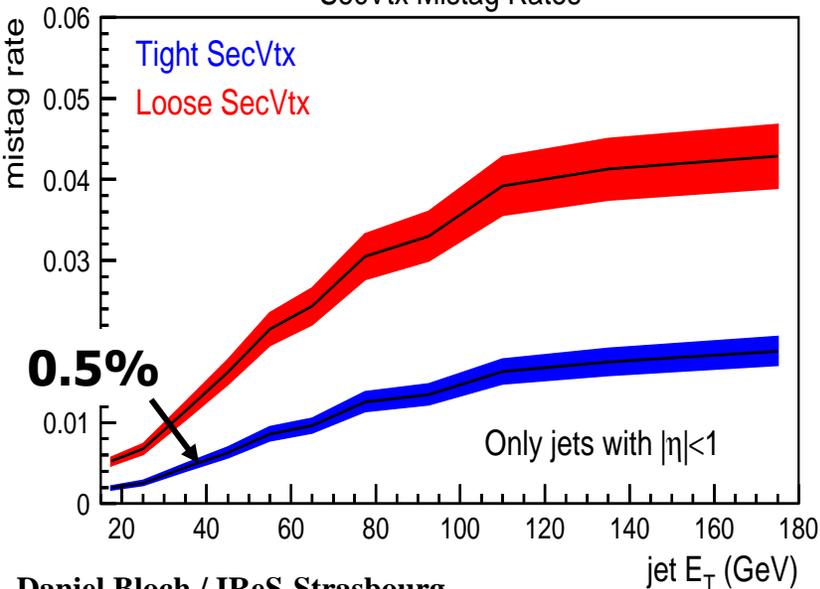
- indispensable pour le top, le Higgs, la SUSY, etc...
- spécificités des hadrons beaux: masse élevée, durée de vie ~ 1.5 ps, énergiques ($E_b/E_{jet} \sim 0.7$)
 $\Rightarrow \Delta L \sim 1-2$ mm, traces à grands paramètres d'impact (IP)
- reconstruction des vertex secondaires (mesure ΔL) ou des IP (comptage ou probabilité)
- ΔL ou IP de signe positif (négatif) si vertex secondaire en amont (en aval) du vertex primaire

performances des algorithmes

SecVtx Tag Efficiency for Top b-Jets



SecVtx Mistag Rates



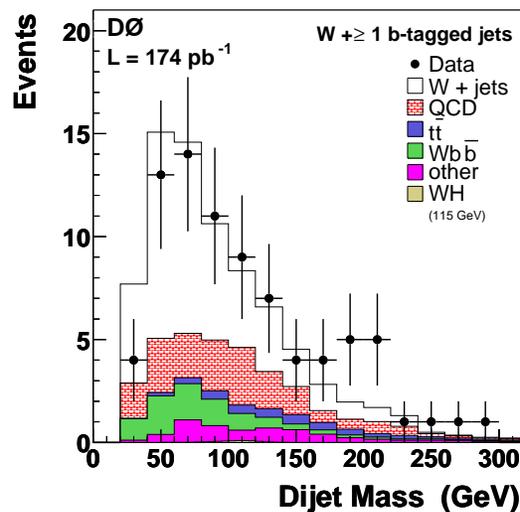
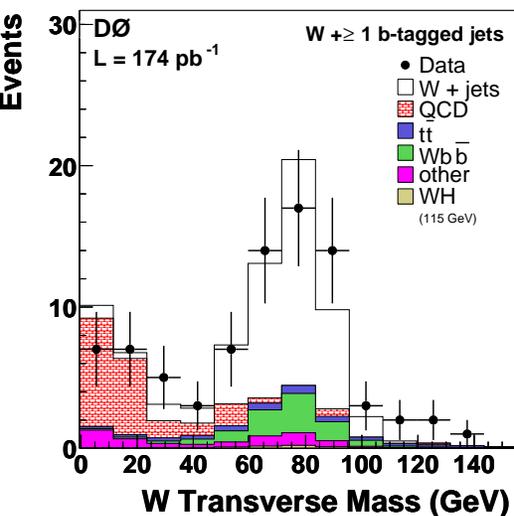
typiquement 40-50% d'efficacité de b-tagging pour 0.5-1% de mistags

production $Wb\bar{b}$ et Zb

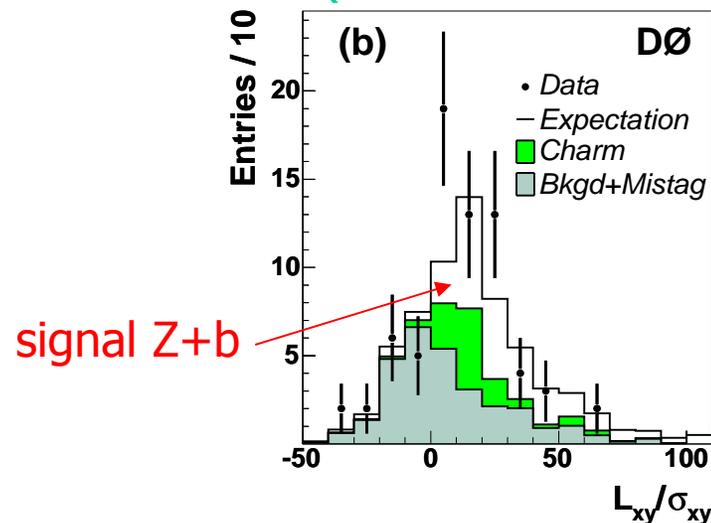
les $Wb\bar{b}$ sont un bruit de fond important pour le top, le Higgs...

DØ :

- $W \rightarrow ev + bb$: $p_T(e) > 20$ GeV, 2 jets $p_T > 20$ GeV
- comparés aux MC ALPGEN, PYTHIA + simulation détecteur et normalisés aux sections efficaces NLO (MCFM pour W+jets)
- sans b-tagging: 2540 evts observés, (2580 ± 630 attendus)
- ≥ 1 jet b-tag: 76 evts observés (73 ± 20 attendus) : données bien décrites par la simulation (syst.exp $\sim \pm 15\%$)



DØ: $\sigma(Z+b)/\sigma(Z+jets) = 2.3 \pm 0.4 \pm 0.3\%$ ($1.8 \pm 0.4\%$ th.NLO)

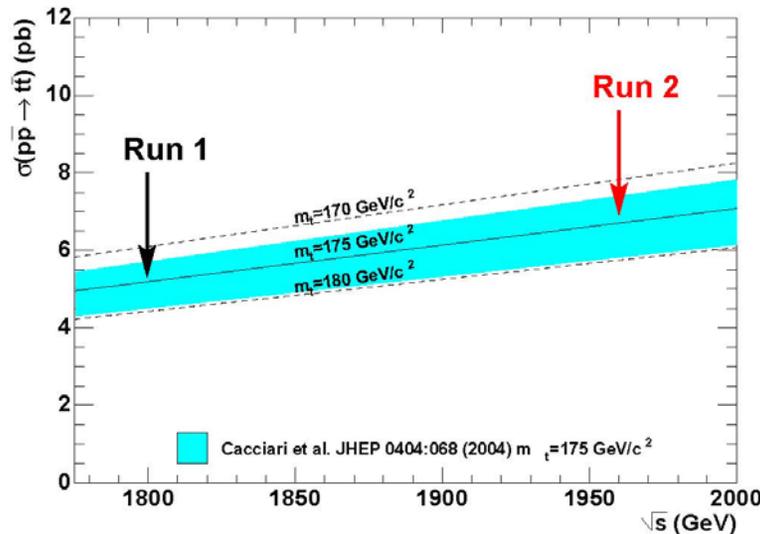


CDF: sec.eff "observée" $Wb\bar{b}/W+1,2jets = 0.72 \pm 0.24(stat) \pm 0.22(syst) \%$



section efficace de production $t\bar{t}$

- Mesurée dans différents états finaux : $l\bar{l}b\nu\nu$, $l\bar{l}b\bar{j}j\nu$, $j\bar{j}j\bar{j}j$
 - tester la cinématique (accord data/MC)
 - permet d'appliquer directement le b-tagging
 - tester la cohérence des différentes mesures
 - valider les sélections pour d'autres mesures (masse, hélicité W...)
- Test de la prédiction du Modèle Standard



valeur théorique : $\sigma(t\bar{t}) \sim 6.7 \text{ pb}$
avec incertitude $\pm 15\%$
(PDF, α_s , μ_r , μ_f)

- Sensibilité à de la nouvelle physique ?
 - bruit de fond pour le Higgs et de nombreux canaux SUSY

$\sigma(t\bar{t})$ dileptons

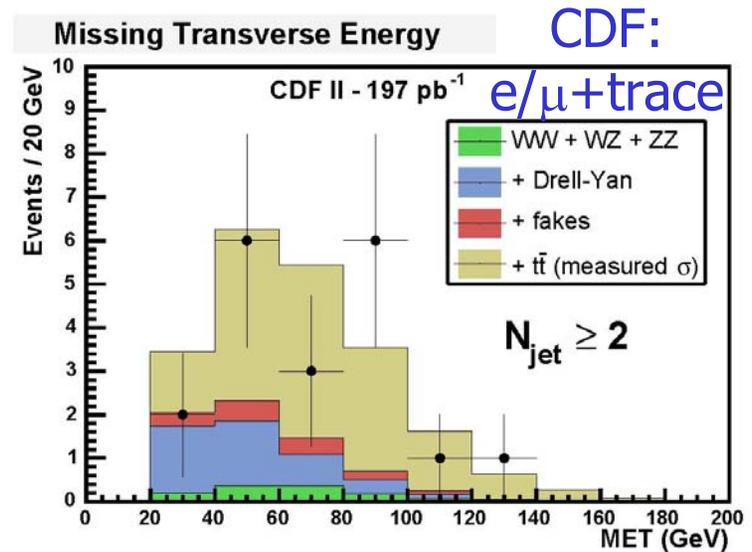
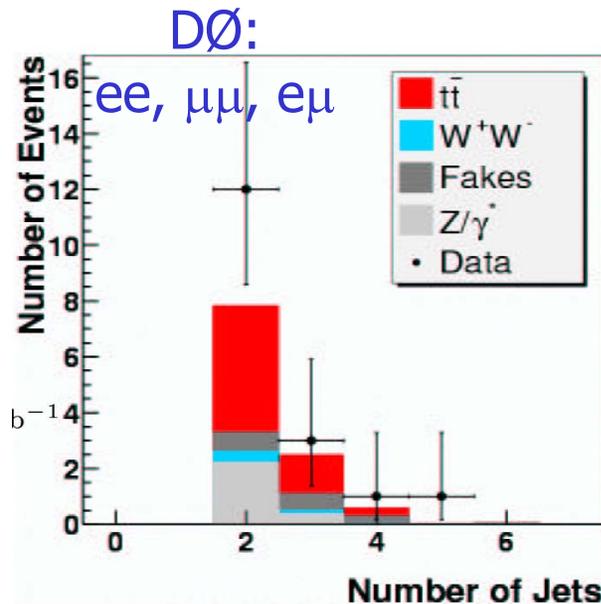
2 leptons + 2 jets b + ~~\cancel{E}_T~~ : faible bruit \Rightarrow mesure par comptage

$$\sigma(t\bar{t}) = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}}{\epsilon_{\text{tot}} \int \mathcal{L} dt}$$

N_{obs} : Number of observed candidates

ϵ_{tot} : Acceptance \times efficiency

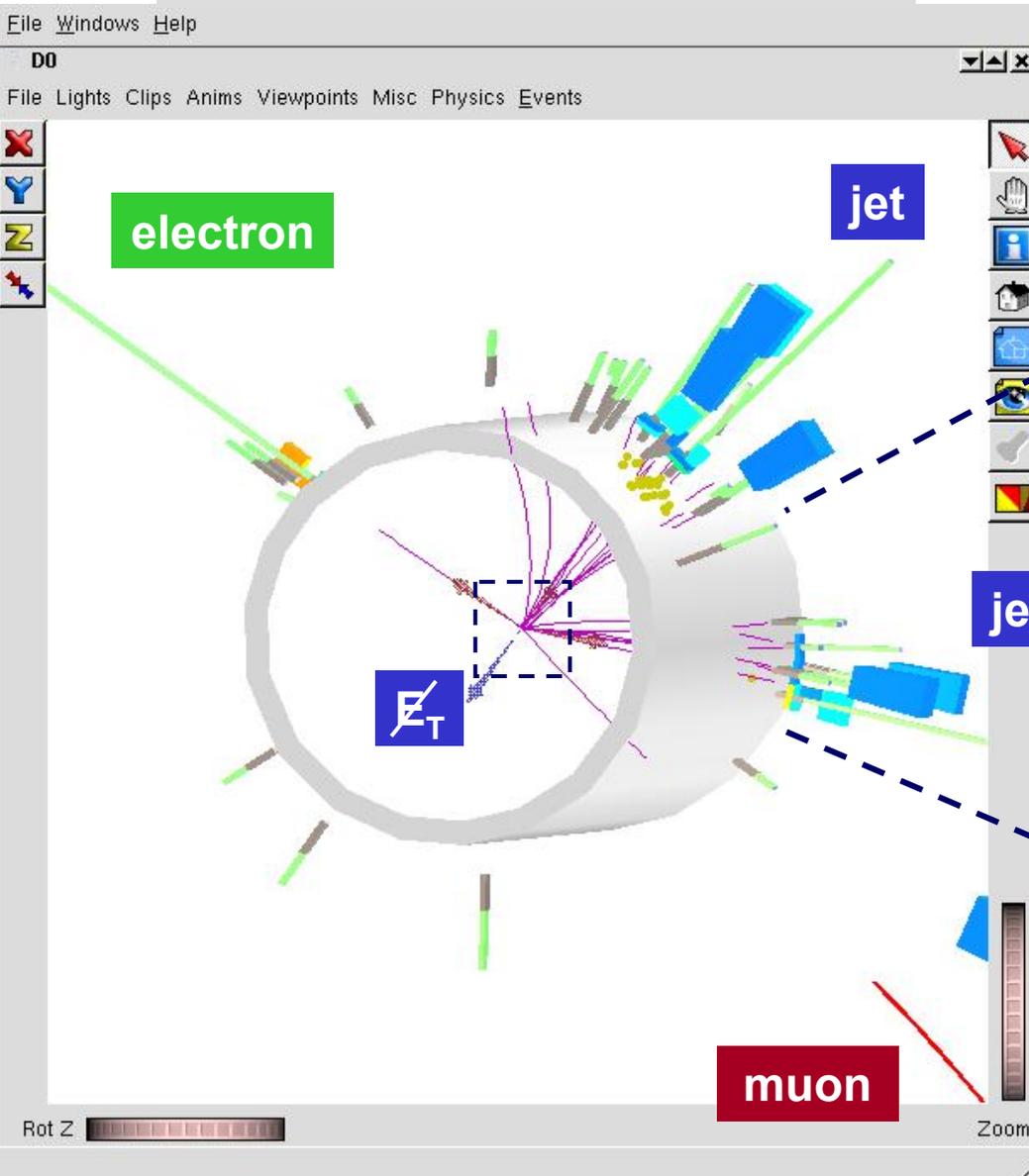
erreur syst
Lumi de $\pm 6.5\%$



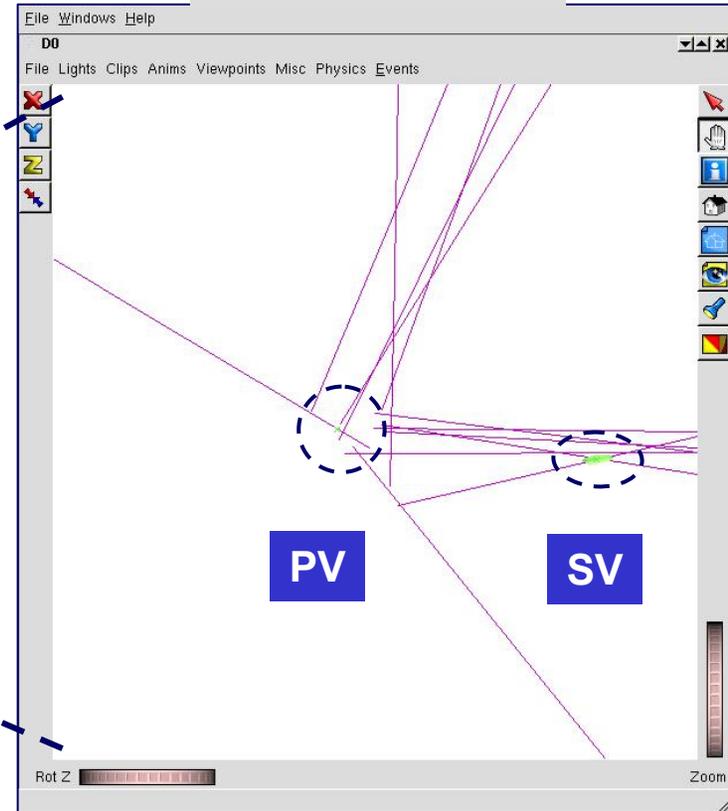
$$\sigma = 14.3_{-4.3}^{+5.1}(\text{stat})_{-1.9}^{+2.6}(\text{syst}) \pm 0.9(\text{lum}) \text{ pb} \quad (\text{DØ} \sim 150 \text{ pb}^{-1})$$

$$\sigma = 7.0_{-2.3}^{+2.7}(\text{stat})_{-1.3}^{+1.5}(\text{syst}) \pm 0.4(\text{lum}) \text{ pb} \quad (\text{CDF } 197 \text{ pb}^{-1})$$

Run / event: 169261 / 6854840



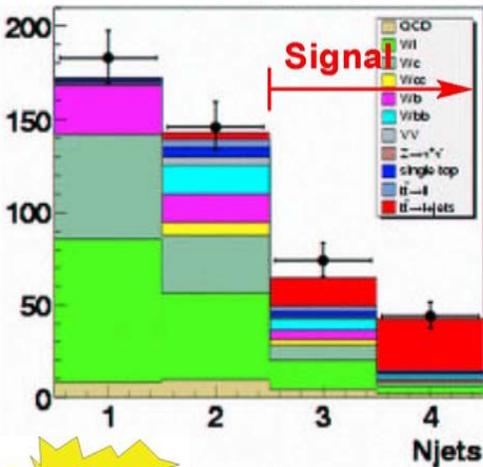
Two b-tagged jets



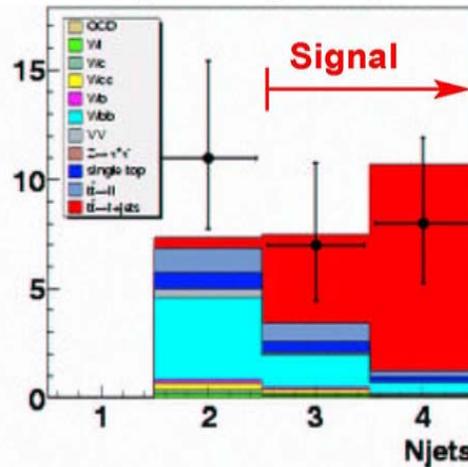
$\sigma(t\bar{t})$ lepton + jets avec b-tagging

$e/\mu + \geq 3$ jets dont 1 ou 2 jets b + ~~Et~~
bruits principaux: qcd multijets, W+jets (Wbb, Wc...)

1 b-tag sample

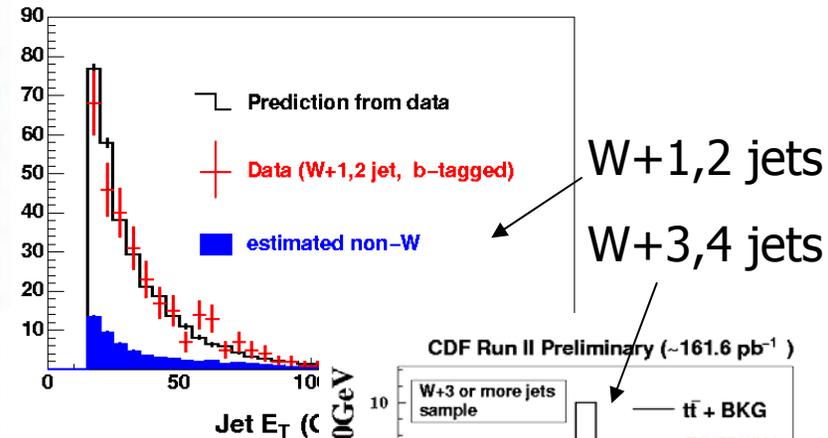


≥ 2 b-tag sample



comptage (fond calculé: DØ)

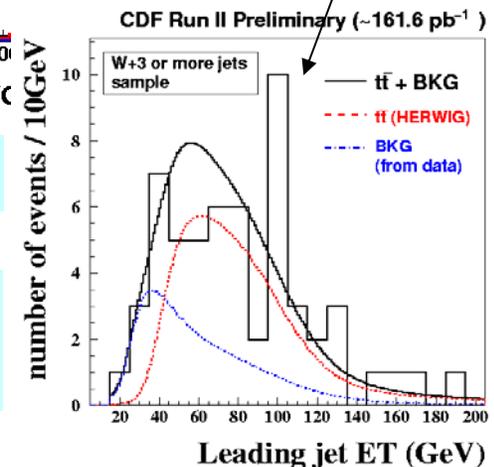
ou fit de E_T leading jet
(normalisation libre du fond: CDF)



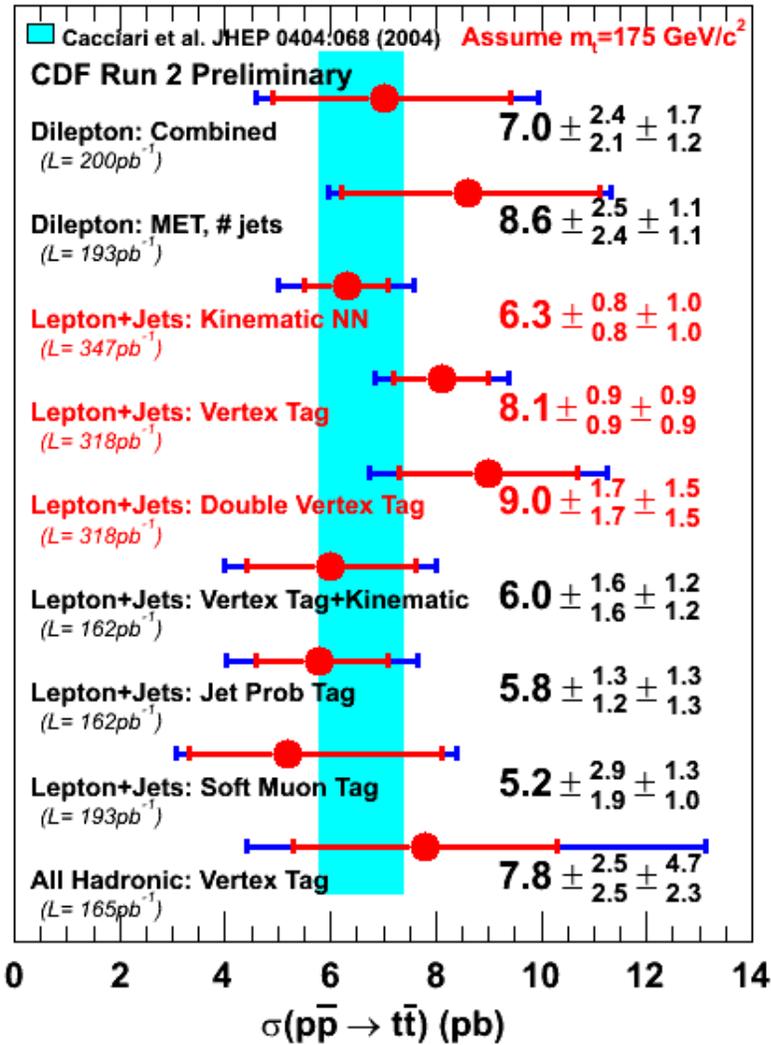
NEW
 $\sigma = 8.6 \pm 1.2(\text{stat}) \pm 1.3(\text{syst}) \text{ pb (DØ)}$

$\sigma = 6.0 \pm 1.6(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst}) \text{ pb (CDF)}$

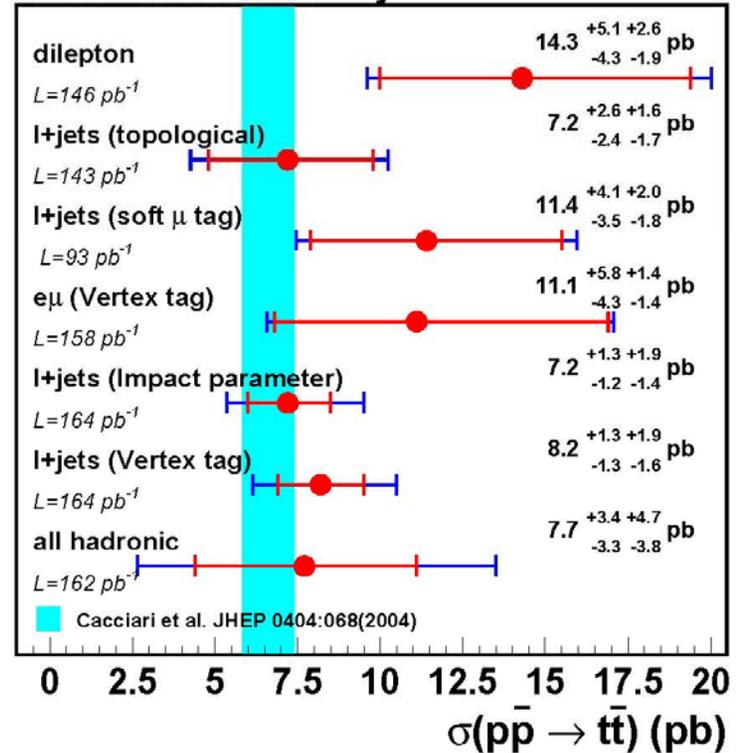
NEW
CDF Sec.Vtx.Tag (+ coupures $M_t(W)$ et $H_t (= \sum E)$):
 $\sigma = 7.9 \pm 0.9(\text{stat}) \pm 0.9(\text{syst}) \text{ pb}$



compilation sections efficaces $t\bar{t}$

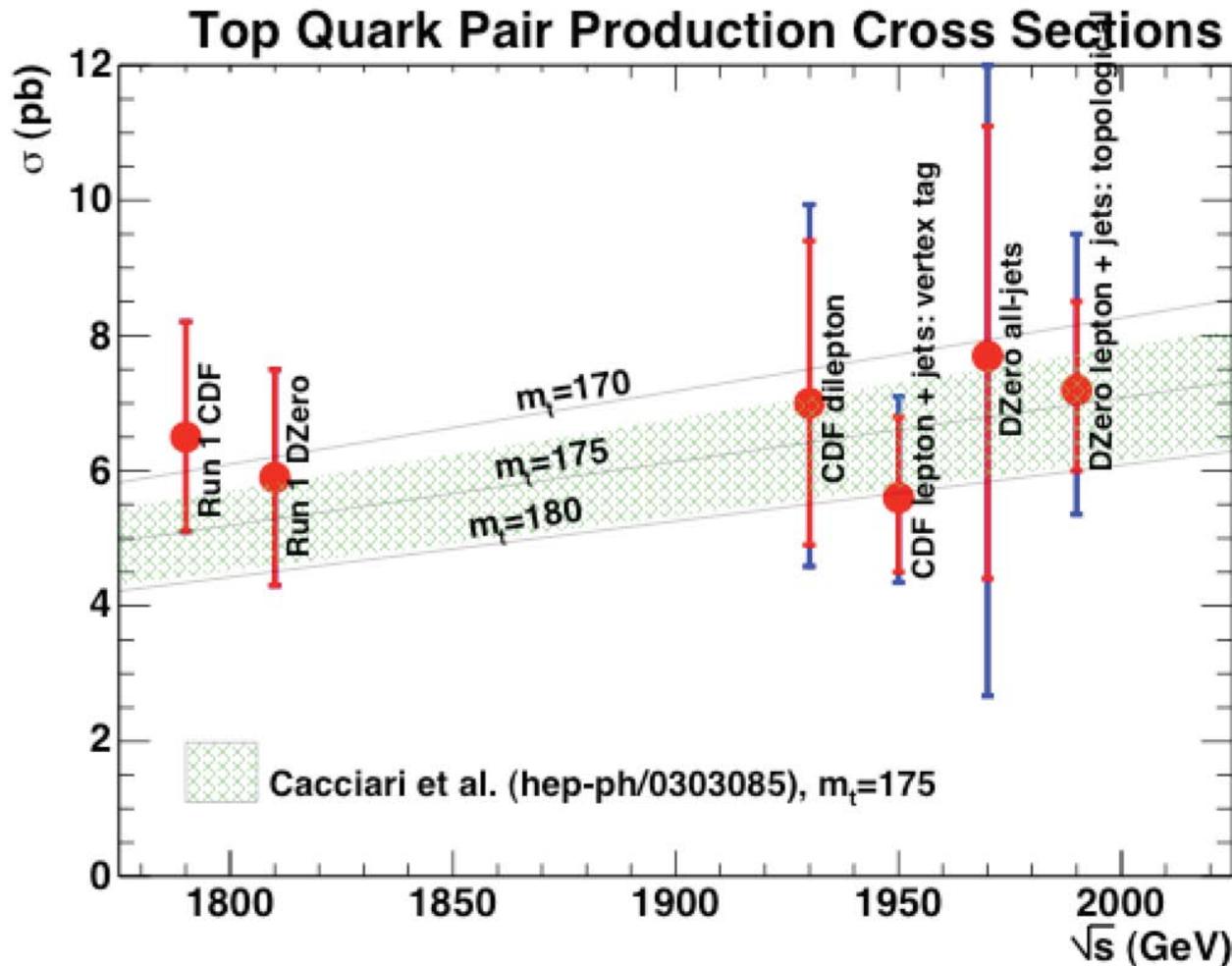


DØ Run II Preliminary



bon accord entre les mesures et avec la théorie

comparaison avec la théorie



la précision actuelle est de $\pm 20\%$, l'objectif est de la réduire à $\pm 10\%$ (combinaison des résultats, plus de stat.)

mesure de $R = \text{Br}(t \rightarrow Wb) / \text{Br}(t \rightarrow Wq)$

- Dans le modèle Standard, le top se désintègre presque exclusivement en Wb , car:
 - 3 familles de quarks et leptons et unitarité de la matrice CKM
 - $|V_{ub}|$ et $|V_{cb}|$ sont petits
- $R = \text{Br}(t \rightarrow Wb) / \text{Br}(t \rightarrow Wq) = |V_{tb}|^2 / (|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2)$
• $\approx |V_{tb}|^2 > 0.998$ (90% CL) [pdg]
- Toute déviation de $R = 1$ serait un signe de nouvelle physique
- Comptage des candidats $tt \rightarrow l + \text{jets}$ avec 0, 1, 2 jets taggés b:

$$N_{0\text{-tag}} = N_{tt}(1 - R\epsilon_b)^2$$

$$N_{1\text{-tag}} = 2N_{tt}(R\epsilon_b)(1 - R\epsilon_b)$$

$$N_{2\text{-tag}} = N_{tt}(R\epsilon_b)^2$$

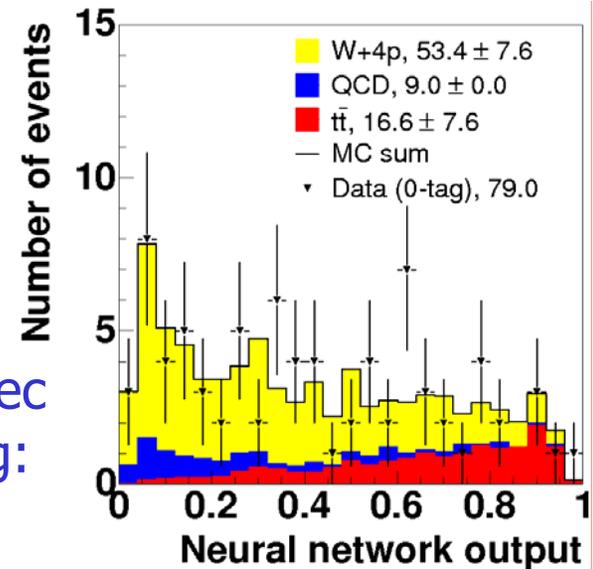
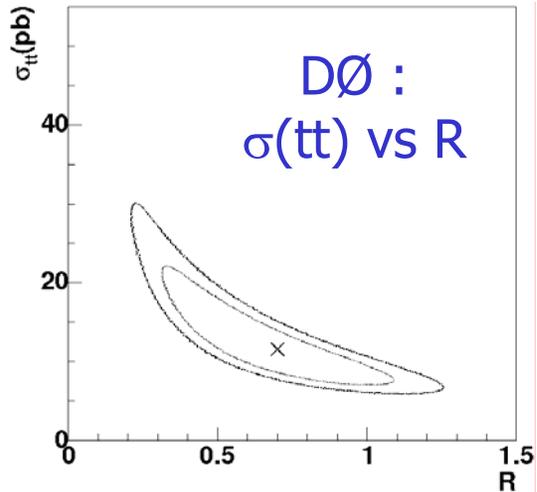
ϵ_b = efficacité de b-tagging
équation valide si pas de bruit

dans la pratique : fit à
plusieurs variables (likelihood)

mesures de R

$$CSIP : R = 0.65_{-0.30}^{+0.34}(stat)_{-0.12}^{+0.17}(syst)$$

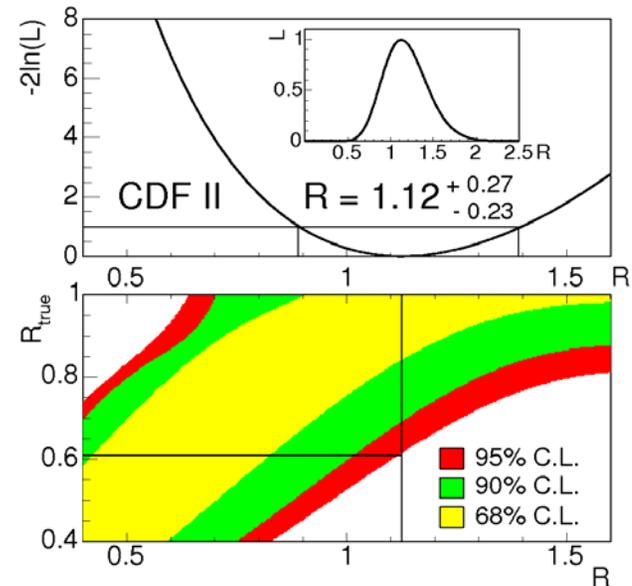
$$SVT : R = 0.70_{-0.24}^{+0.27}(stat)_{-0.10}^{+0.11}(syst)$$



CDF avec
0 b-tag:

$$R = 1.12_{-0.19-0.13}^{+0.21+0.17} \text{ (stat + syst)}$$

← mesure R

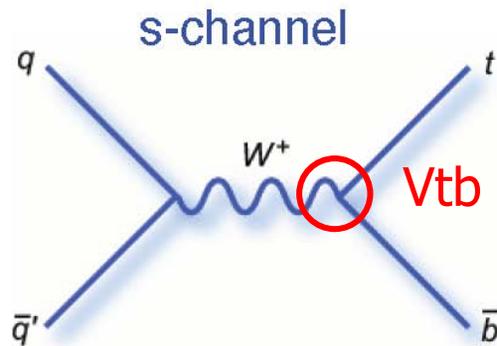


$$R > 0.61 \text{ at the 95\% CL}$$

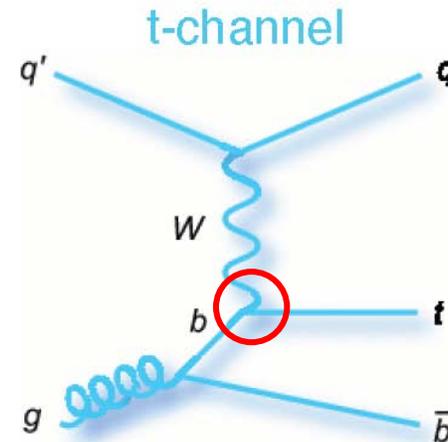
← ou limite inférieure

$$|V_{tb}| > 0.79 \text{ at 95\% CL si SM et 3 familles}$$

à la recherche du single top



$0.88 \pm 0.11 \text{ pb}$

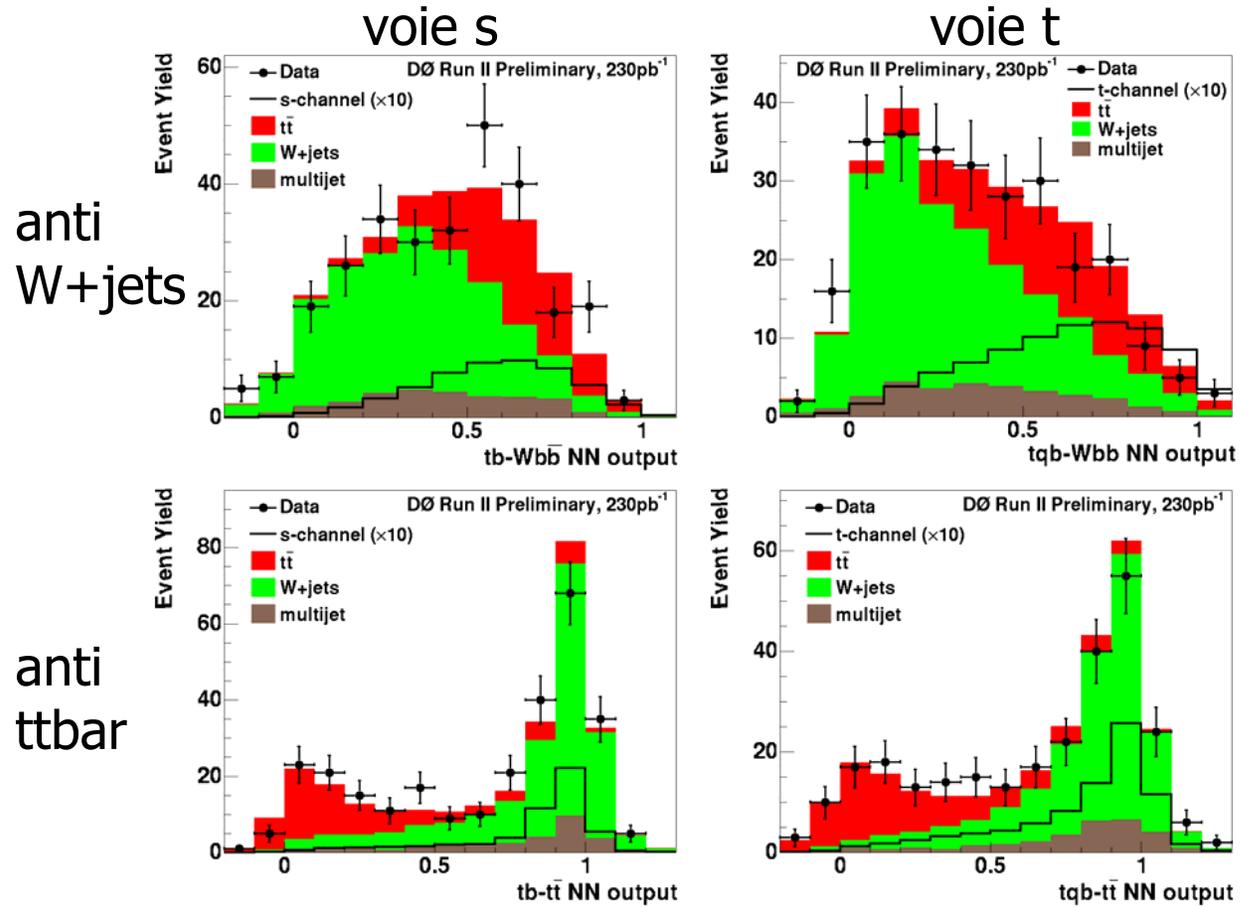


$1.98 \pm 0.25 \text{ pb}$ (th. NLO)

- le quark top peut aussi être produit par interaction faible
→ permet une mesure directe de $|V_{tb}|$
- mais pas encore observé !
- section efficace single top seulement 2 fois plus faible que $t\bar{t}$, mais bien plus de bruit de fond (surtout W +jets et $t\bar{t}$) car il y a moins de jets ici (~ 2 au lieu de $\geq 3-4$)
- 1-2 jets de quark b dans chaque événement → b-tagging

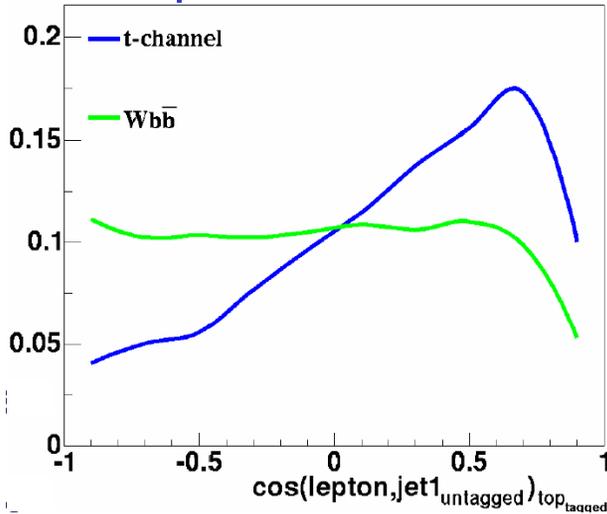
analyse single top dans DØ

- utilise 11 variables topologiques (info énergies, angles, masse évaluée du top)
- distingue e ou μ +jets, simple et double b-tag, voies s et voie t
- 3 analyses indépendantes: **coupures séquentielles**, **arbre de décision** et **Neural Network** (avec 2 NN's: contre les W+jets et contre les t \bar{t})

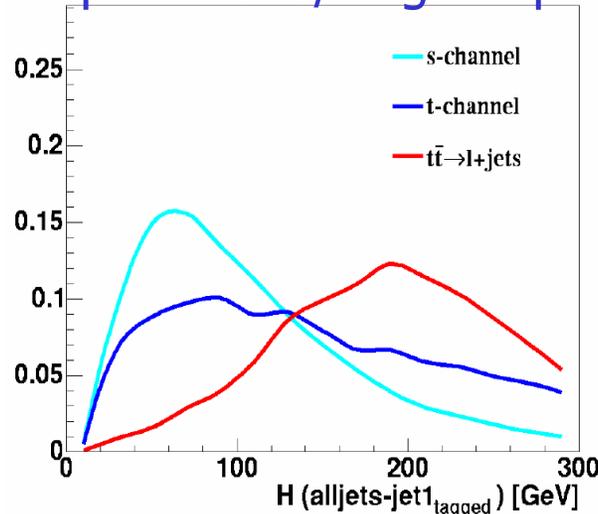


quelques variables discriminantes

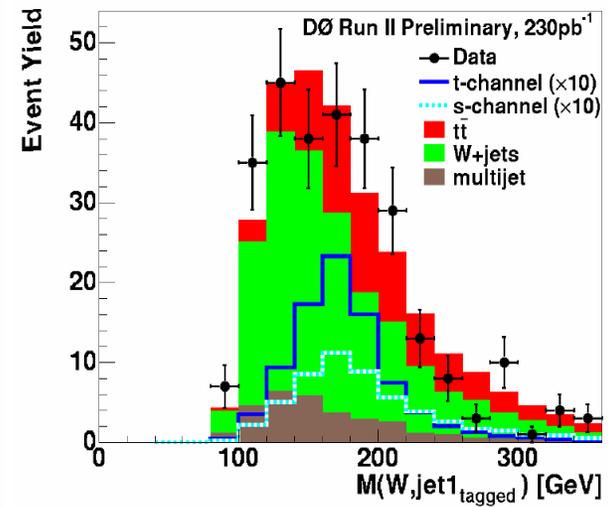
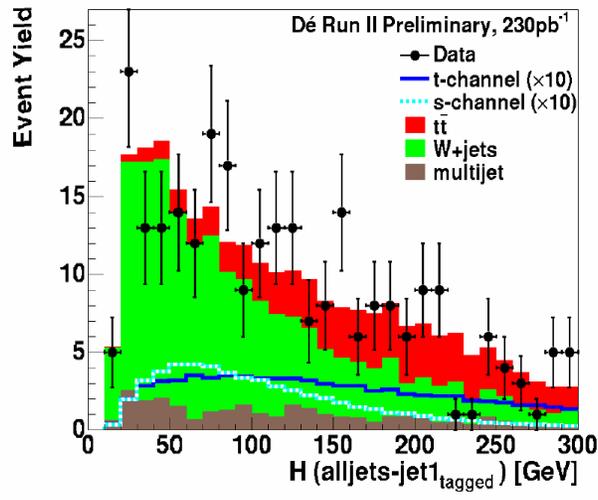
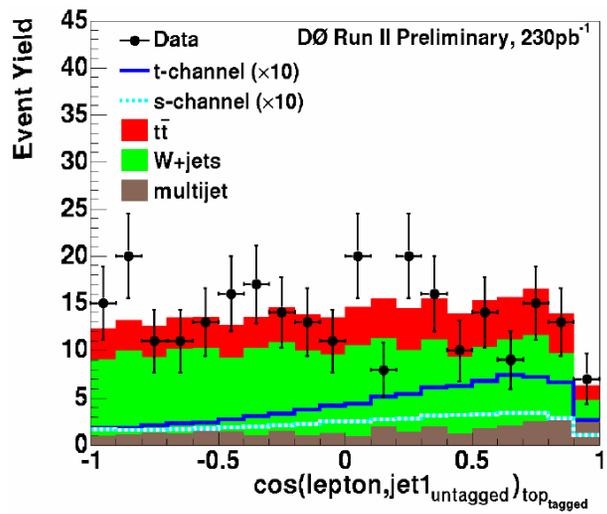
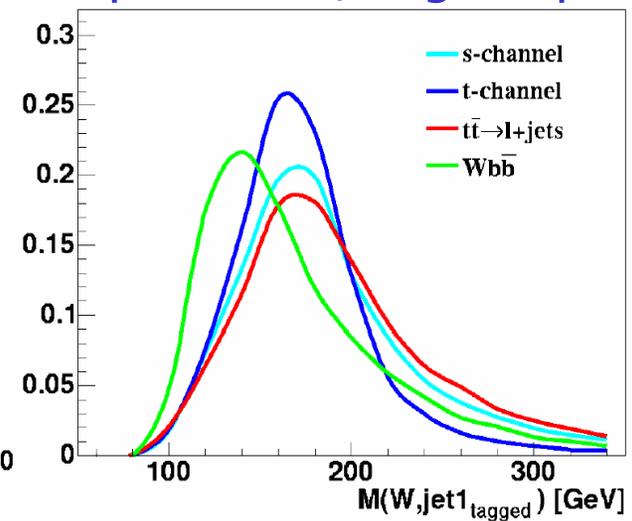
angle lepton-jet(non-b)
pour la voie t



somme des energies
pour $t\bar{t}$ /single top



masse du top
pour $Wb\bar{b}$ /single top



résultats single top

NEW

Upper limits on production cross-section (pb) at 95% CL



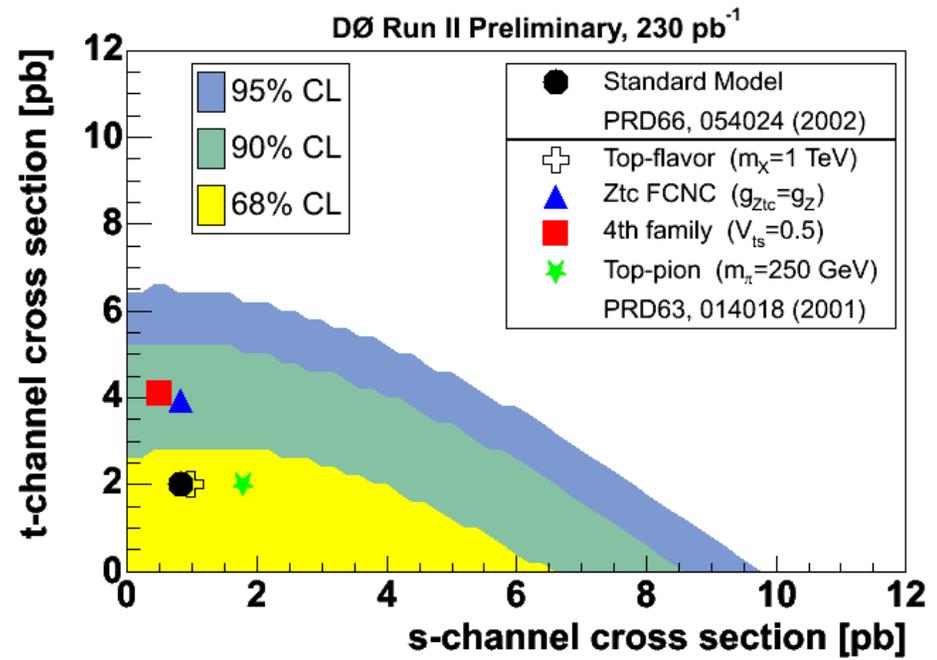
	s-channel	t-channel
Cut-based	10.6 (9.8)	11.3 (12.4)
Decision Tree	8.3 (4.5)	8.1 (6.4)
Neural Network	6.4 (4.5)	5.0 (5.8)

(en cours de publi)

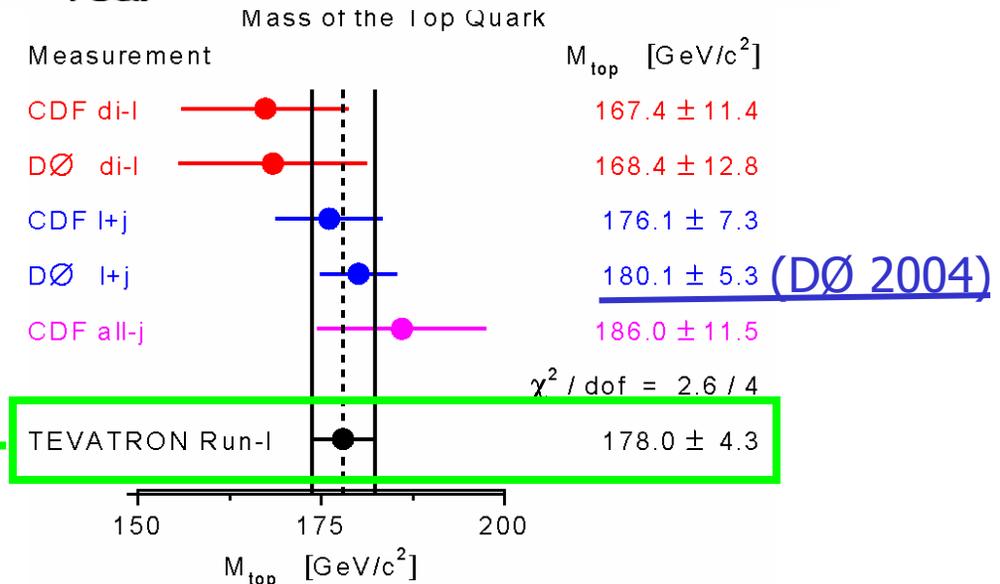
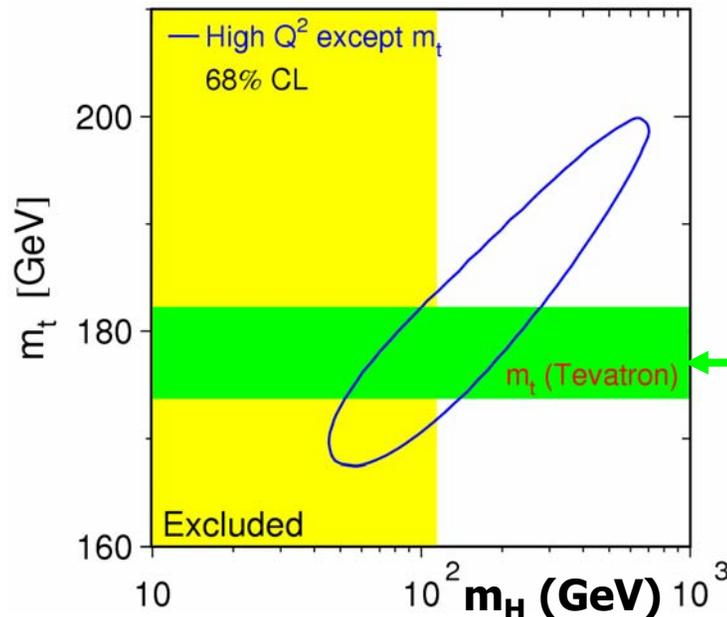
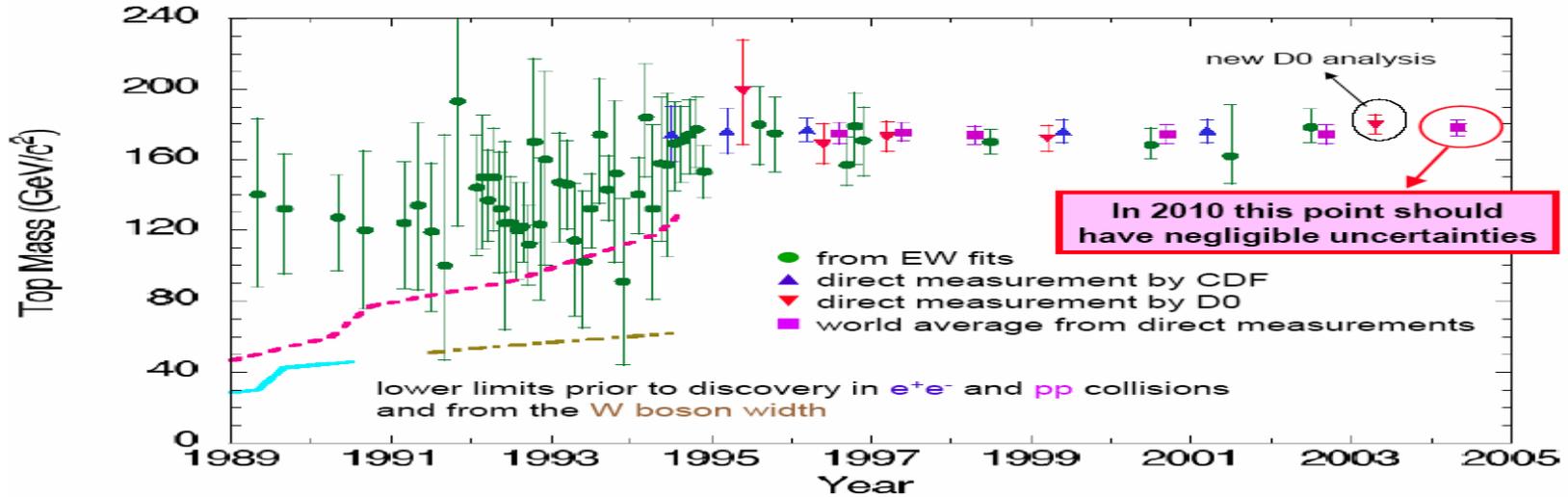
meilleure limite actuelle (2 fois plus faible que CDF)

limite mesurée
(sensibilité attendue)

mais l'observation demandera encore ~ 10 fois plus de données, si pas d'amélioration sur ces méthodes, déjà bien sophistiquées...



masse du top : état des lieux



publiées (Run I) : 178.0 ± 4.3 GeV

méthode des éléments de matrice

- utilisée par **DØ au Run I** : canal lepton+jets, sans b-tagging
- prend en compte les 12 permutations possibles entre jets et les 2 solutions d'impulsion (Pz) pour les neutrinos
- Une probabilité est calculée pour chaque combinaison, dépendant des informations cinématiques, et contrainte par la section efficace théorique (LO)

$d^n\sigma$ = section efficace : élément de matrice LO

$W(x, y)$ = probabilité pour un parton avec une variable y d'être mesurée avec une valeur x

$$P(x; M_{top}) = \frac{1}{\sigma} \int d^n\sigma(y; M_{top}) dq_1 dq_2 f(q_1) f(q_2) W(x, y)$$

$f(q)$ = probabilité pour un parton d'avoir une impulsion q

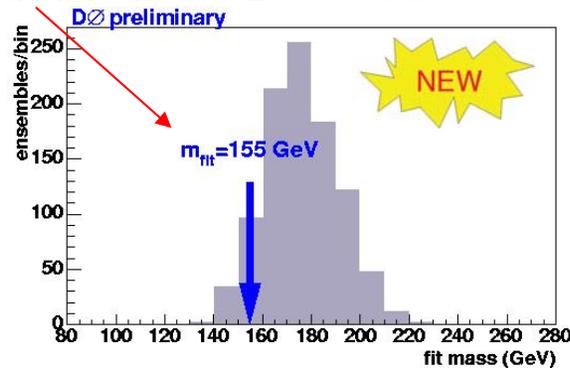
DØ Run I, Nature 429 (2004) 640 : $m(top) = 180.1 \pm 5.3 \text{ GeV}$

mesure de $m(\text{top})$ au Run II : DØ

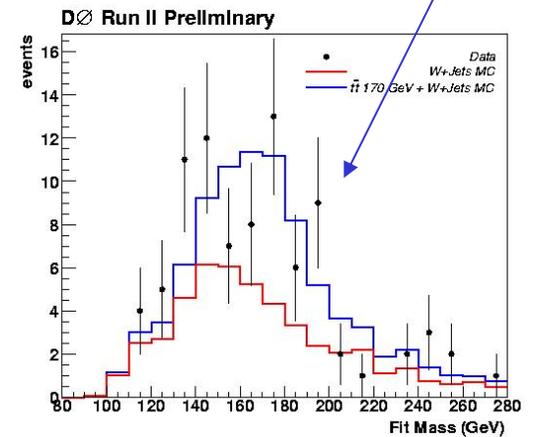
seulement des résultats préliminaires pour le moment (avec $160\text{-}230 \text{ pb}^{-1}$)
la systématique principale est la correction en énergie des jets...

di-leptons : 13 evts, 3 bdf attendus
pondère chaque événement vs hyp. de masse, likelihood fit: $155 \pm 14 \pm 7 \text{ GeV}$

- précision proche du Run I
- améliorations en vue

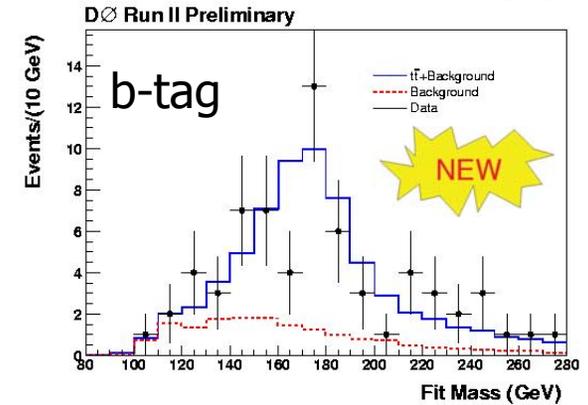
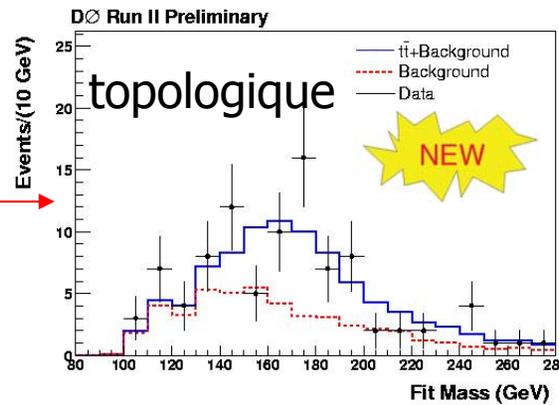


I+jets ideogramme (2004) :
toutes permutations de jets
likelihood (multi-variables) :
 $170 \pm 7 \pm 8 \text{ GeV}$



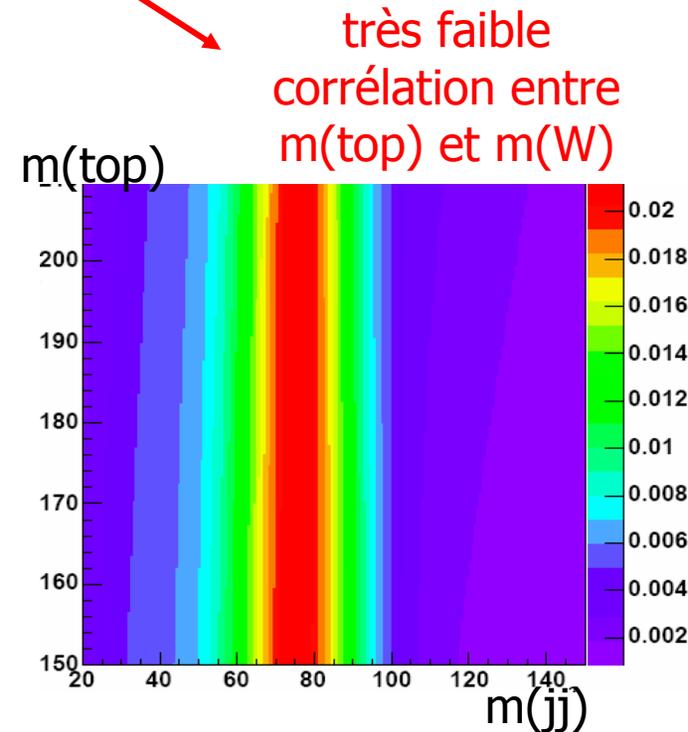
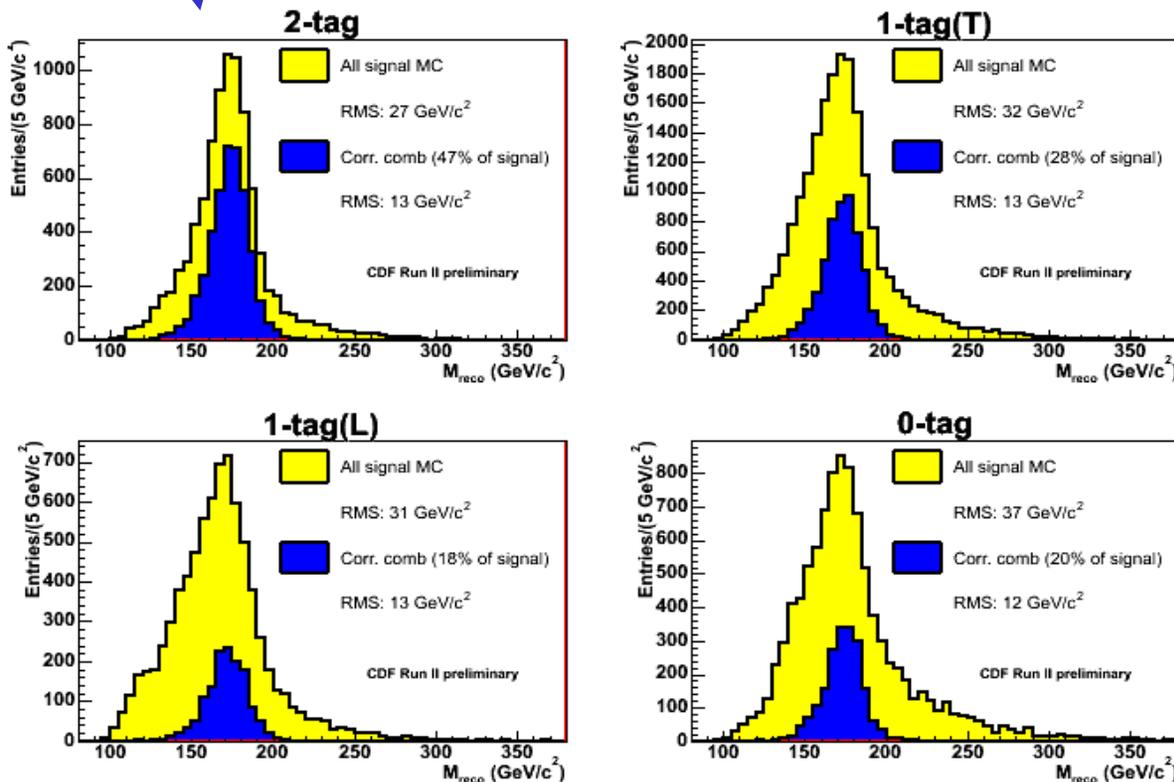
I+jets templates : analyses topologiques et b-tagging
fit cinématique: permutation de meilleur χ^2 retenue
mass templates fit:

$170 \pm 6 \pm 7 \text{ GeV}$ (topo)
 $171 \pm 4 \pm 6 \text{ GeV}$ (b-tag)



méthode des templates : CDF

- distingue 4 lots lepton+jets suivant le nb de jets b-tag:
 - 2 tags ou 1 tag Tight (grand poids) ou 1 tag Loose ou 0 tag (plus faible poids)
- mesure $m(\text{top} \rightarrow l\nu b)$, mais aussi "simultanément" $m(W \rightarrow jj)$, ou plutôt la correction en énergie JES (Jet Energy Scale) à appliquer (exprimée en $\sigma(\text{JES})$)

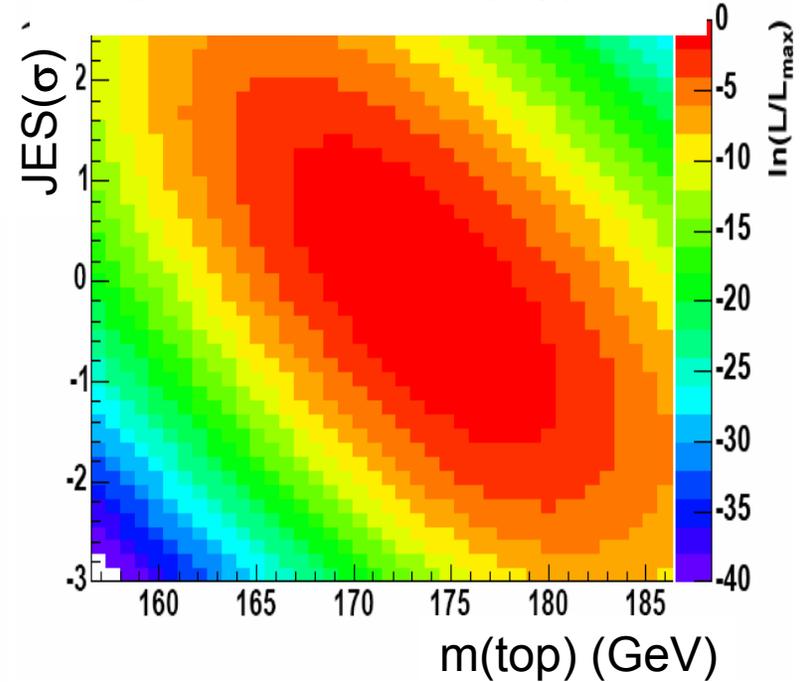


templates CDF : fit 2D

NEW

fit combiné $m(\text{top})$ et JES:
réduit de 20% l'erreur syst. JES !

-Log Likelihood vs $m(\text{top})$, JES

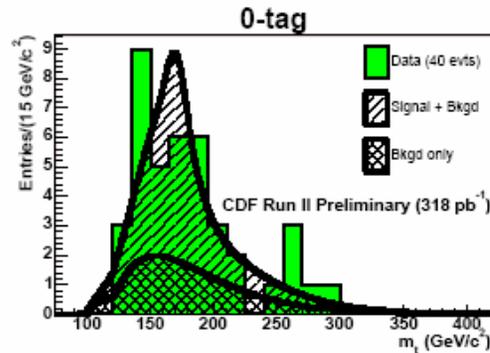
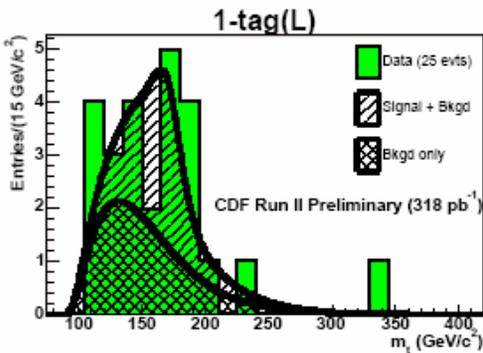
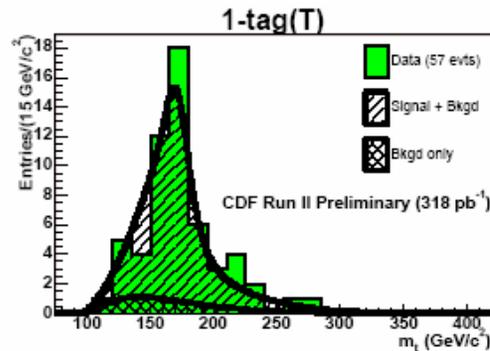
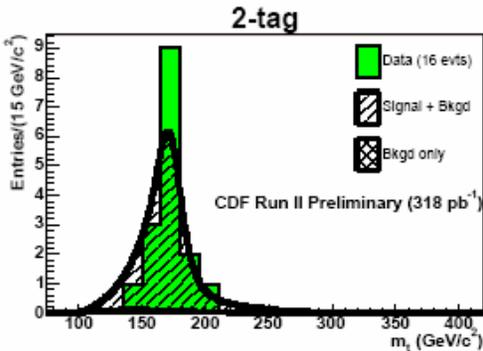


$$\text{JES} = -0.10^{+0.78}_{-0.80} (\text{stat}) \sigma$$

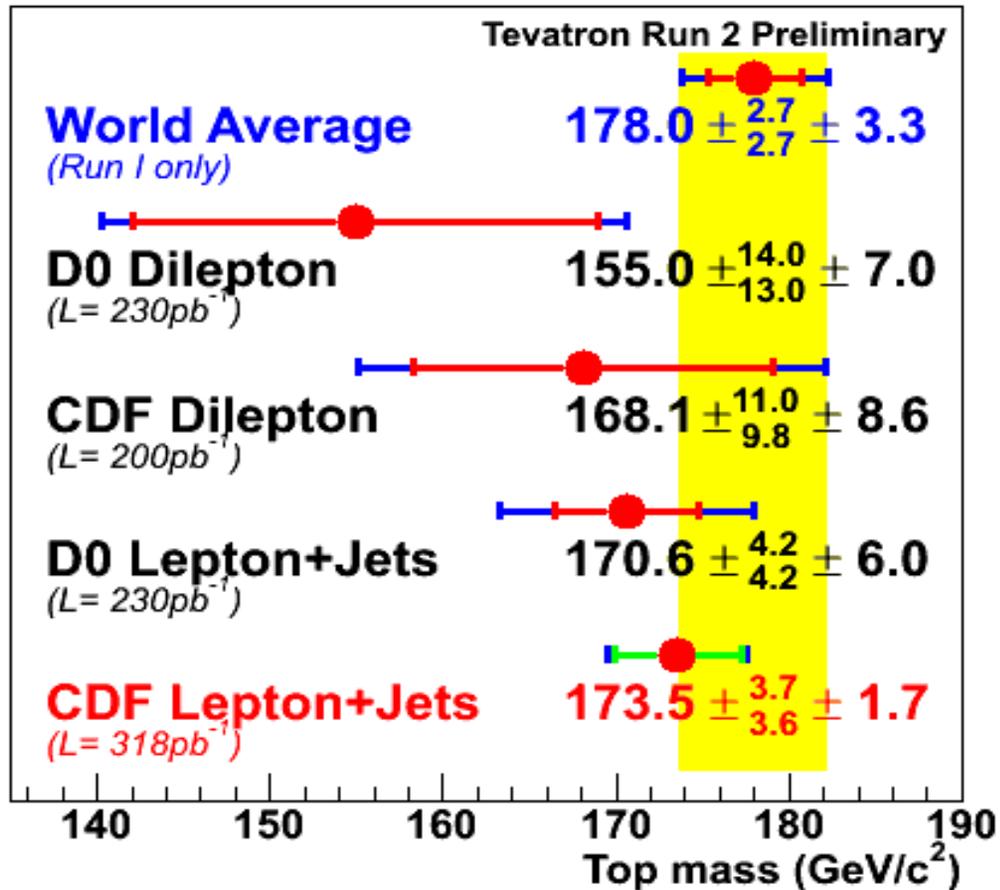
$$M_{\text{top}} = 173.5^{+3.7}_{-3.6} (\text{stat} + \text{JES}) \pm 1.7 (\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$$

$$= 173.5^{+4.1}_{-4.0} \text{ GeV}/c^2$$

la meilleure
mesure à ce jour !



masse du top : résumé au Run II



l'objectif d'atteindre une précision de ± 2 GeV
au Run II semble donc réaliste !

Conclusion

- Les analyses sur le top sont désormais plus précises qu'au Run I
- la statistique va encore augmenter : 200-400 pb⁻¹ exploités actuellement, 700 pb⁻¹ sont déjà sur bandes, on prévoit ~ 2 fb⁻¹ en 2006, ~ 4 fb⁻¹ en 2007, ~ 8 fb⁻¹ en 2009
- mais un gros effort doit (peut) encore être fait sur les systématiques (correction en énergie des jets entre autre)
à noter que certaines systématiques diminueront aussi avec une plus grande statistique (uniformité du calo, E(jet b) avec Z→bb)
- l'acceptance peut encore augmenter : meilleure identification des électrons, des muons, meilleur b-tagging (aussi DØ track trigger en 2005)
- upgrade pour 2006 (DØ):
 - nouveau layer 0 du détecteur Si (à R=1.5 cm au lieu de 2.6 cm)
 - proposal pour avoir un taux d'acquisition supplémentaire de 50 Hz dédié à la physique du B (Δm_s en particulier)