Le quark top
Première partie

Plan de l'exposé (première partie)

- Introduction
  - *Carte d'identité du quark top*
  - *La découverte du quark top: une longue histoire*
  - *Production et désintégration*

- Contexte expérimental : le Tevatron et le LHC

- Erreurs systématiques pour la physique du quark top

- Section efficace de production (top-antitop)
  - *Prédictions théoriques*
  - *Mesures au Tevatron*
  - *Potentiel au LHC*

- Production électrofaible du quark top

Plan de l'exposé (deuxième partie)

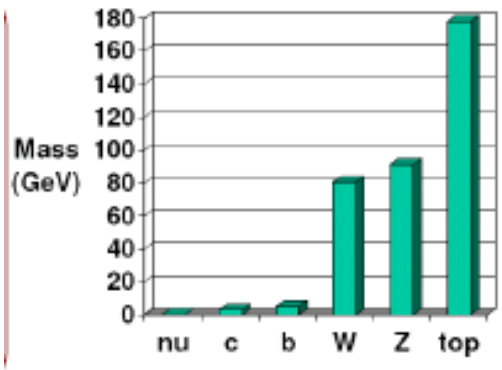
- Mesure des caractéristiques du quark top
  - *Masse*
  - *Largeur*
  - *Spin*

- Le quark top : une sonde pour la physique au-delà du Modèle Standard

- Premiers résultats au LHC:
  - *Redécouverte*
  - *Vers une mesure de section efficace*

Le quark top, une particule instructive

- Carte d'identité:
  - *Partenaire $SU(2)_L$ du quark b* $\begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}$
    - Q = 2/3, T_3=1/2
  - *Couplage de Yukawa y_{top} = 1 (m_{top} = yt v √2)*
    - « magique »?
    - Le top a un rôle particulier dans la brisure de symétrie électrofaible
  - *Quark le plus lourd (atome d'or!):*
    - 40 * m(quark b)
    - M_{top} = 173.3 ± 1.1 GeV/c^2 (Tevatron)



  - *Produit essentiellement (en collisionneurs hadroniques) par interaction forte (paires top-antitop)*
    - Largeur:

$$\Gamma = \frac{G_F}{(\hbar c)^3}\frac{m_t^3}{8\pi\sqrt{2}}\left(1-\frac{M_W^2}{m_t^2}\right)^2\left(1+2\frac{M_W^2}{m_t^2}\right)$$

    - Soit 1.5 GeV environ
    - i.e. une durée de vie de 5x 10^{-25} s, << temps d'hadronisation

Le quark top, une particule instructive

- Le top quark existe et sera produit abondamment

- Dans le cadre du Modèle Standard: les masses du top et du W contraignent la masse du boson de Higgs:
  - ☞ *À travers les corrections radiatives*
  - ☞ *Test de précision du Modèle Standard via la masse du quark top*

- Au-delà du Modèle Standard : nouvelle physique?
  - – *De nombreuses nouvelles particules se couplent au top*
  - – *Etude détaillée du top → découverte de nouvelle physique*

- Le top quark, une source de bruit de fond incontournable:
  - – *Les quarks top sont une source de bruit de fond importante pour de nombreux signaux de physique*
  - – *En particulier pour les découvertes: ttH (H→bb), tt+jets en SUSY, paires de stop,..*
  - – *Essentiel de le comprendre précisément*

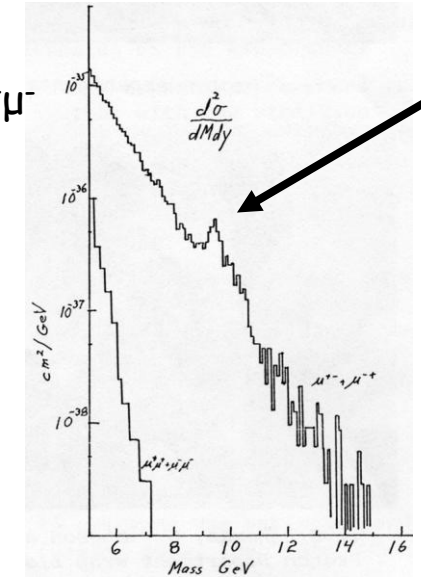
- Pour les détecteurs, un outil de précision:
  - – *Calibration de l'énergie des jets, de l'étiquetage des b, notamment.*

Découverte du quark top

- Nécessité d'un quark top:
  - *1974 : 2 familles de quarks et de leptons*
  - *1975: découverte du τ (SLAC)*

    →Une troisième famille de quarks est nécessaire
  - *1977 : découverte du quark b (résonance Ψ), Fermilab*

Spectre $\mu^+\mu^-$



Le quark b doit avoir un partenaire électrofaible: le quark top

Découverte du quark top

- Recherche directe:
  - *Recherche d'un toponium (état lié ttbar) aux alentours de 27 GeV/c^2*
    - la masse du quark top était attendue aux alentours de 15 GeV/c^2

      (masses s/c/b : 0.5/1.5/4.5 -> m_{top}~15 GeV/c^2)
  - *Recherche aux collisionneurs e^+e^- :*
    - DESY-PETRA (1980) : $\sqrt{s}$ = 12 -36 GeV → m_{top} > 30 GeV/c^2
    - LEP 1 (1989), étude de Z→ ttbar , avec $\sqrt{s}$ = 91 GeV → m_{top} > 45.5 GeV/c^2
  - *Recherche aux collisionneurs $p\bar{p}$:*
    - UA1 et UA2 (1981 -> 1990) , $\sqrt{s}$ = 640 GeV → m_{top} > 69 GeV/c^2
    - « fausse découverte » par UA1 in 1984 (m_{top}= 40 GeV/c^2) : 9 evts de signal/ 0.2 evts de fond (bruit de fond sous-estimé)
    - Tevatron (1990 → 1992), $\sqrt{s}$ = 1.8 TeV → m_{top} > 91 GeV/c^2

Découverte du quark top

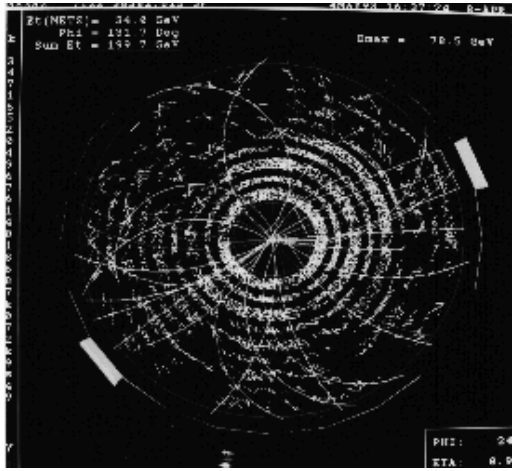
- Découverte (1995, Tevatron):

Physicists Discover Top Quark

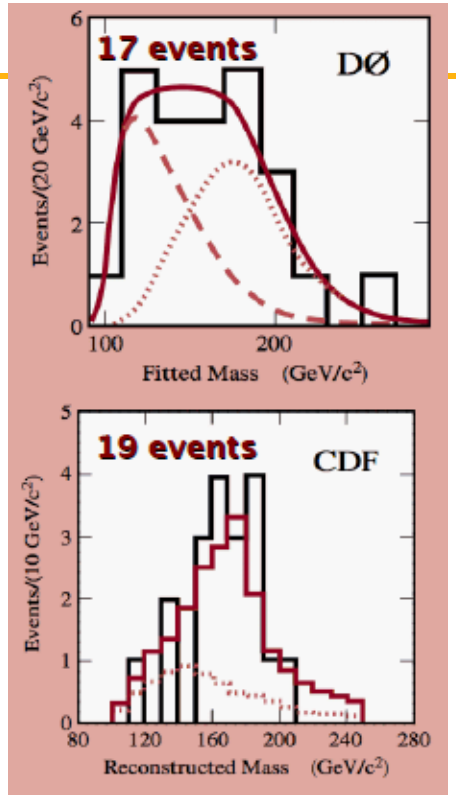
News Release - March 2, 1995

PHYSICISTS DISCOVER TOP QUARK

Batavia, IL--Physicists at the Department of Energy's Fermi National Accelerator Laboratory today (March 2) subatomic particle called the top quark, the last undiscovered quark of the six predicted by current scientific th sought the top quark since the discovery of the bottom quark at Fermilab in 1977. The discovery provides stron *of the structure of matter*.



Découverte du quark top



- Premières valeurs de masse:

m_{top} = 176 ± 8 (stat.) ± 10 (syst.) GeV/c^2 (CDF)

m_{top} = 199 ± 19(stat.) ± 22 (syst.) GeV/c^2 (D0)

- Contraintes indirectes:
  - *Mesures précises electrofaibles, reliées à la masse du top via les corrections radiatives:*

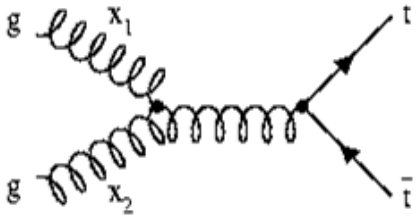
$$m(W) = \left(\frac{\pi\alpha_{em}}{\sqrt{2}G_F}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sin\theta_W\sqrt{1-\Delta r}}$$

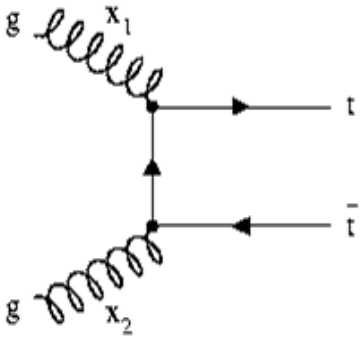
$$\Delta r = \Delta\alpha - \frac{\cos^2\theta_W}{\sin^2\theta_W}\Delta\rho + \Delta r_{résiduel}$$

$$\Delta\rho = K\, m_{top}^2\,,\ \Delta r_{résiduel} = f(\ln(m_H^2))$$

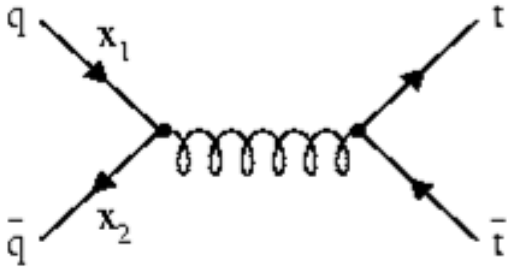
La production de paires $t\bar{t}$

- Le quark top est produit majoritairement par paires tt:
  - *Par fusion de gluons:*





  - *Ou annihilation quark-antiquark:*



La production de paires $t\bar{t}$

- Calcul théorique:

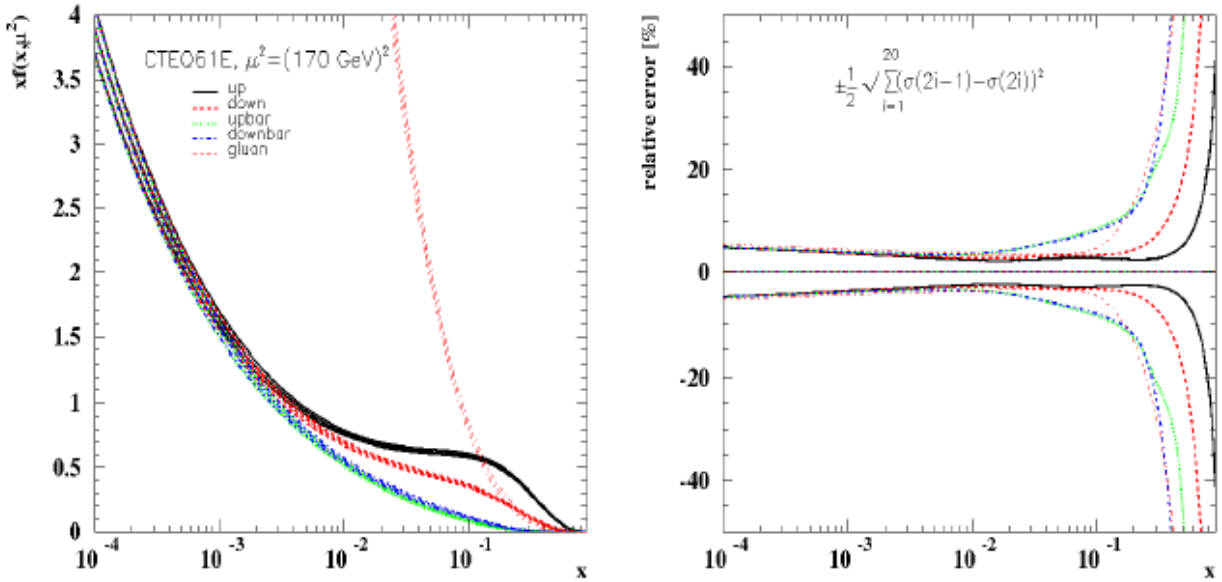
$$\sigma_{P+P\to t\bar{t}}(\sqrt{s}, m_t) = \sum_{a,b=q,\bar{q},g} \int \tilde{\sigma}_{a+b\to t\bar{t}}(\tilde{s}, \alpha_s(\mu_R^2), \mu_R^2, m_t) \times f_{a/P}(x_a, \mu_f^2) \times f_{b/P}(x_b, \mu_f^2) dx_a dx_b$$

  - *Avec:*
    - $f_{a/A}(x_a, \mu_f^2)$: la densité partonique i.e. la probabilité de trouver dans un hadron A un parton a ayant la fraction x_a de l'impulsion de A, sondé à une échelle d'énergie μ_f
    - $\tilde{\sigma}_{a+b\to t\bar{t}}(\tilde{s}, \alpha_s(\mu_R^2), \mu_R^2, m_t)$: la section efficace partonique

  - *Seuil de production ttbar:* $\tilde{s} = x_a x_b s = 4{m_t}^2$
    - Donc si x_a=x_b=x, cela correspond à x = 0.025 au LHC (14 TeV), et x = 0.175 au Tevatron

La production de paires $t\bar{t}$

- Densité partonique:



  - *La fusion de gluons domine donc au LHC : 90% à 14 TeV (82% à 7 TeV)*
  - *L'annihilation qq domine au Tevatron (85 %)*

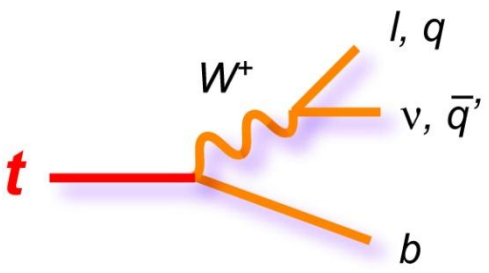
La production de paires $t\bar{t}$

- Comparaison Tevatron/LHC:

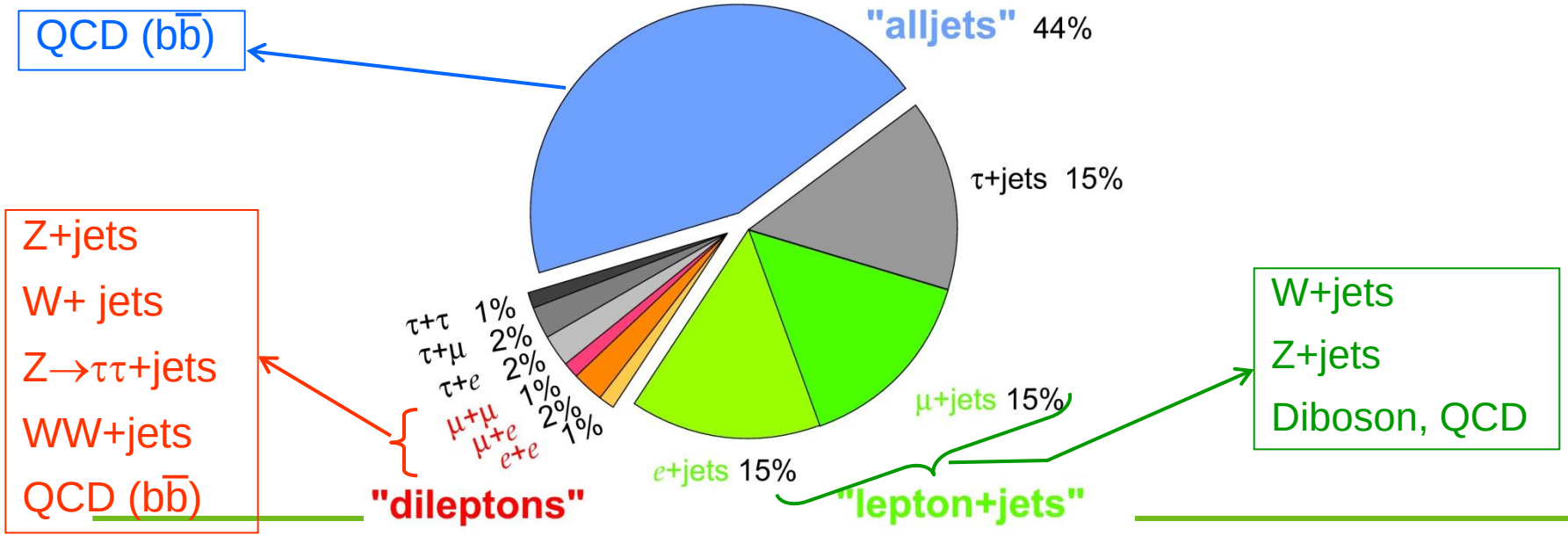
	Tevatron	LHC 7 TeV	LHC 14 TeV
Section efficace (pb)	7.14 – 7.46	≅ 150	900 - 968
Mode de production dominant	qqbar (85%)	gg (82%)	gg (90%)
Spin	• production près du seuil •État de spin $^3S_1$ • Spins parallèles, 100% corrélés	• production loin du seuil aisée •État de spin $^1S_0$ • Spins opposés, non corrélés à 100%	idem

La désintégration du quark top

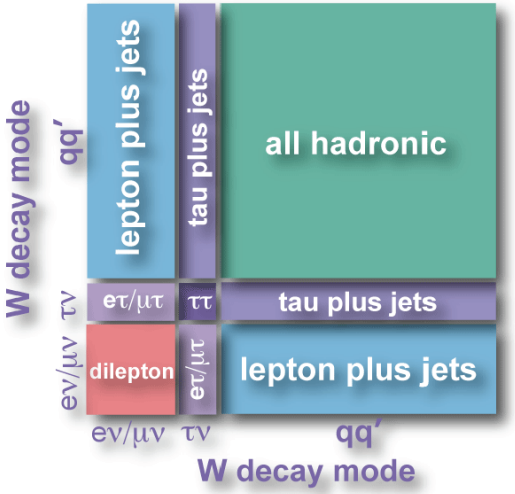
- Dans le Modèle Standard:
  - *Br(t→Wb) ≈ 100%*
  - i.e. matrice CKM |Vtb|≈1
  - *Recherche en fonction des produits de désintégration du W*



- Signatures / bruits de fond principaux:



La désintégration du quark top



- Le canal lepton(e,μ)+jets:
  - *Canal « en or »:*
    - 45% du total
    - S/B > 1
  - *W hadronique reconstruit*
    - Contrainte sur l'échelle d'énergie des jets
  - *Top hadronique reconstruit aisément*
- Le canal di-leptons:
  - *Faible statistique (9%)*
  - *Très peu de bruit de fond*
  - *Etat final sous-contraint*
    - Techniques complexes de reconstruction
- Le canal hadronique:
  - *Grande statistique (46%)*
  - *Mais bruit de fond important (QCD) + combinatoire*
  - *Trigger difficile*

Le quark top : une particule instructive!

1. $t\bar{t}$

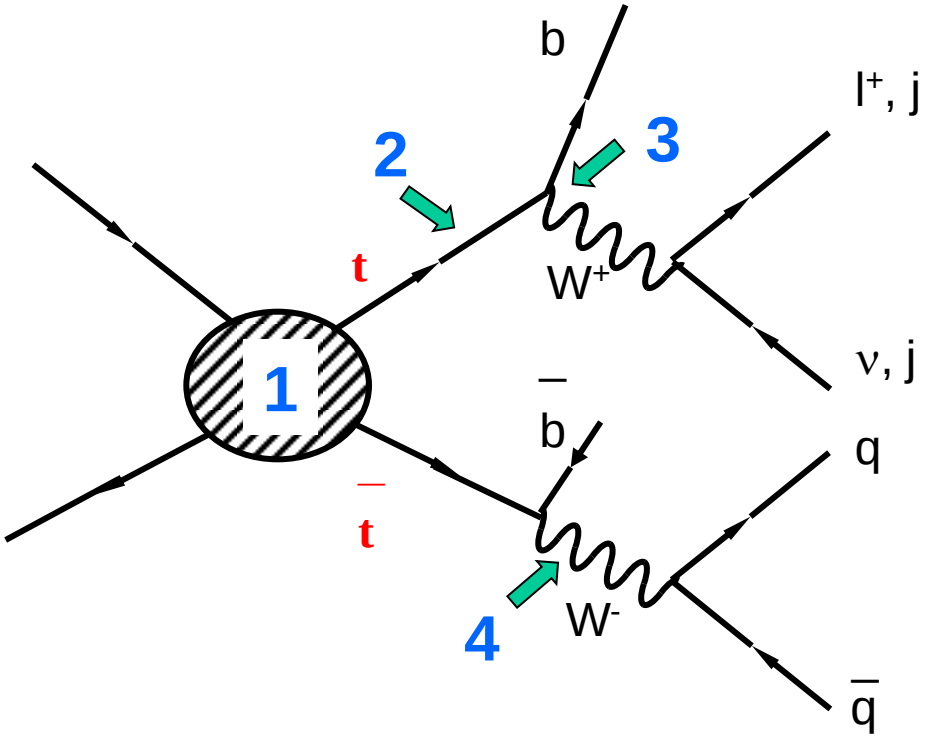
- Section efficace de production
- Corrélations de spin
- Production de nouvelles particules

2. Caractéristiques du quark top

masse, charge, spin, largeur

3. Désintégration du top (et single top)

- $|V_{tb}|$
- Rapports d'embranchement
- Désintégrations rares/non SM
- Couplages anormaux



4. Hélicité du W

Pour chaque mesure, nous verrons:

1) En quoi elle est pertinente
2) L'état des connaissances théoriques
3) Les mesures/recherches au Tevatron
4) Les perspectives au LHC
   a) À $\sqrt{s}$ = 7 TeV
   b) A $\sqrt{s}$ = 14 TeV

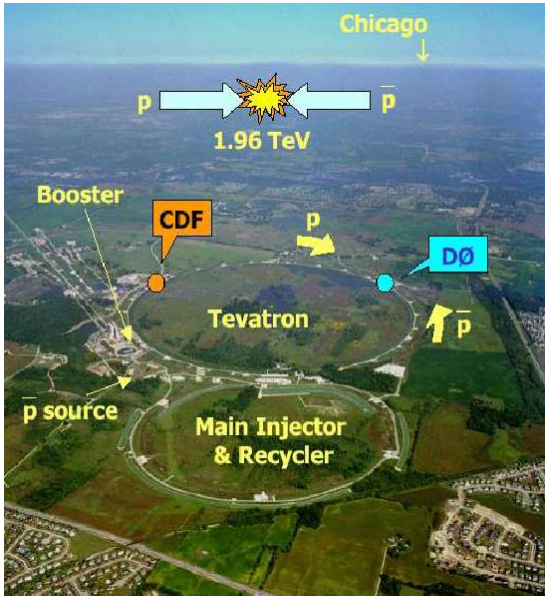
CONTEXTE EXPERIMENTAL

Le Tevatron

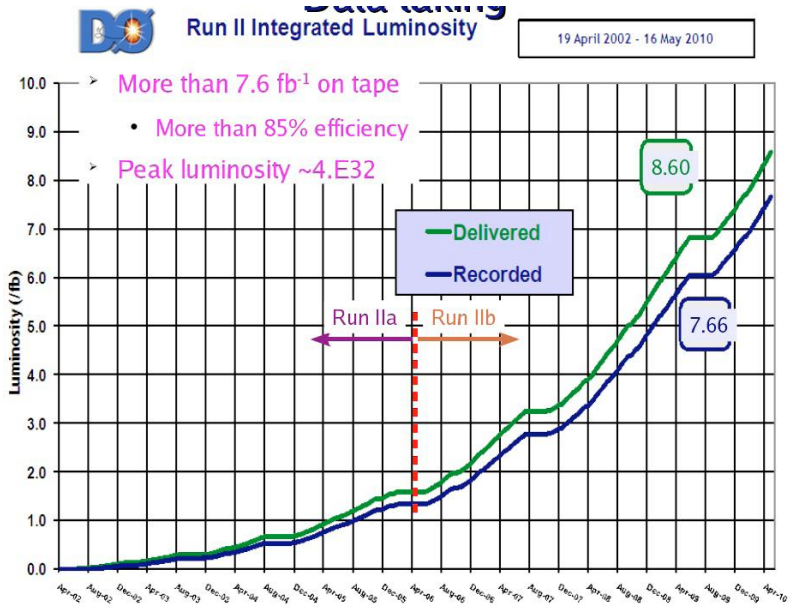
- L'accélérateur

	Run I	Run IIa	Run IIb
$\sqrt{s}$ (TeV)	1.8	1.96	1.96
L type ($cm^{-2}\,s^{-1}$)	$1.6\ 10^{30}$	$9\ 10^{31}$	$3\ 10^{32}$
L intégrée (pb^{-1}/semaine)	3	17	70

Premières collisions le 9 juin 2006



Luminosité délivrée (fb^{-1})

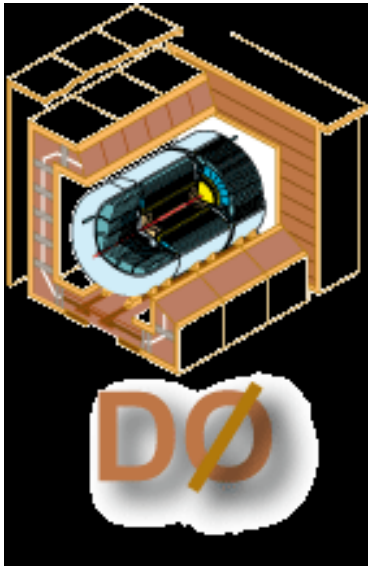


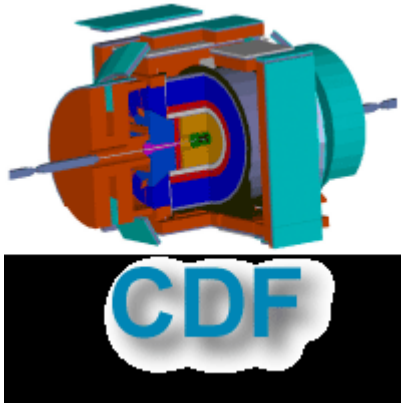
Performances actuelles:

- Luminosité instantanée: 3×10^{32} $cm^{-2}s^{-1}$
- Luminosité intégrée délivrée: ~ 8.7 fb^{-1}
- Luminosité enregistrée : 7.5 fb^{-1}

Le Tevatron

- Les détecteurs: D0 et CDF



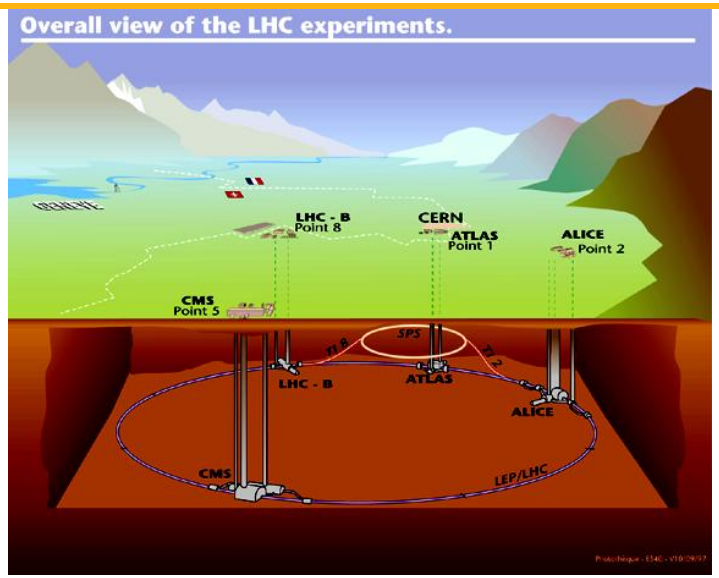


  - *Fonctionnent depuis 20 ans (upgrades)*
  - *Très bonne compréhension des détecteurs*

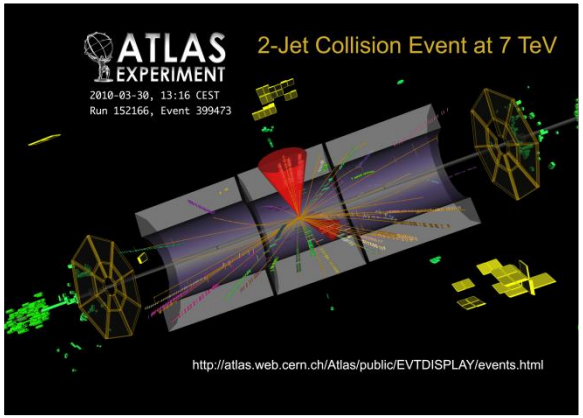
Le LHC

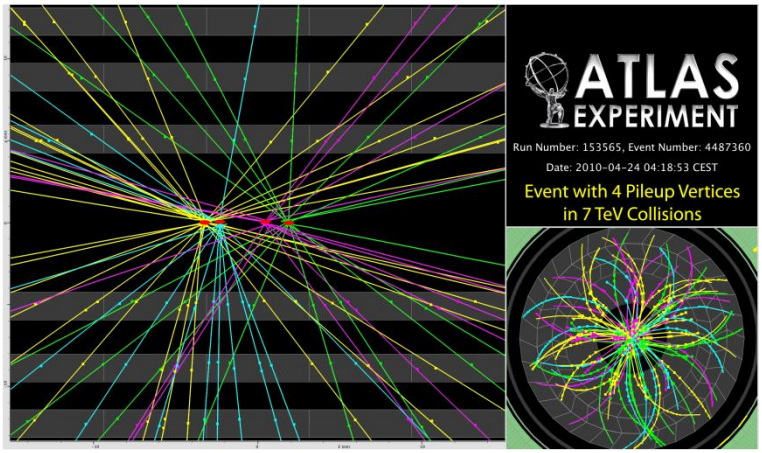
- 2008 : prise de données
  - *cosmiques:*
    - Alignement, uniformité, stabilité des détecteurs

- 30 mars 2009: premières collisions à √(s) = 7 TeV



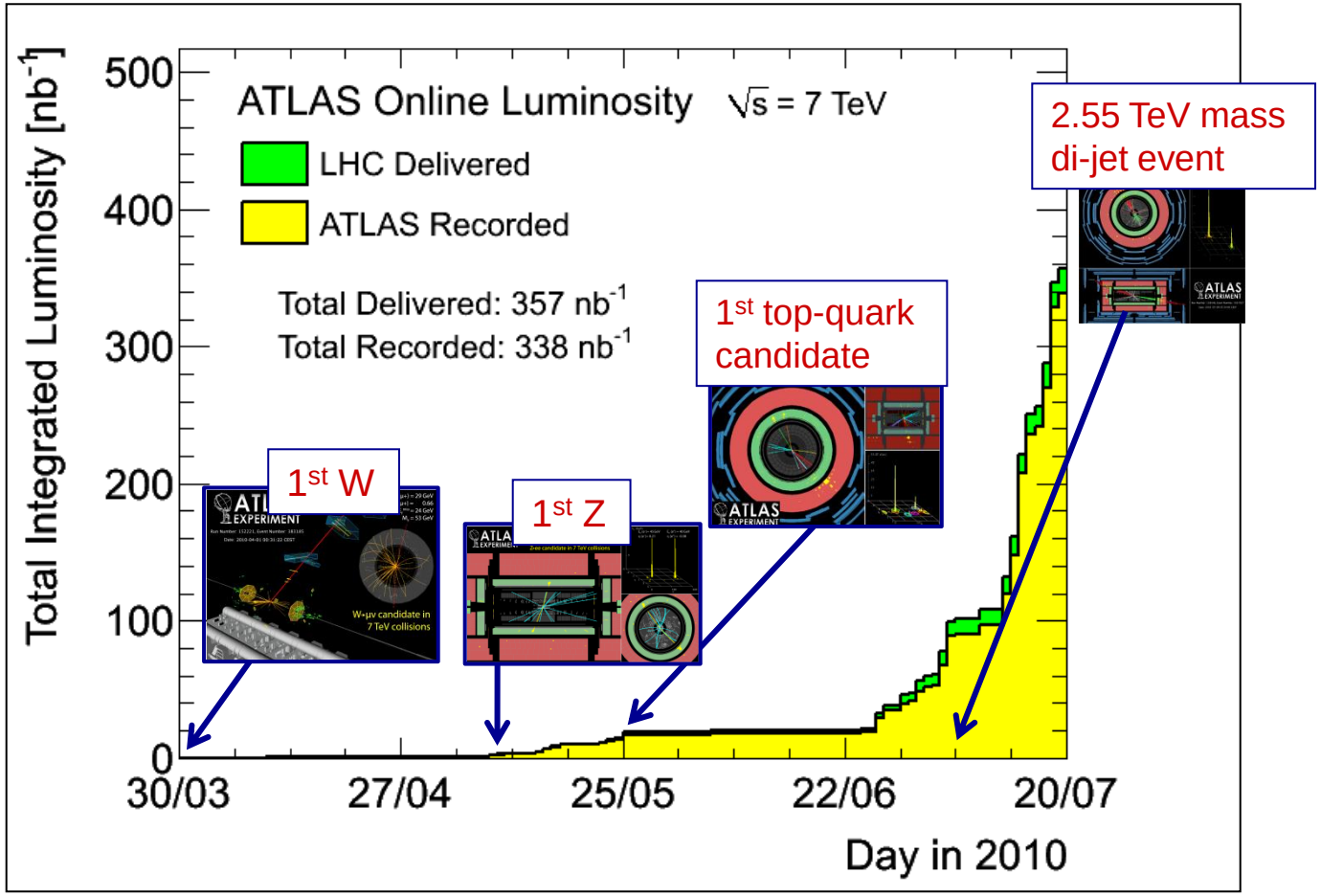
Avril : premiers événements avec du pile-up





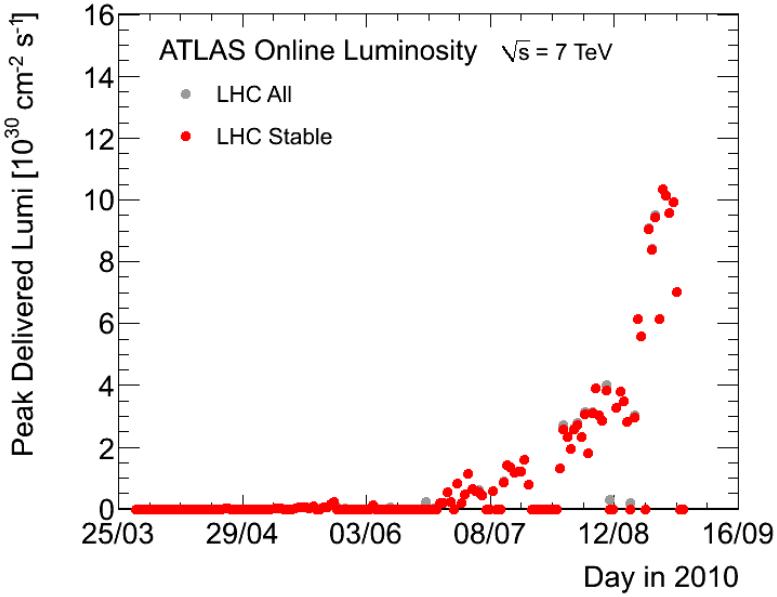
LHC

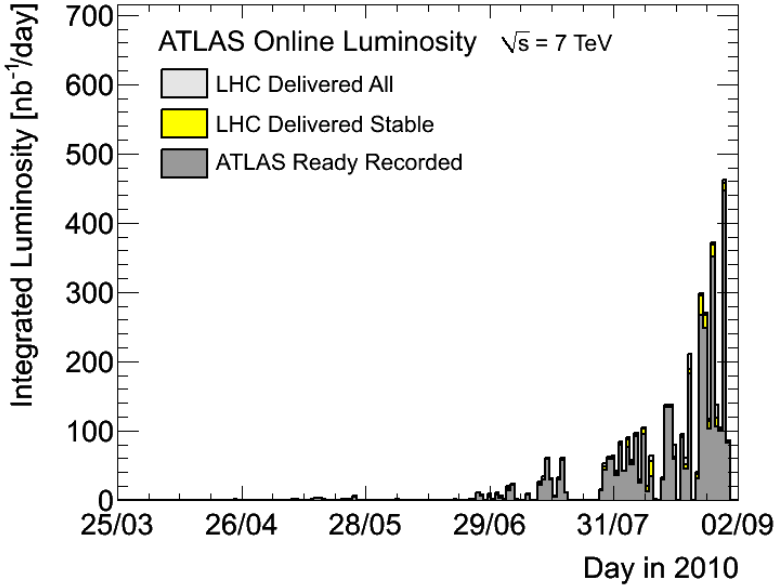
- Les redécouvertes de particules du Modèle Standard



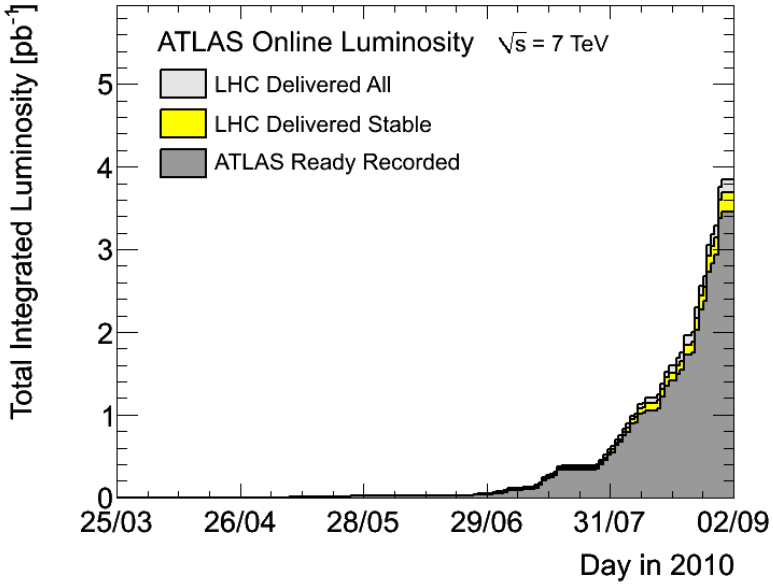
Le LHC

- Depuis le 30 mars 2009:





Jusqu'à 450 nb^{-1} par jour
10^{31} cm^{-2} s^{-1}
Jusqu'à 15h physique/jour



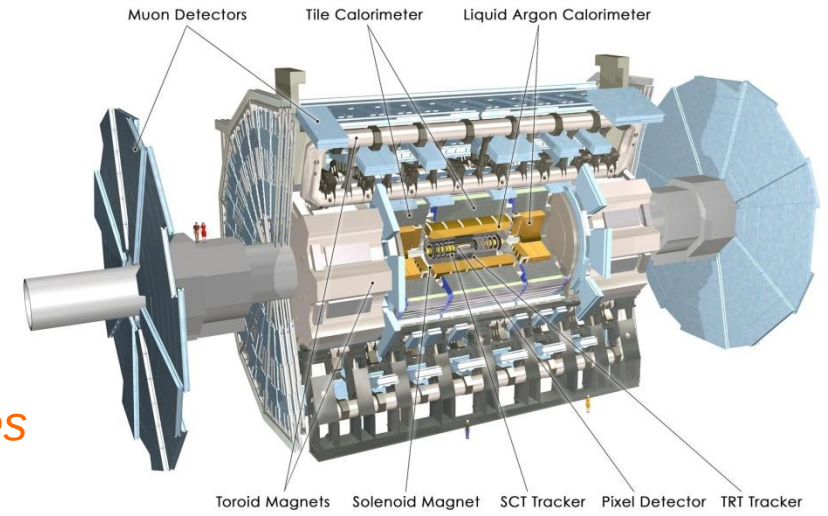
Le LHC

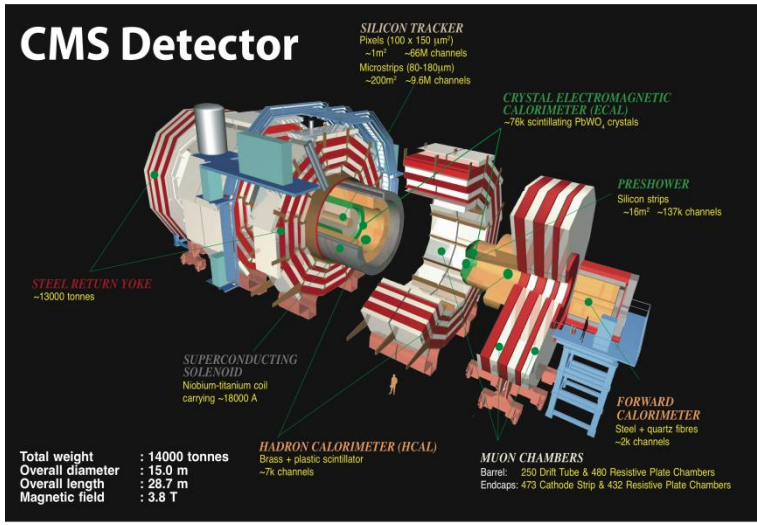
- Perspectives:
  - *Run à 7 TeV → fin 2011*
    - Luminosité intégrée prévue : 1 fb^{-1}
  - *Arrêt fin 2011*

	Phase 1 (--> fin 2011)	**Phase 2 (redémarrage 2012)**
√ s (TeV)	**7**	**14**
L type (cm^{-2} s^{-1})	**Démarrage:10^{27} Maintenant: 10^{31} But: 10^{32}**	**10^{33} à 10^{34}**
L intégrée	**But: 1 fb^{-1}**	**>10 fb^{-1}**

Les détecteurs ATLAS et CMS

- ATLAS et CMS
  - *Bon fonctionnement:*
    - >97% des voies
  - *Performances avec les premières données:*
    - Très bon accord data/Monte Carlo
    - Utilité des runs de cosmiques
    - Illustration : jets, E_T^{miss}, b-tagging
      - Utiles pour le quark top
    - Système de trigger performant

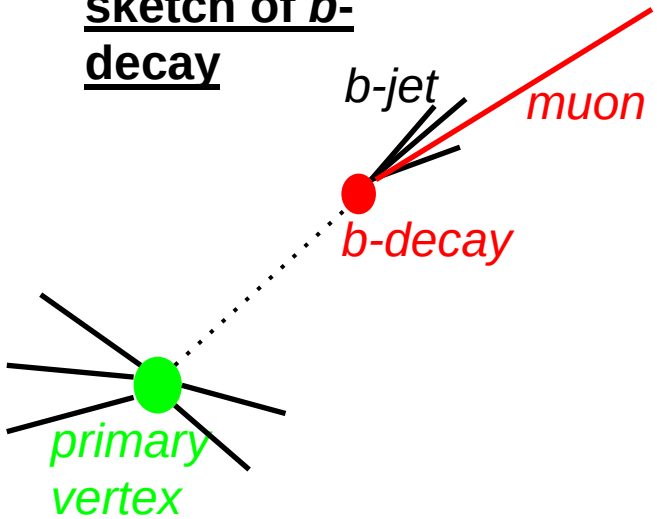


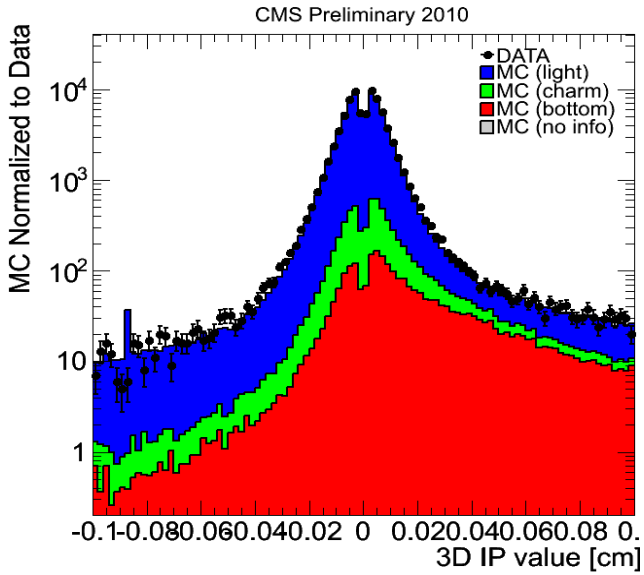


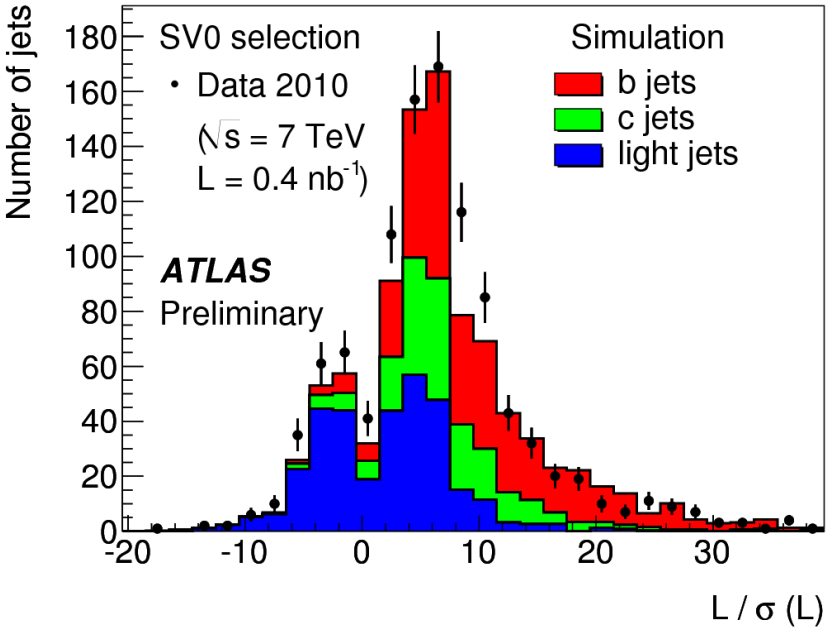
Les détecteurs ATLAS et CMS

- Etiquetage des jets b
  - *Nécessite:*
    - Résolution sur le vertex primaire
    - Résolution sur le paramètre d'impact des traces
  - *Excellent accord entre données et Monte Carlo*

sketch of *b*-decay

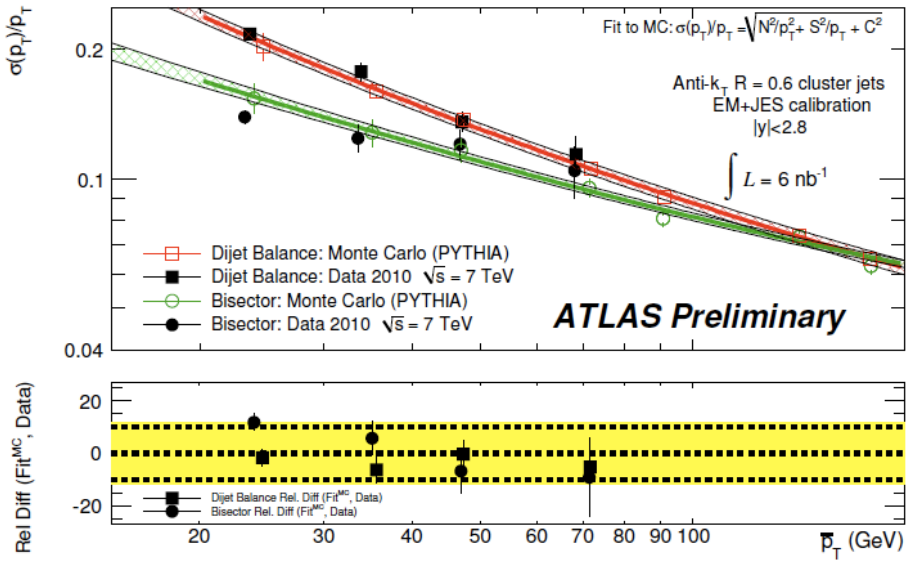






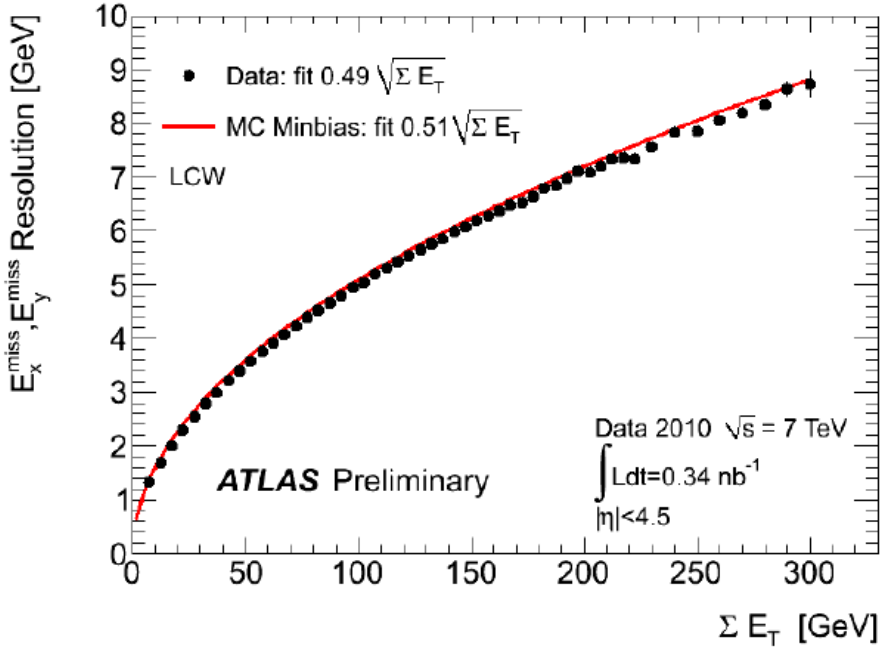
Les détecteurs ATLAS et CMS

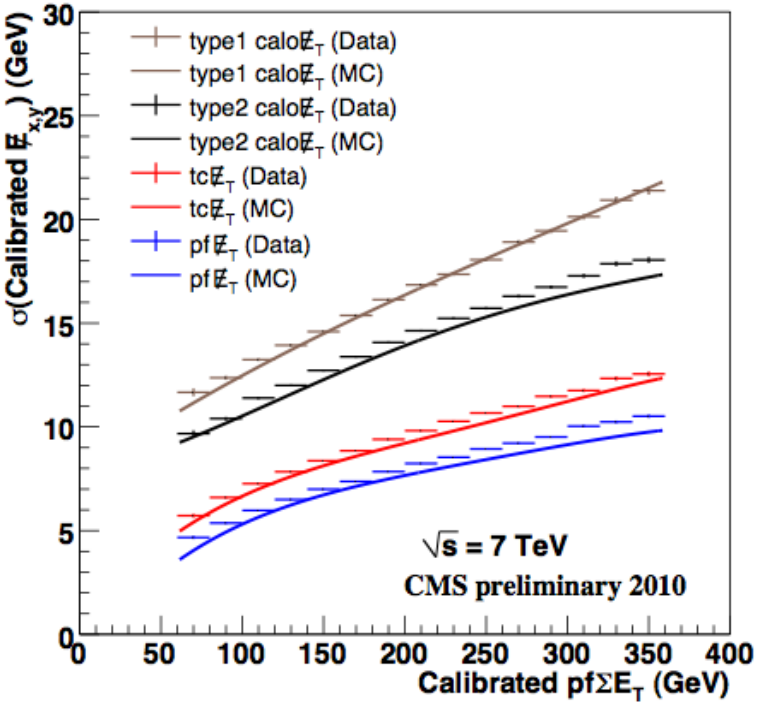
- Reconstruction des jets
  - *Excellent accord données/Monte Carlo pour la résolution des jets avec les données acquises jusqu'à présent*
  - *Echelle d'énergie des jets de l'ordre de 7 %*



Les détecteurs ATLAS et CMS

- Energie manquante:
  - *Étudiée avec les événements Minimum Bias*
    - Et les premiers W
  - *Résolution en très bon accord avec le Monte Carlo*

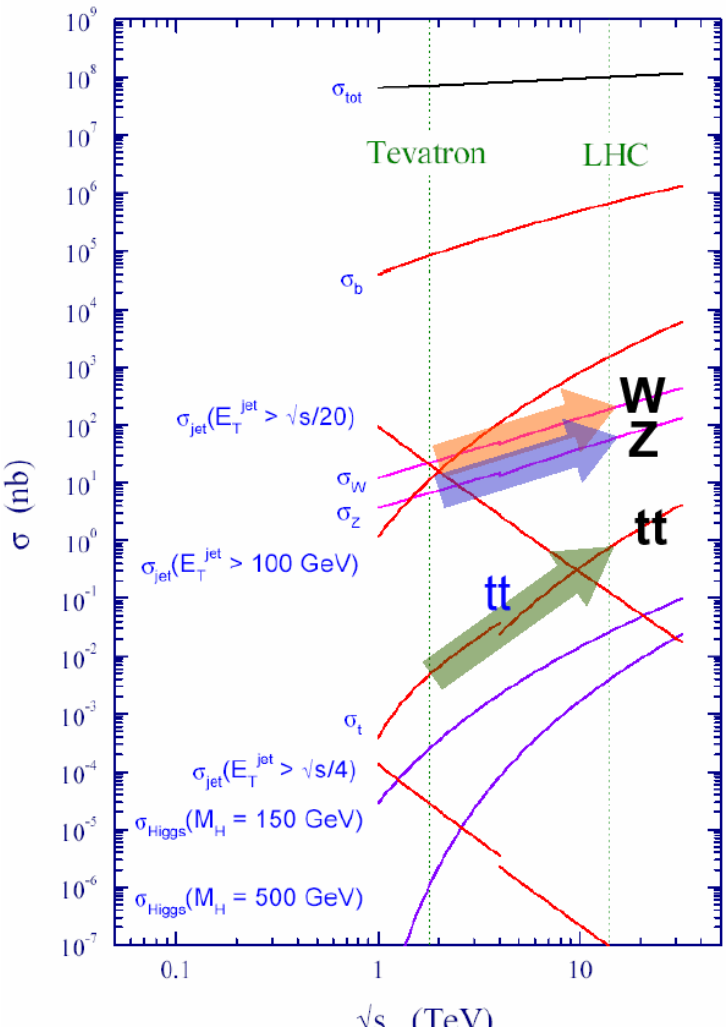




Mise en perspective

- Comparaison de sections efficaces (Tevatron/LHC 7 TeV / LHC14 TeV)

processus	σ(pb) Tevatron	σ(pb) LHC 7 TeV	σ(pb) LHC 14 TeV
$Z \to ll$	255	10^3	3×10^3
$W \to \ell\nu$ (ℓ=e,μ)	2800	10^4	3×10^4
tt	7.5	150	830
H(150 GeV/c²)	0.2	8	25



Mise en perspective

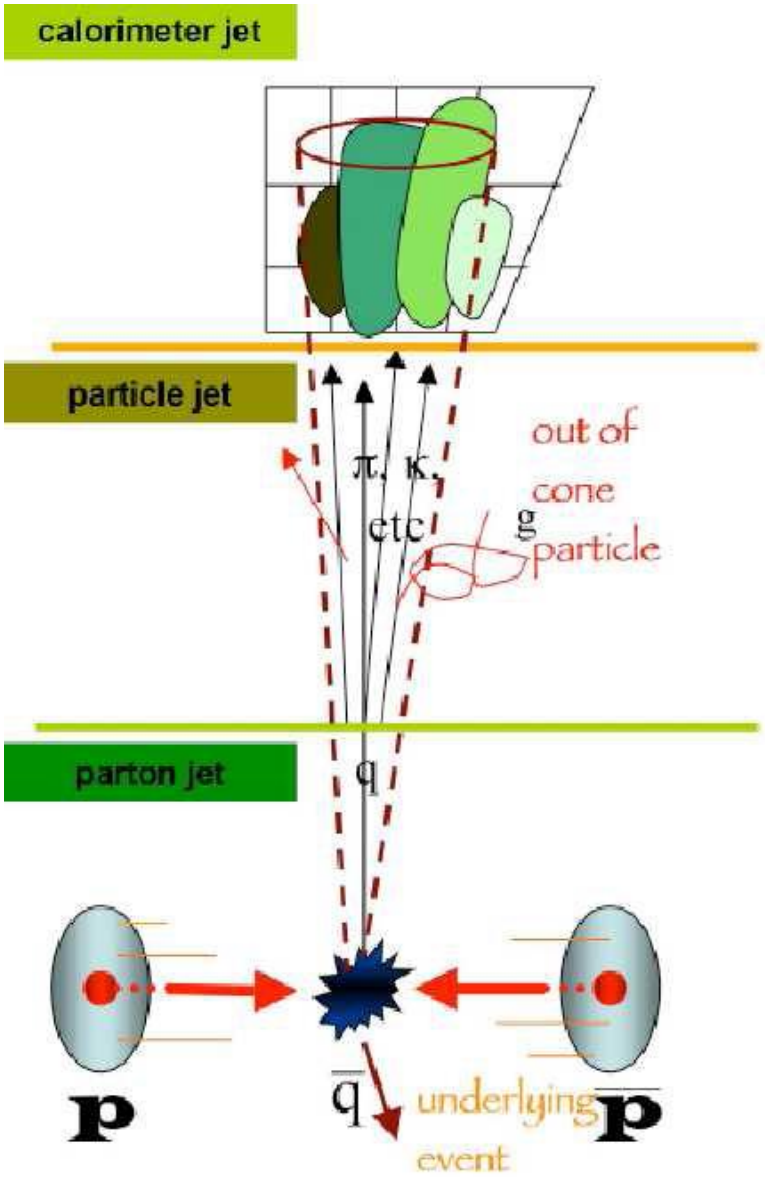
- Le Tevatron:
  - *10 fb^{-1} sont attendus fin 2011*
  - *Les mesures sont souvent déjà limitées par l'erreur systématique*

- Le LHC : feuille de route pour le quark top
  - *Redécouverte du quark top:*
    - Candidats observés par ATLAS et CMS
  - *Mesure de la section efficace…en cours*
  - *Mesure de la masse: possible durant la première phase*
  - *Redécouverte du single top :*
    - Possible durant la phase 1
    - Découverte dans tous les canaux dans la phase 2
  - *Sensibilité à la nouvelle physique:*
    - Certains modèles seront étudiés durant la phase 1
    - D'autres ne peuvent être étudiés que durant la phase 2

    (fonction des masses des particules recherchées, notamment)

Erreurs systématiques pour la physique du quark top

- Echelle d'énergie des jets
  - *Jet = hadronisation d'un quark:*
    - Au niveau partonique,
      - Jet = gluons, quarks
    - Particle jet
    - Reconstruction calorimétrique:
  - *But:*
    - Correspondance
      jets de partons →
      jets reconstruits
  - *Sources d'erreur:*
    - « Out of cone »
    - Evenement sous-jacent
    - ISR/FSR (cf + loin)
    - étalonnage du détecteur

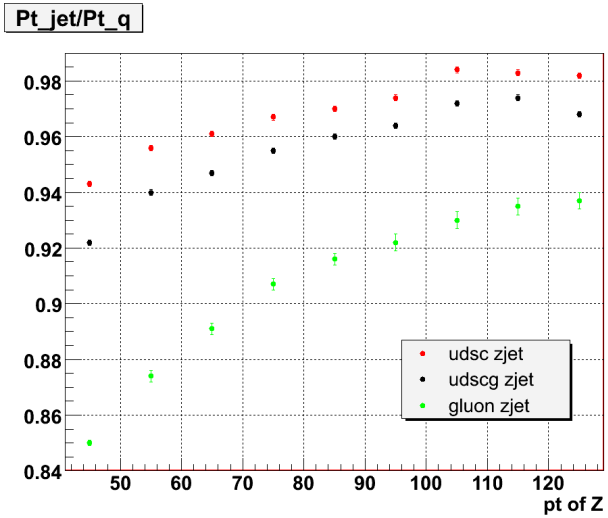


Erreurs systématiques pour la physique du top

- Echelle d'énergie des jets (JES):
  - *Echelle d'énergie des jets légers:*
    - La précision sur cette échelle peut être nettement améliorée en utilisant la contrainte de la masse du W (cf mesure de la masse du quark top): calibration « in situ » pour les événements ttbar
  - *Echelle d'énergie des jets b:*
    - Comparaison (MC) des échelles d'énergie des jets b et des jets légers + estimation de la JES des jets légers à partir des événements ttbar → mesure de la JES des jets b
      - 1% sur b-JES nécessite de connaître le rapport b / léger (~ 0.95) à 20% près

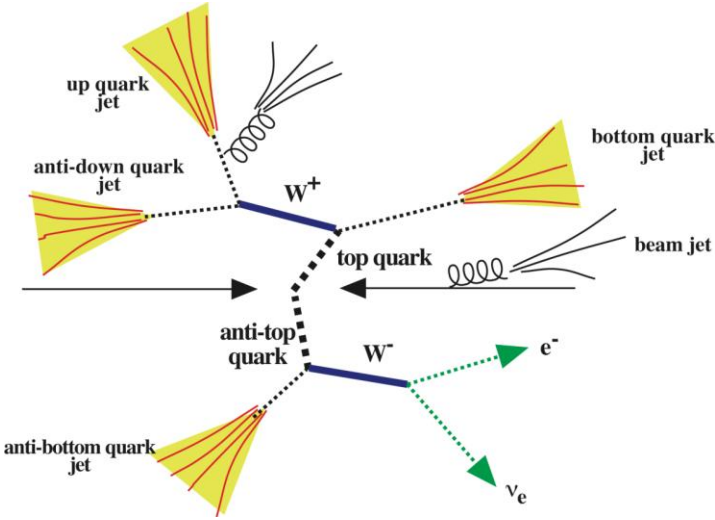
Erreurs systématiques pour la physique du top

- Echelle d'énergie des jets
  - *Jet s b (suite):*
    - Z → leptons + jet b: ~ 6% de Z + jet
      - $P_T(j) / P_T(Z)$ 2% plus petit que $P_T(j) / P_T(q)$
      - Jets légers différents dans Z+j et ttbar
      - Contamination de jets non b
      - distribution en $P_T \neq$ ttbar (effet ~ 1%)
    - Z → bb + high P_T (> 120 GeV) non b jet
      - Performance au Tevatron : 2% (CDF)



Erreurs systématiques pour la physique du top

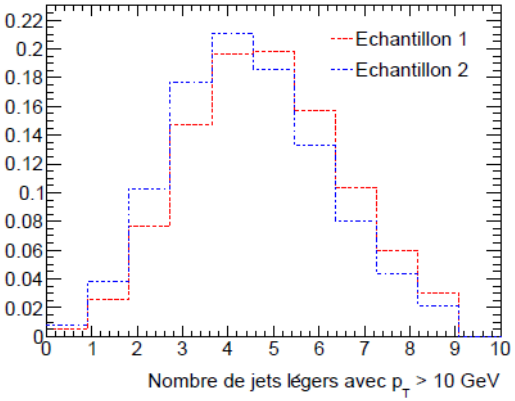
- Initial (final) state radiation
  - *ISR/FSR:*
    - Radiations de gluons dans l'état initial ou l'état final
    - Modifient la cinématique de l'état final
    - Augmentent le bruit de fond combinatoire



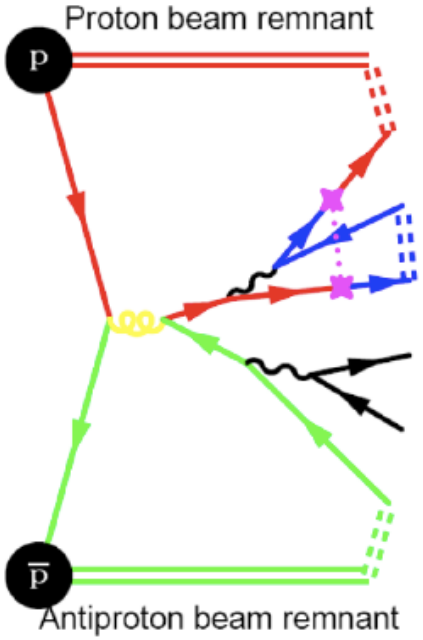
  - *Illustration : masse*
    - ISR → augmentation de la masse (gluon pouvant être pris en compte par erreur dans un jet de l'état final)
    - FSR → diminution de la masse (gluon radié dans l'état final échappant par erreur à la masse reconstruite)

Erreurs systématiques pour la physique du top

- ISR/FSR
  - *Comment mesurer cette erreur systématique?*
    - Estimer le niveau des radiations
    - Puis la systématique qui en découle pour la mesure concernée (masse, section efficace,…)
  - *Au Tevatron (CDF):*
    - Utilise des événements Drell Yann (qqbar → l^+l^-g)
    - Comparaison data/Monte Carlo → niveau d'ISR estimé
    - Transposé au top
    - FSR: les paramètres estimés pour les ISR sont transposés aux FSR
  - *LHC:*
    - Pas de méthode d'estimation du niveau d'ISR/FSR jusqu'à présent
    - Idée : utiliser la multiplicité des jets, leur distance relative,..



Erreurs systématiques pour la physique du top

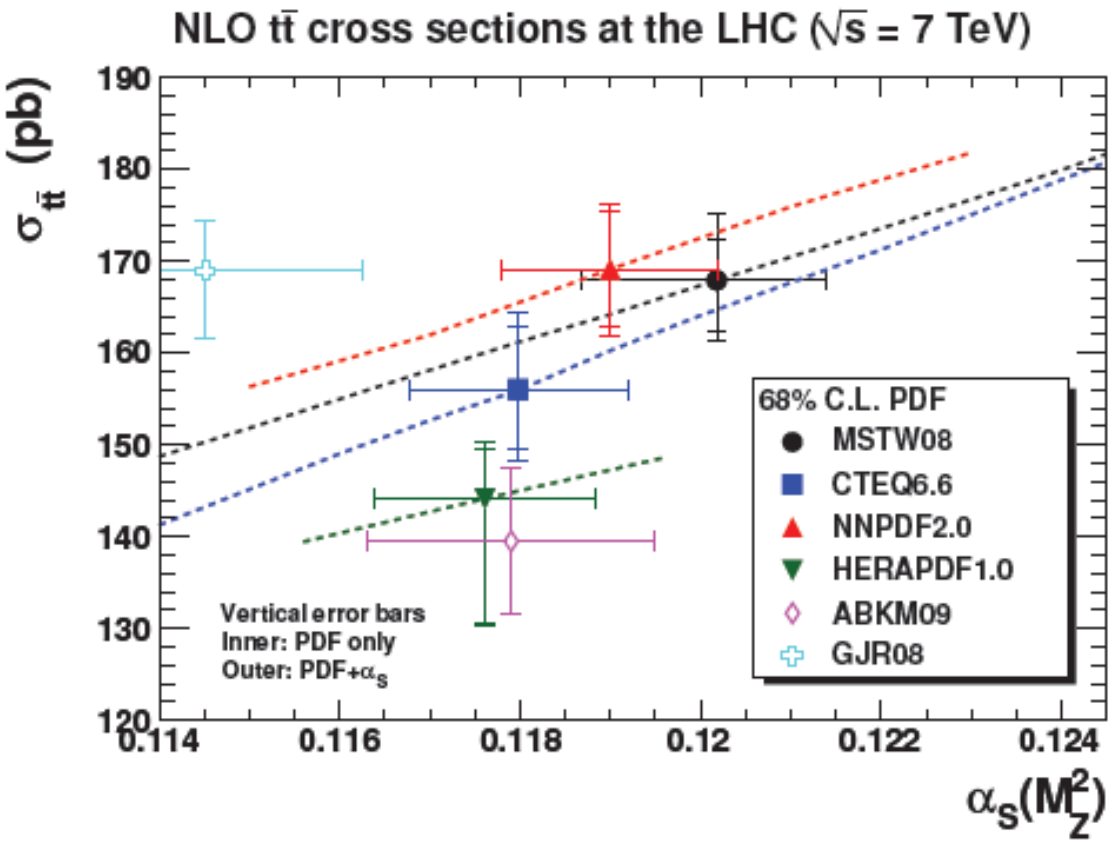


- Reconnexion de couleur
  - *Existe entre les quarks de l'état final*
    - Reconnexion de couleur → incidence sur la cinématique de l'état final
    - Estimée sur le Monte Carlo (reconnexion de couleur on/off)

- *Estimation du fond*
  - *Bruit de fond physique:*
    - Mesure sur des échantillons indépendants (voir plus loin : mesure de la section efficace)
  - *Bruit de fond combinatoire:*
    - Événements à grande multiplicité de jets → bruit de fond combinatoire
    - Estimé en variant sa forme sur les distributions cinématiques reconstruites

Erreurs systématiques pour la physique du top

- PDF:
  - *Le calcul de la section efficace (notamment) dépend des PDF choisies pour le calcul*
    - Particulièrement sensible au LHC



SECTION EFFICACE DE PRODUCTION TOP-ANTITOP

Prédiction théorique de σ(ttbar)

- Calcul exact NLO seulement
  - *NNLO : approximation*
    - Dépendance en rapidité NLO
    - Gain : erreur due aux échelles de renormalisation et de factorisation
- Tevatron (NLO)

S. Moch and P. Uwer	Phys. Rev. D**78** 034003 (2008)	$\sigma_{t\bar{t}} = 7.46^{+0.48}_{-0.67}$ pb
Kidonakis *et al.*	Phys. Rev. D**78** 074005 (2008)	$\sigma_{t\bar{t}} = 7.27^{+0.76}_{-0.85}$ pb
Cacciari *et al.*	JHEP **09** 127 (2008)	$\sigma_{t\bar{t}} = 7.14^{+0.76}_{-0.87}$ pb

- LHC :

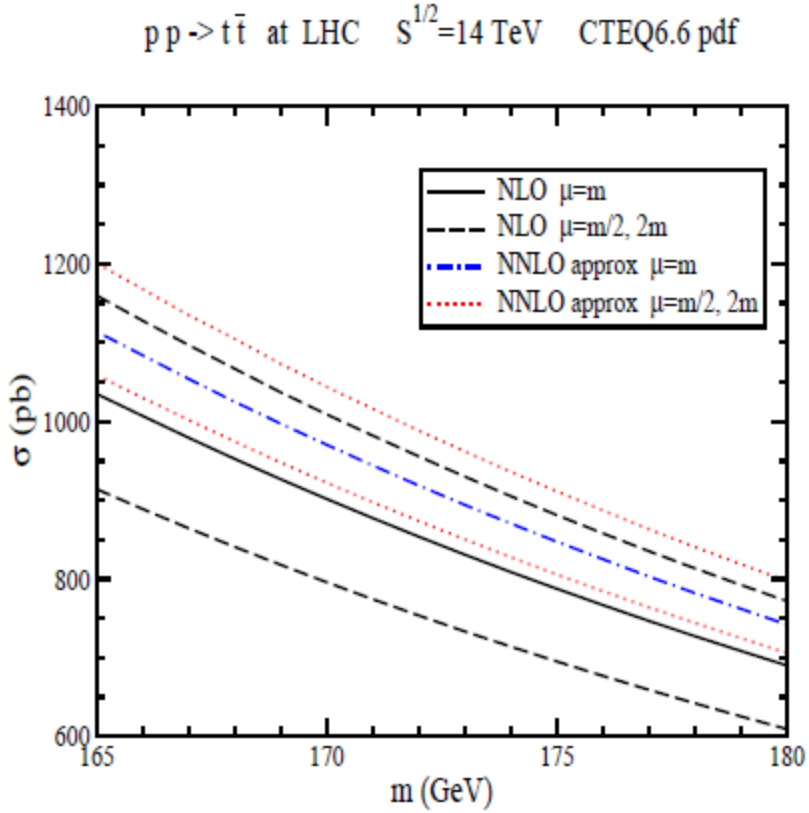
$$\sigma^{NLO}_{pp\to t\bar{t}}(m = 172\ \text{GeV}, \sqrt{s} = 14\ \text{TeV}, \text{MRST}) = 900\,^{+110}_{-107}\,(\text{échelle})\,^{+11}_{-12}\,(\text{PDF})\ \text{pb}$$

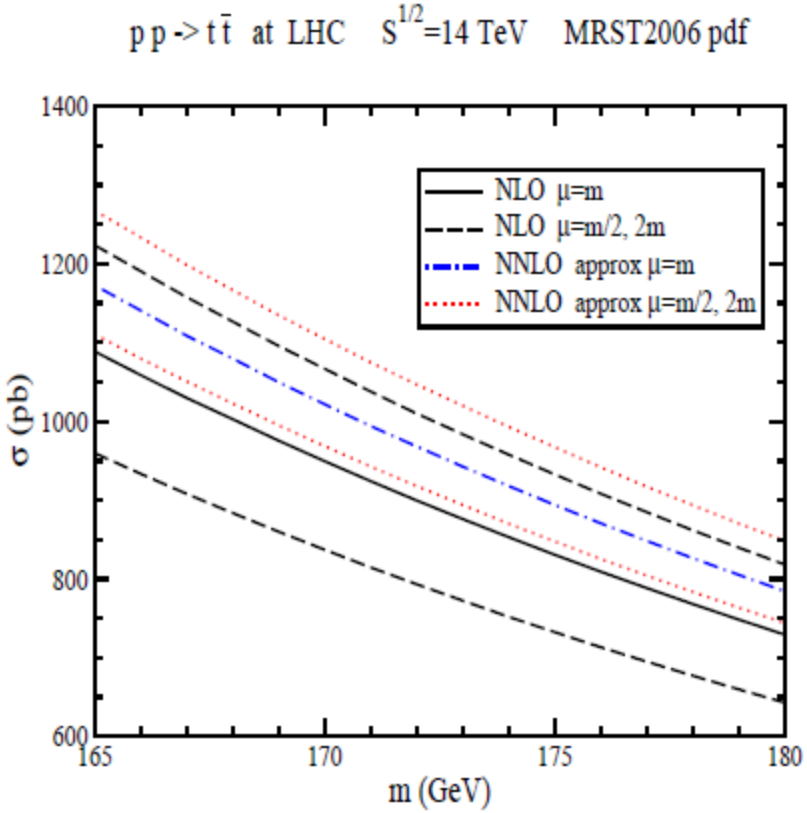
$$\sigma^{NNLO}_{pp\to t\bar{t}}(m = 172\ \text{GeV}, \sqrt{s} = 14\ \text{TeV}, \text{MRST}) = 968 \pm 4\,(\text{cin.})\,^{+79}_{-50}\,(\text{échelle})\,^{+12}_{-13}\,(\text{PDF})\ \text{pb}$$

$$\sigma^{NNLO}_{pp\to t\bar{t}}(m = 172\ \text{GeV}, \sqrt{s} = 14\ \text{TeV}, \text{CTEQ}) = 919 \pm 4\,(\text{cin.})\,^{+70}_{-45}\,(\text{échelle})\,^{+29}_{-31}(\text{PDF})\text{pb}$$

Prédiction théorique de σ(ttbar)

- Dépendance de la section efficace avec la masse





Mesure de σ(ttbar)

- Intérêt de la mesure :
  - *Maitrise de la sélection et des bruits de fond*
  - *Confrontation avec la prédiction théorique (QCD)*
  - *Mesure indirecte de la masse du quark top*
  - *Sensibilité à la nouvelle physique*

- Principe:
  - *Sélection des événements dans les différents canaux*
  - *Mesure de la section efficace:*
    - Différentes méthodes
    - Principe : estimation du nombre d'événements de signal
    - Une illustration ici : le canal lepton + jets
  - *Estimation des erreurs systématiques et statistiques*
  - *Comparaison:*
    - Entre expériences
    - À la théorie

Mesure de σ(ttbar) : principe

- Principe:

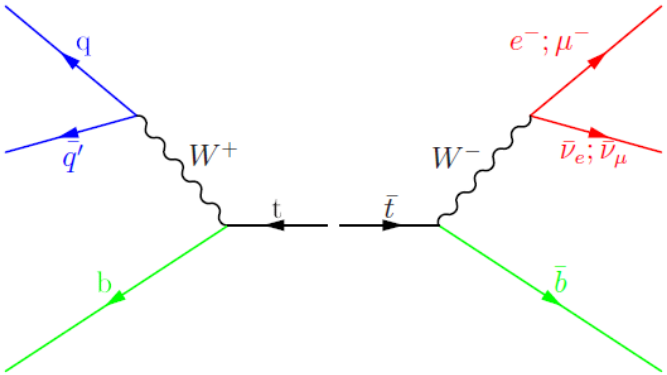
$$\sigma = \frac{N_{\text{sig}}}{\mathscr{L} \times \varepsilon} = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}}{\mathscr{L} \times \varepsilon}$$

N_{obs} number of observed selected events
N_{bkg} number of estimated bkg events from MC and/or data
$\mathscr{L}$ integrated luminosity
ε total efficiency (geometrical, trigger,event selection)

- *Nobs – Nbkg est estimée:*
  - Soit par comptage
  - Soit par un ajustement de Signal/Bruit basé sur une variable discriminante

Sélection des événements ttbar

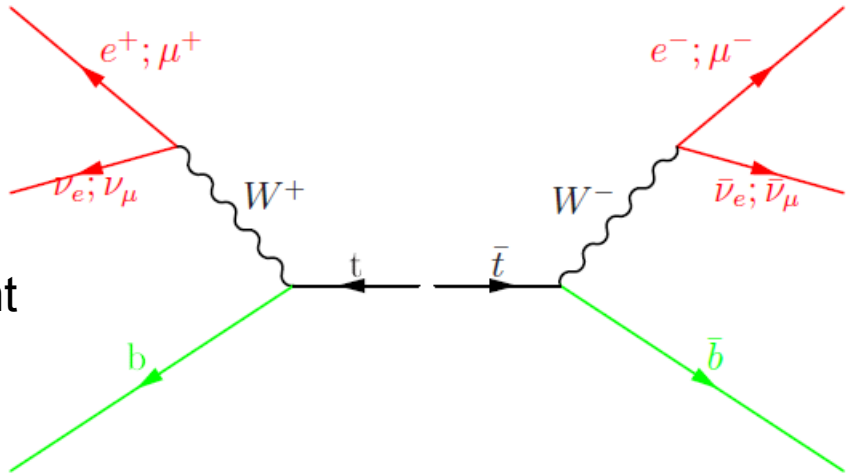
- Canal lepton + jets:
  - *Canal en or:*
    - 1 lepton isolé de haut pT
    - Energie manquante
    - 4 jets dont 2 b
    - → bruit de fond réductible
    - → bon compromis rapport d'embranchement et rapport S/B



  - *Bruits de fond principaux:*
    - W+jets
    - QCD
    - Single top
  - *Principales sources d'erreurs systématiques:*
    - Luminosité
    - Normalisation des bruits de fond
    - Monte Carlo
    - Echelle d'énergie des jets

Sélection des événements ttbar

- Canal di-leptons:
  - *Avantage:*
    - Peu de bruit de fond
  - *Inconvénient:*
    - Rapport d'embranchement faible
  - *Bruits de fond principaux*
    - Drell-Yann, di-boson
    - QCD
    - W+jets



  - *Sélection des événements:*
    - 2 leptons isolés de signes opposés
    - Si leptons identiques, coupure sur leur masse invariante (rejeter Z→ ll)
    - Grande énergie transverse manquante

Estimation des fonds avec les données

- « Faux leptons »
  - i.e. leptons ne provenant pas de la désintégration d'un W
  - Bruit de fond QCD pour le canal l+jets, W+jets dans le canal di-leptons
  - Plusieurs méthodes développées au Tevatron (LHC):
    - Dont la ***méthode de la matrice***:

Nombre d'evts observé avec une autre définition de lepton

$$N^{\text{loose}} = N^{\text{loose}}_{\text{real}} + N^{\text{loose}}_{\text{fake}}$$

$$N^{\text{tight}} = \varepsilon_{\text{real}} N^{\text{loose}}_{\text{real}} + \varepsilon_{\text{fake}} N^{\text{loose}}_{\text{fake}}$$

$\varepsilon_{\text{real}}$: mesuré dans Z → ll

$\varepsilon_{\text{fake}}$: MC / mesuré lot QCD

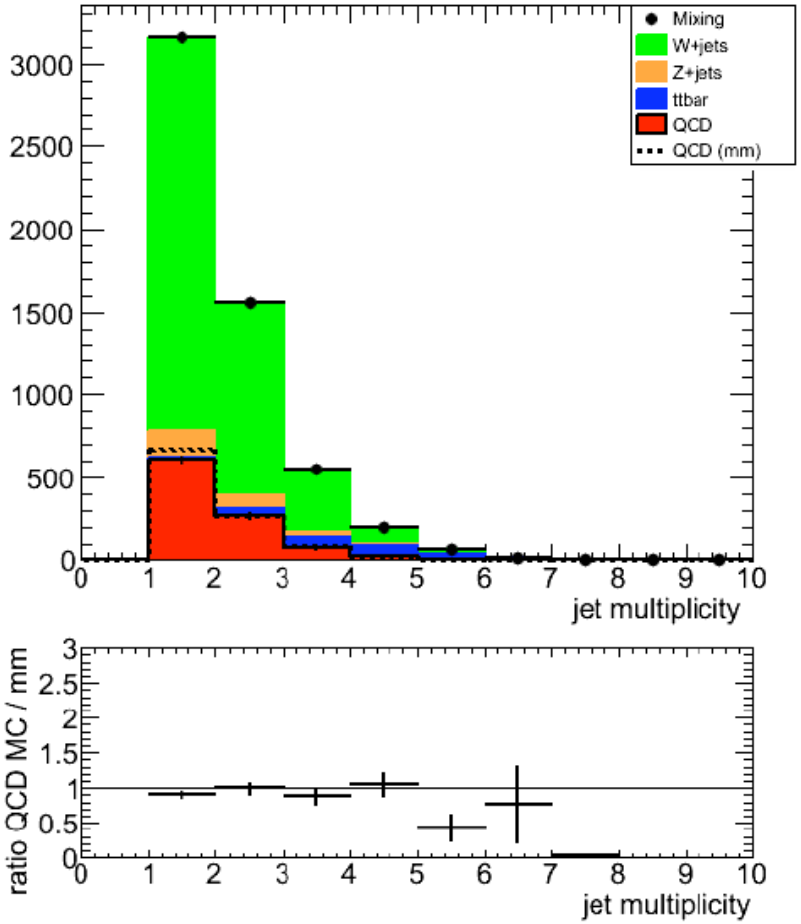
Nombre total d'evts observés

Nombre d'evts avec « vrai » lepton

Nombre d'evts avec faux lepton: Ce qu'on veut mesurer

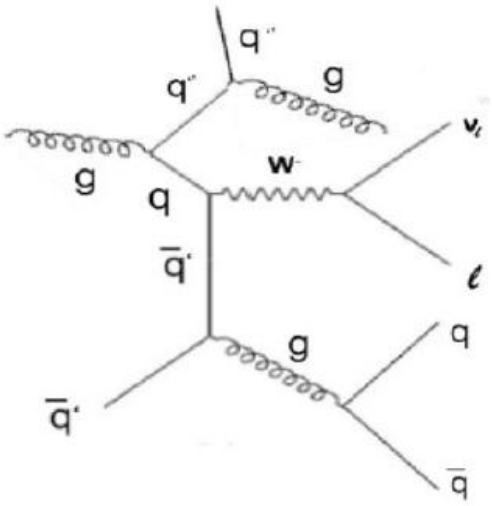
Estimation des fonds avec les données

- Faux leptons, suite:
  - *Fonctionne si ε_{real} et ε_{fake} sont:*
    - suffisamment différents
    - indépendants de la topologie
  - *Peut (doit) être fait par bin (n_{jets}, MET, …)*



Estimation des fonds avec les données

- W+jets
  - *Principal fond dans le canal l+jets avant b-tagging*
  - *Pas de calcul NLO de W + 4 jets,*
    - W+3j NLO / W+3j LO ~ 1.2
    - incertitude W+3j LO ~ 30%
  - *Grande incertitude Wb(b):*
    - $\sigma^{CDF}(Wb \rightarrow l\nu b) = 2.74 \pm 0.50$ pb
    - $\sigma^{NLO}(Wb \rightarrow l\nu b) = 1.22 \pm 0.14$ pb
  - *Mesure W+jets dans les données:*
    - Plusieurs méthodes:
      - Une illustrée ici : le rapport W/Z



Estimation des fonds avec les données

- W+jets, suite
  - *Principe:*

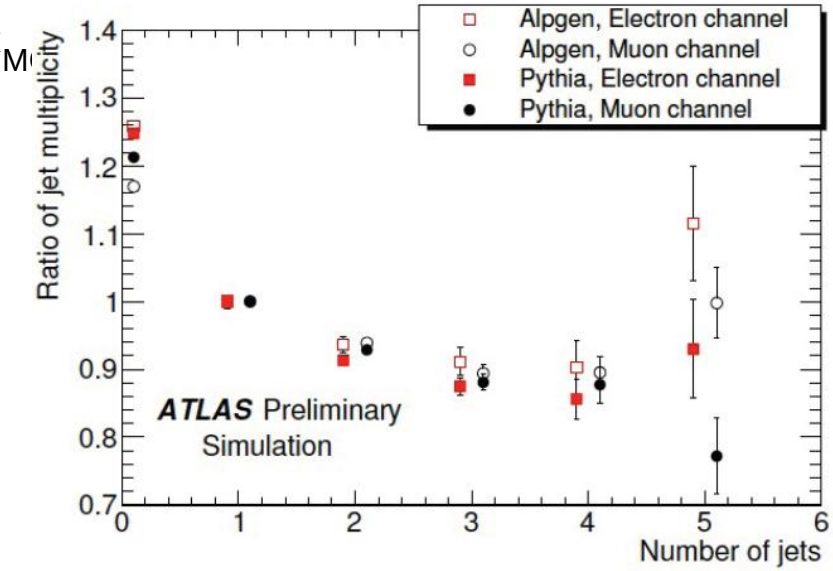
Incertitude ~ 10%

$$W+4j = Z+4j * (W+1,2,3j / Z+1,2,3j) * C_{MCW+jets,\ suite:}$$

Pureté des lots de contrôle → 10-20% systé. (QCD)

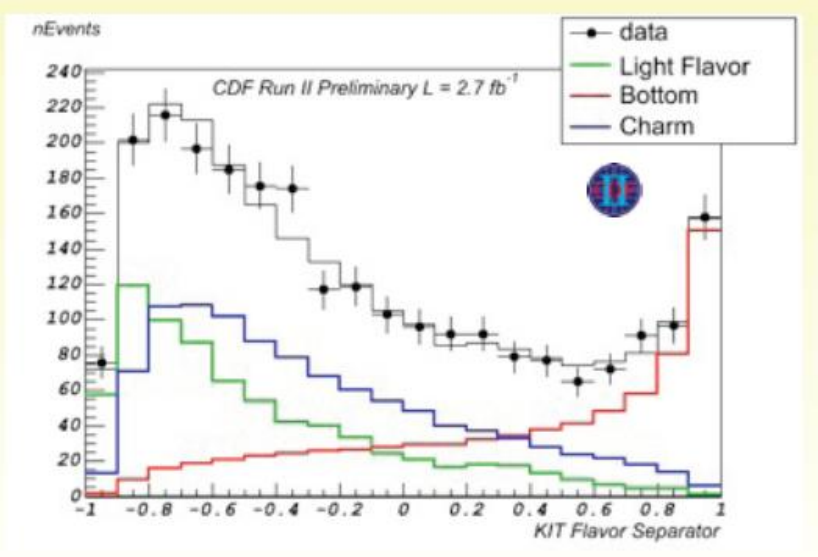
- Le rapport W/Z n'est pas constant avec le nombre de jets → facteur correctif C_{M}
- Le rapport W/Z pour n petit peut être mesuré tôt dans les données

(W+nj / Z+nj) / (W+1j/Z+1j)



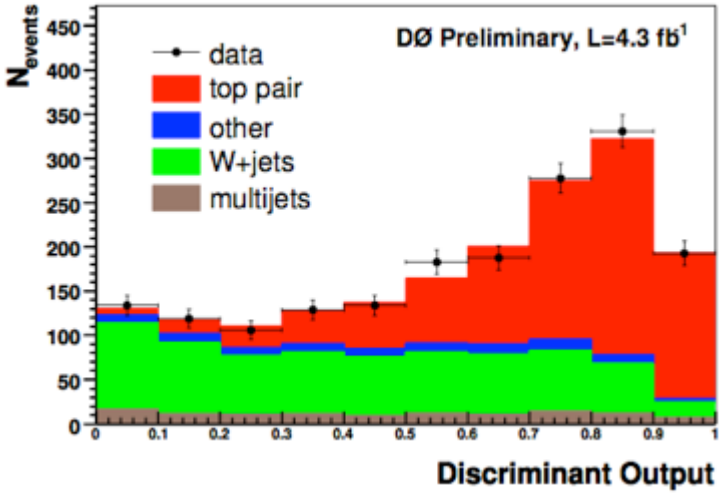
Estimation des fonds avec les données

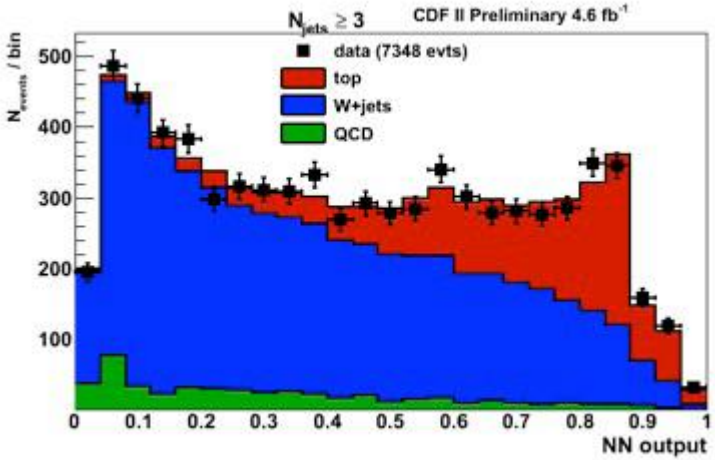
- W+jets, suite:
  - *Mesure de W+b(b)*
    - Environ 10% de W+jets
    - Domine après b-tagging
  - *Principe:*
    - Séparation de W+léger, W+c, W+b
    - Ajustement de W+c, W+b dans les événements à 1 et 2 jets → normalisation (MC) utilisée dans les événements à 4 jets



Mesure de la section efficace au Tevatron

- Canal lepton +jets (Méthode topologique)
  - *Estimation de Nobs et Nbkg:*
    - Choix d'une variable discriminante (aplanarité, mjjb,…)
    - Templates de cette variable
  - *Mesure de la section efficace:*
    - Ajustement de cette variable
      - (vraisemblance données/Monte Carlo)
  - *Avantage:*
    - Dépend moins du fond (fitté)
    - Inconvénient : dépend de la forme des distributions





Mesure de la section efficace au Tevatron

- Résultats:

channel	$\sigma_{t\bar{t}}$[pb]
e+jets	$6.53^{+0.79}_{-0.69}$ (stat+syst)
μ+jets	$8.37^{+1.08}_{-0.93}$ (stat+syst)
ℓ+jets	$7.70^{+0.79}_{-0.70}$ (stat+syst)

$$\sigma_{t\bar{t}} = 7.71 \pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.36(\text{sys}) \pm 0.45(\text{lumi})\text{pb}$$

- *$\Delta\sigma/\sigma$ = 9%*

– *Erreurs systématiques:*
  - Une illustration ⟶
  - Dominées par la luminosité
  - Puis JES,
  - Et générateur

Systematic	$t\bar{t}_{ANN}$
Luminosity	5.8
b-tag modeling	-
W+HF correction	-
Jet energy scale	2.9
Monte Carlo generator	2.6
Initial/final state radiation	0.4
PDF	0.9
Background shape model	1.9
Lepton ID/trigger	1.3
Total	7.5

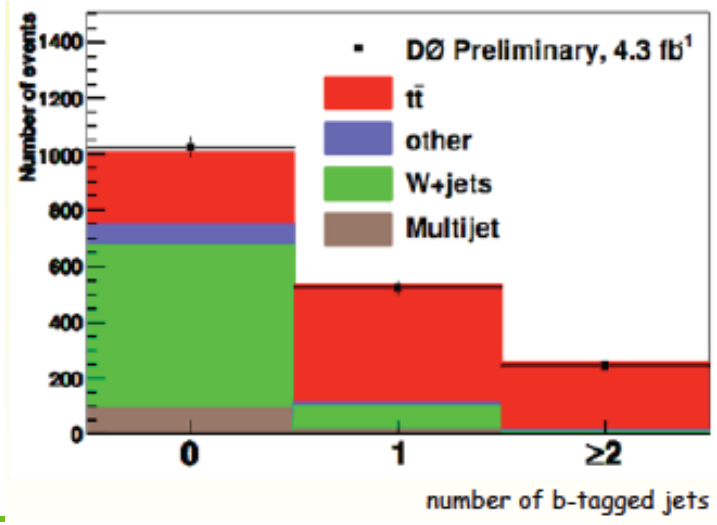
Mesure dela section efficace au Tevatron

- Méthode de comptage % jets:
  - *Comptage du nombre d'événements par bin en multiplicité des jets et jets b*
  - *Le taux de mauvaise identification des jets b est estimé par ailleurs*
  - *Mesure du fond sur les données*
- Résultats (été 2010):

channel	$\sigma_{t\bar{t}}$[pb]
e+jets	$7.41^{+1.07}_{-0.96}$ (stat+syst)
μ+jets	$8.60^{+1.27}_{-1.06}$ (stat+syst)
ℓ+jets	$7.93^{+1.04}_{-0.91}$ (stat+syst)

$$\sigma_{t\bar{t}} = 7.22 \pm 0.35(\text{stat}) \pm 0.56(\text{sys}) \pm 0.44(\text{lumi})\text{pb}$$

- *$\Delta\sigma/\sigma$ = 11 %*
  - *Systématiques semblables*



Mesure de la section efficace au Tevatron

- Réduction de l'erreur systématique liée à la mesure de la luminosité (CDF)
  - *La luminosité est connue grâce à la mesure expérimentale de détecteurs ad hoc et à la connaissance de la section efficace inélastique pp (ou ppbar)*
  - *Idée: utiliser la section efficace de production du Z*
    - Connue plus précisément,
    - Mesurée avec le même trigger

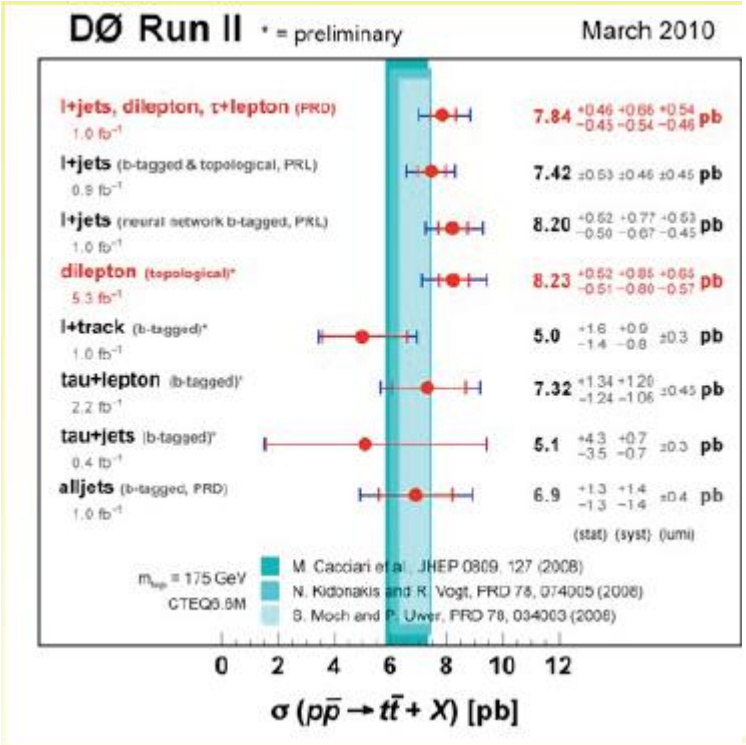
$$\sigma_{t\bar{t}} = \left(\frac{\sigma_{t\bar{t}}}{\sigma_Z}\right)_{exp} (\sigma_Z)_{th}$$

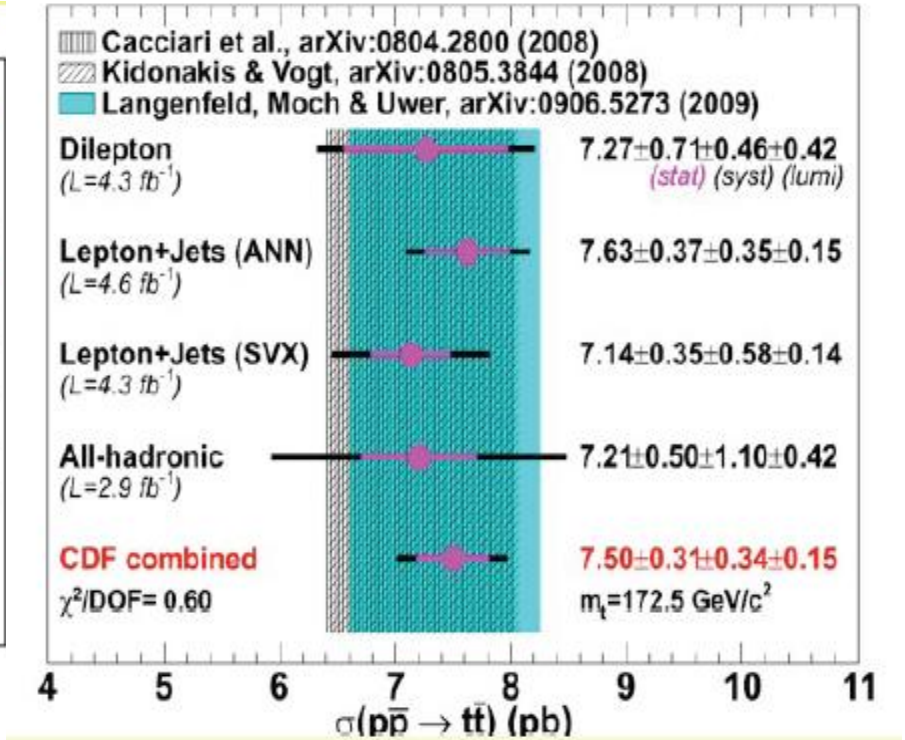
$$(\sigma_{Z/\gamma^* \to \ell\ell})_{th} = 251.3 \pm 5.0 \text{ pb}$$

$$\begin{aligned} \text{topo} : \sigma_{t\bar{t}} &= 7.82 \pm 0.38(\text{stat}) \pm 0.37(\text{sys}) \pm 0.15(\text{theory}) \text{ pb} \\ \text{b} - \text{tag} : \sigma_{t\bar{t}} &= 7.32 \pm 0.36(\text{stat}) \pm 0.56(\text{sys}) \pm 0.14(\text{theory}) \text{ pb} \end{aligned}$$

    - La précision est donc meilleure

Mesure de σ(ttbar) au Tevatron: résumé

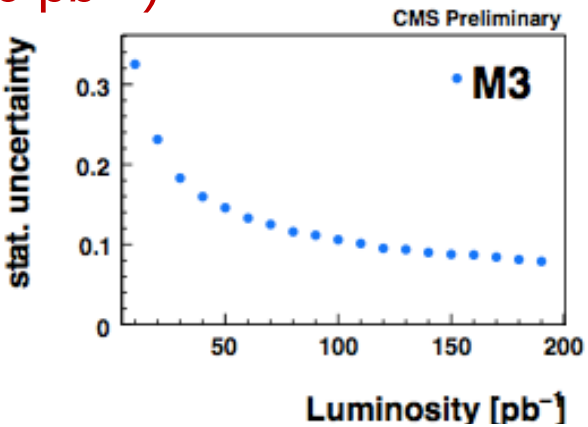




- Les valeurs sont compatibles:
  - *entre les différents canaux*
  - *Avec la prédiction théorique (Modèle Standard)*

Perspectives au LHC

- Mesure attendue rapidement (à partir de 20 pb^{-1})
  - *Perspectives à 7 TeV:*
    - Incertitude statistique:
      - Diminue rapidement avec la luminosité
    - Incertitudes systématiques:
      - Illustration (CMS, 20 pb^{-1})



	Relative Systematic Uncertainty
Jet Energy Scale	15%
$t\bar{t}$ MC Generator	10%
$t\bar{t}$ ISR/FSR uncertainty	3%
W+jets MC Factorization Scale	1%
W+jets MC Matching threshold	5%
Shape uncertainty of Single Top	1%
Shape uncertainty of QCD	2%
PDF uncertainty	5%
Total	20%

+ erreur sur la luminosité

Perspectives au LHC

- Phase 2 (14 TeV):
  - *Estimation:*
    - Pour 100 pb^{-1} , l'incertitude est dominée par les systématiques (de 5 à 10 %)
    - Exemple (ATLAS, canal lepton+jets):

$$\text{Likelihood method:} \quad \Delta\sigma/\sigma = (7(\text{stat}) \pm 15(\text{syst}) \pm 3(\text{pdf}) \pm 5(\text{lumi}))\%$$

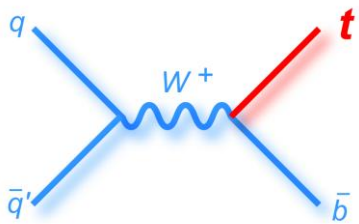
$$\text{Counting method:} \quad \Delta\sigma/\sigma = (3(\text{stat}) \pm 16(\text{syst}) \pm 3(\text{pdf}) \pm 5(\text{lumi}))\%$$

	Likelihood fit		**Counting method (elec)**	
Source	**Electron**	**Muon**	**Default**	***W* const.**
Statistical	10.5	8.0	2.7	3.5
Lepton ID efficiency	1.0	1.0	1.0	1.0
Lepton trigger efficiency	1.0	1.0	1.0	1.0
50% more W+jets	1.0	0.6	14.7	9.5
20% more W+jets	0.3	0.3	5.9	3.8
Jet Energy Scale (5%)	2.3	0.9	13.3	9.7
PDFs	2.5	2.2	2.3	2.5
ISR/FSR	8.9	8.9	10.6	8.9
Shape of fit function	14.0	10.4	-	-

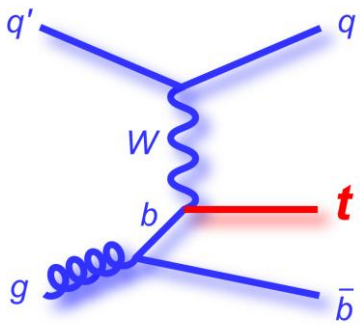
PRODUCTION ELECTROFAIBLE DU QUARK TOP

Introduction

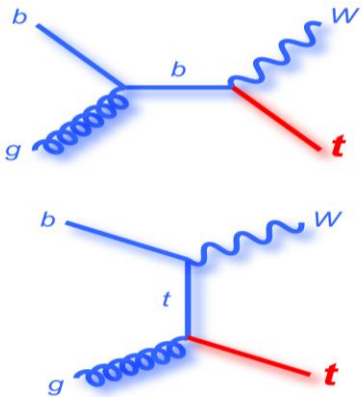
- Le quark top peut être produit individuellement
  - *Par interaction électrofaible*
  - *En association avec des quarks b*
  - *3 canaux:*



Voie s



Voie t



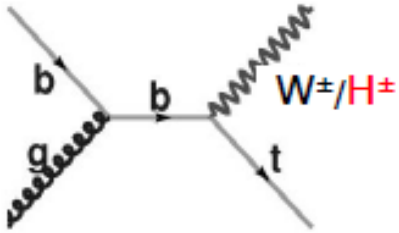
Voie Wt

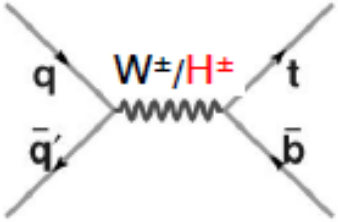
Section efficace théorique (pb)	Tevatron	LHC (7 TeV)	LHC (14 TeV)
Voie s	1.12 ± 0.05	3.94	10.65
Voie t	2.34 ± 0.13	58.72	246.6
Voie Wt	0.21 ± 0.03	13.10	66

Motivations

- Mesures dans le cadre du Modèle Standard:
  - *Section efficace de production*
    - Cohérence avec la prédiction théorique
    - Mesure de $|V_{tb}|$
    - Mesure de la largeur du quark top, de sa polarisation,…

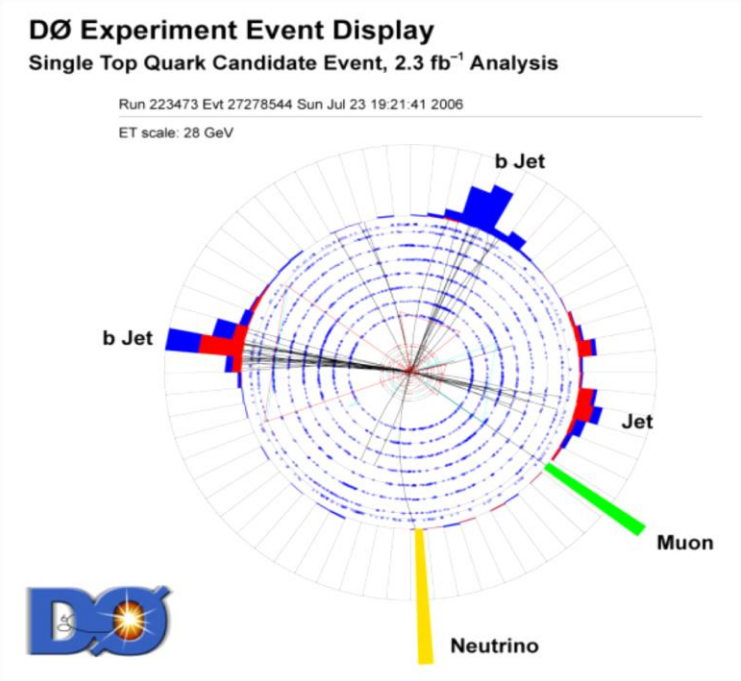
- Exploration de la physique au-delà du Modèle Standard:
  - *Couplages anormaux*
  - *Résonances (W', H^+ ,…)*
  - *FCNC*
  - *…*





Mesure de la section efficace au Tevatron

- Une longue quête
  - *Prédit 10 ans avant la découverte du quark top*
  - *Observé 12 ans après (2007)*
  - *Car:*
    - Extraction du bruit de fond délicate
    - Fonds: W+jets, QCD, tt, Z+jets, ..
  - *Observation en 2007*



- Mesures dans les voies s et t

- Signature:
  - *1 lepton isolé + E_T^{miss}*
  - *1 jet b de haut p_T*
  - *Au moins un autre jet*

Mesure de la section efficace au Tevatron

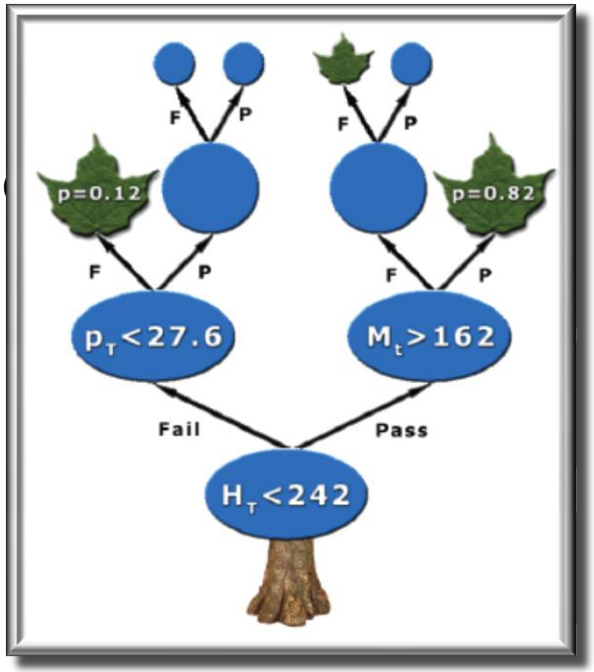
- Principe : analyse « multivariée »
  - *S/B et acceptances trop faibles après sélection*

    → *Autre méthode pour séparer le signal du bruit de fond*
  - *Principe:*
    - 1) choix de variables discriminantes (espace à n dimensions)
    - 2) définir une mesure qui maxime la distance signal/fond
    - 3) définir un critère d'optimisation
      - Maximiser la pureté, la significance statistique

- Plusieurs méthodes ont été mises au point:
  - *Réseaux de neurones*
  - *Boosted Decision Tree*
  - *Autres méthodes*

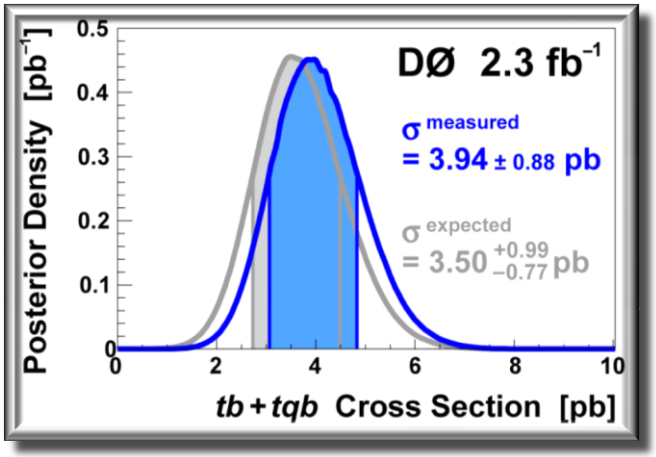
Mesure de la section efficace au Tevatron

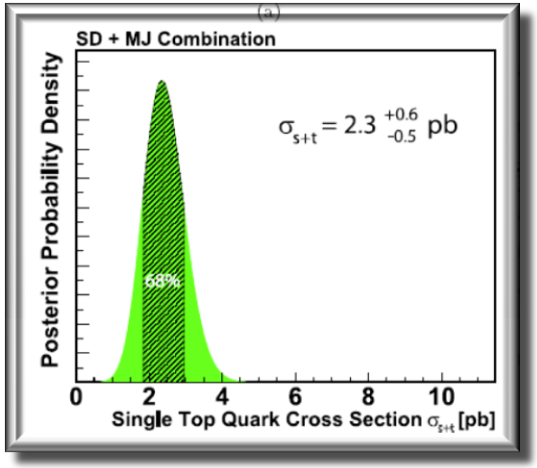
– *Arbres de décision:*
  - Succession de coupures binaires:
    – Un événement est classé signal
    – Puis coupure suivante,…
    – Le dernier nœud est une feuille définie par un critère de pureté
  - « Boosted »:
    – algorithme tourné sur un nombre important d'arbres,
    – Résultat moyenné
    – Pouvoir discriminant et stabilité meilleurs



Mesure de la section efficace au Tevatron

- Mesure de la section efficace (voie s + voie t):

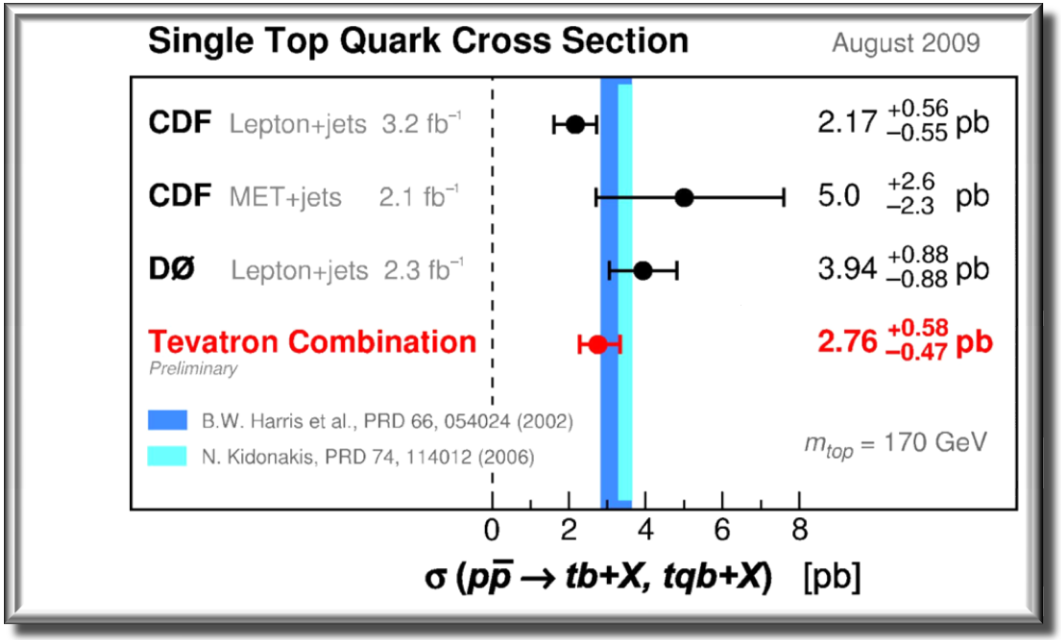




	Lumi (fb^{-1})	Cross Section (pb)	Expected Significance	Observed Significance
DØ	2.3	3.94±0.88	4.5σ	5.0σ
CDF	3.2	$2.3^{+0.6}_{-0.5}$	5.9σ	5.0σ

Mesure de la section efficace au Tevatron

- Combinaison des deux détecteurs:
  - *Pas d'écart % Modèle Standard*



Extraction de $|V_{tb}|$

- Le rapport section efficace mesurée/section efficace théorique est proportionnel à $|V_{tb}|^2$:

$$\Gamma^{\mu}_{Wtb} = -\frac{g}{\sqrt{2}} V_{tb} \left\{ \gamma^{\mu} \left[f_1^L P_L + f_1^R P_R \right] - \frac{i\sigma^{\mu\nu}}{M_W} (p_t - p_b)_{\nu} \left[f_2^L P_L + f_2^R P_R \right] \right\}$$

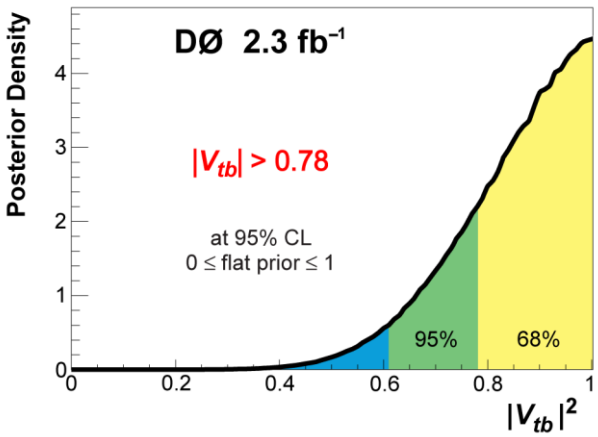
- Hypothèses d'étude:
  - $|V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2 << |V_{tb}|^2$
  - *couplage V-A pur ($f_1^R = f_2^L = f_2^R = 0$)*
  - *Point fort: aucune hypothèse sur le nombre de familles ni sur l'unitarité de CKM*

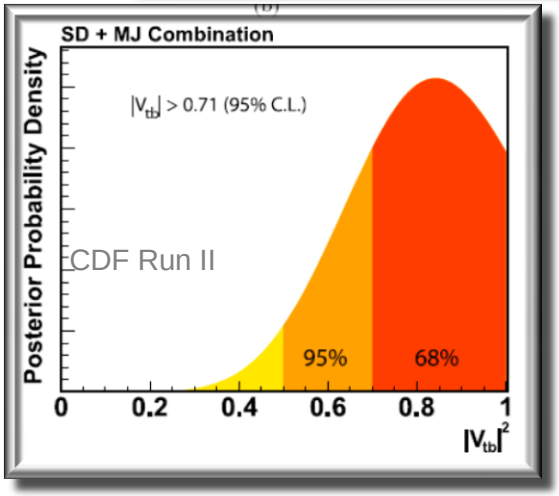
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

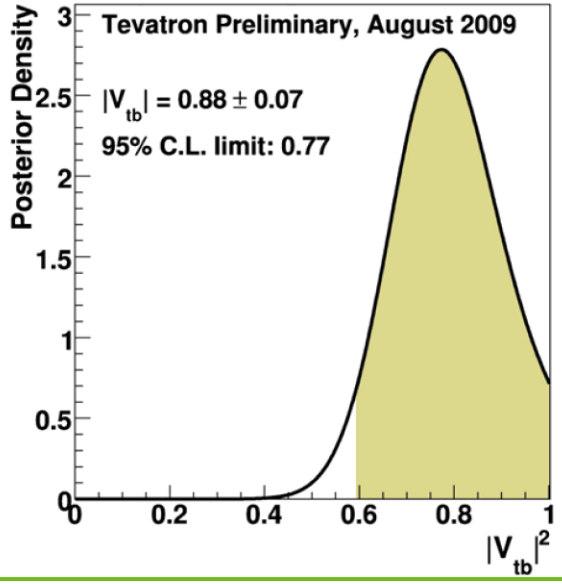
Mersure de $|V_{tb}|$ au Tevatron

- Par expérience:

$\|V_{tb}\|$	Measurement	Lower Limit ($0 \leq \|V_{tb}\|^2 \leq 1$)
DØ	1.07±0.12	0.78
CDF	0.91±0.13	0.71



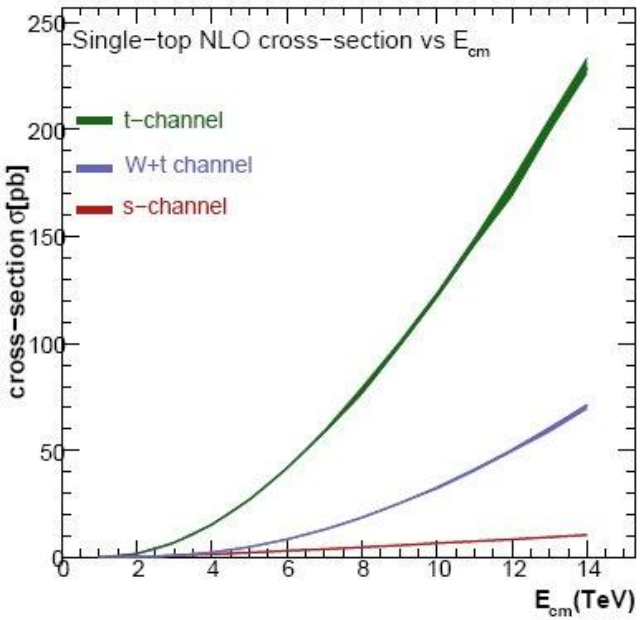


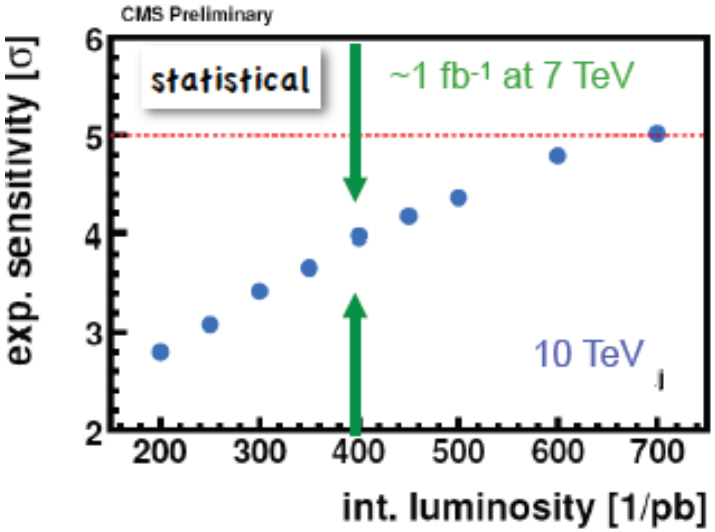


- Combinaison: $|V_{tb}| > 0.77$ (95% C.L.)

Perspectives au LHC

- Phase 1:
  - *Challenge!*
    - Bruit de fond ttbar très important
    - Grandes incertitudes sur le fond W+jet
  - *Estimation:*
    - Observation possible dans la voie s avec 1 fb-1 (ATLAS)
    - excès à 3 σ avec 500 pb-1



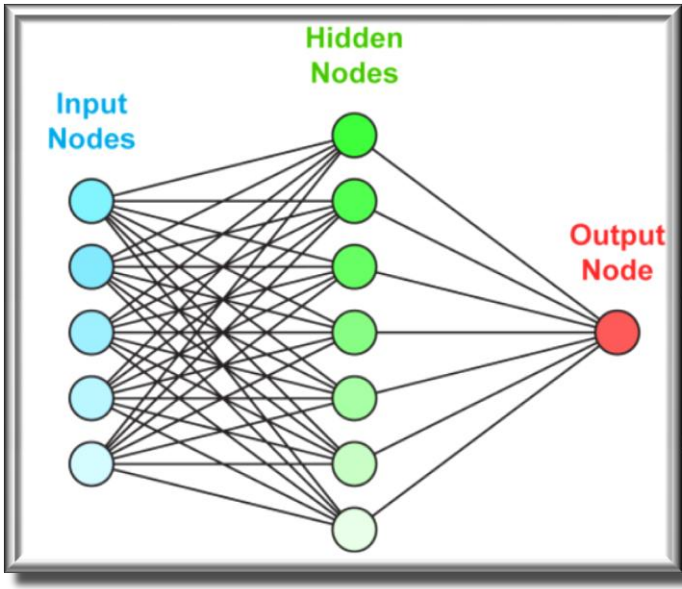


Perspectives au LHC

- Phase 2:
  - *Observation des 3 canaux:*
    - Voie t avec 1 fb^{-1}
    - Voies s et Wt avec 10 fb^{-1}
  - *Précision estimée:*
    - Exemple (CMS), voie s, 10 fb^{-1}:

$$\Delta\sigma/\sigma = 18\%(stat) + 31\%(syst) + 19\%(lumi)$$

  - *Mesure de $|V_{tb}|$:*
    - Exemple: ATLAS, 1 fb^{-1} , voie t:
      - Mesure de la section efficace : erreur de 23%
      - Mesure de |Vtb| : erreur de 12%

Mesure de la section efficace au Tevatron

- Réseau de neurones:
  - *Variables d'entrée:*
    - Choix des variables crucial:
      - Bien modélisées
      - Significance raisonnable
  - *Nœud de sortie:*
    - Variable fonction des nœuds précédents
    - Vraisemblance données/MC