

Mesure de la section efficace de production des paires tt auprès de l'expérience ATLAS et recherche de signes d'une nouvelle physique

Nancy Tannoury

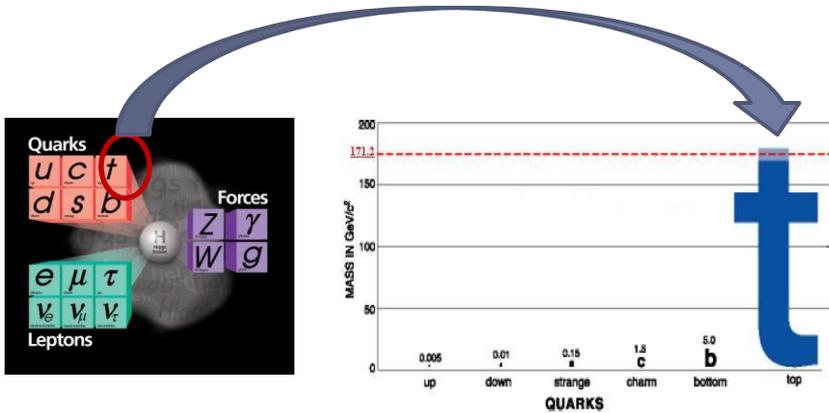
Directeur de thèse : Mossadek TALBY



Mesure de la section efficace tt

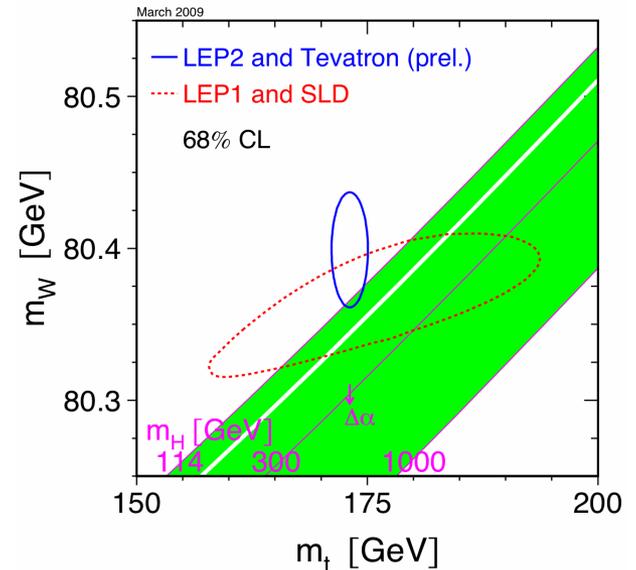
- ▶ **Cadre théorique :**
 - ▶ Le quark top dans le Modèle standard.
- ▶ **Cadre expérimentale :**
 - ▶ LHC et ATLAS.
- ▶ **Outils :**
 - ▶ Méthode pour mesurer l'efficacité de l'étiquetage des jets issus d'un quark b .
 - ▶ System8
 - ▶ Résultats et perspectives
 - ▶ Estimation du bruit de fond QCD multi-jets.
 - ▶ Méthode de la Matrice
 - ▶ Résultats et perspectives

Cadre Théorique



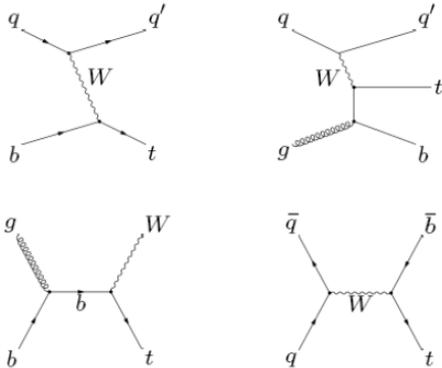
- ▶ Dernier quark découvert en 1995 au Tevatron
- ▶ $m_t = 171.3 \pm 1.2 \text{ GeV}$
- ▶ Durée de vie $\sim 10^{-25} \text{ s}$ et $\tau_{\text{QCD}} \sim 10^{-23} \text{ s}$
- ▶ Charge = $2/3 e$
- ▶ $I(J^P) = 0(1/2^+)$

- ▶ Le plus grand couplage de Yukawa avec le boson de Higgs $y_t \sim 1$ et sa masse est proche de l'échelle électrofaible: $m_t \approx v/\sqrt{2}$
- ▶ Contrainte indirecte sur la masse du boson de Higgs
- ▶ Recherche de signes de nouvelle physique:
 - ▶ événements $tt \rightarrow$ bruit de fond important pour plusieurs canaux de recherche
 - ▶ quark top \rightarrow les nouvelles particules .



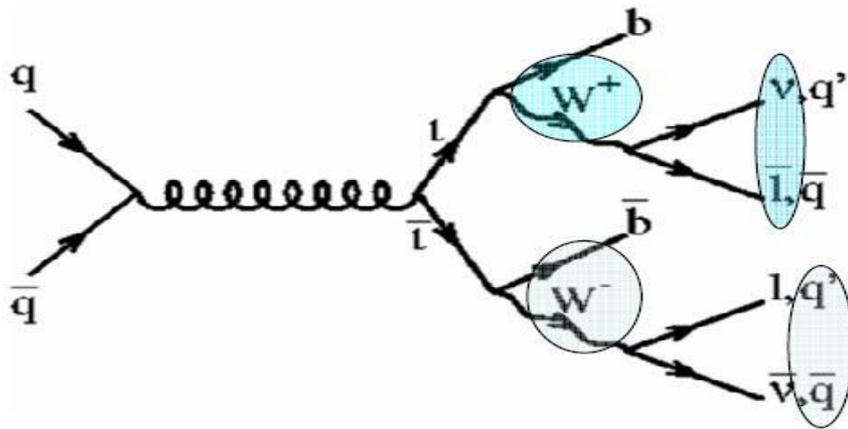
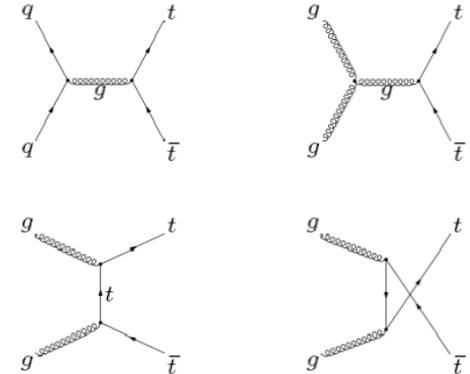
Cadre Théorique

interaction faible



**2 modes de production
du quark top au sein
du MS**

interaction forte



3 canaux de désintégration des paires tt :

- ▶ canal tout hadronique ($\sim 46\%$)
- ▶ canal di-leptonique ($\sim 10\%$)
- ▶ canal semi-leptonique ($\sim 44\%$)

▶ canal « electron+jets » :

- ▶ 1 électron
- ▶ 1 neutrino
- ▶ 2 jets issus de quarks b
- ▶ 2 jets issus de quarks légers

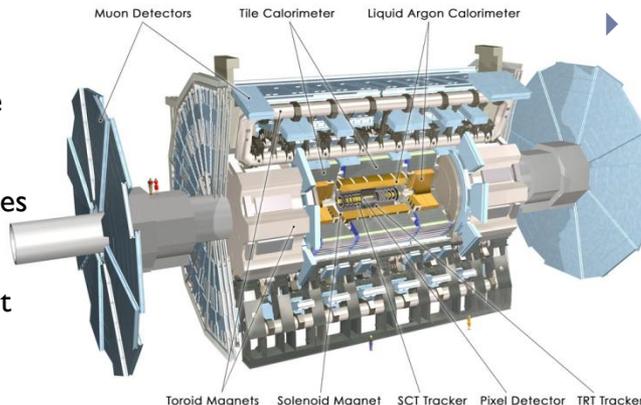
Cadre Expérimental

▶ LHC : Large Hadron Collider

- ▶ collisionneur proton-proton
- ▶ ~27 km de circonférence
- ▶ 23 Novembre 2009 : 1^{ères} collisions à 900 GeV
- ▶ 30 Novembre 2009 : collisions à 2.36 TeV → record mondial
- ▶ Depuis le 30 Mars 2010 : collisions à 7 TeV.

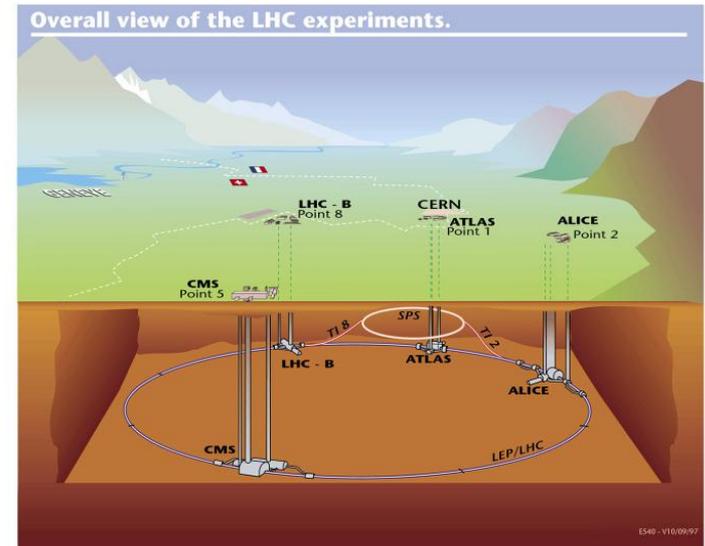
ATLAS :

- ▶ ~ 44 m de long
- ▶ ~ 25 m de diamètre
- ▶ ~ 7000 tonnes
- ▶ ~ 3000 Km de câbles
- ▶ ~ 3000 physiciens
- ▶ ~ 137 universités et laboratoires



- ▶ ATLAS est un expérience généraliste qui a comme buts :

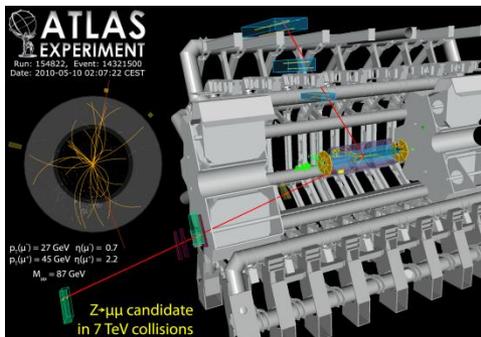
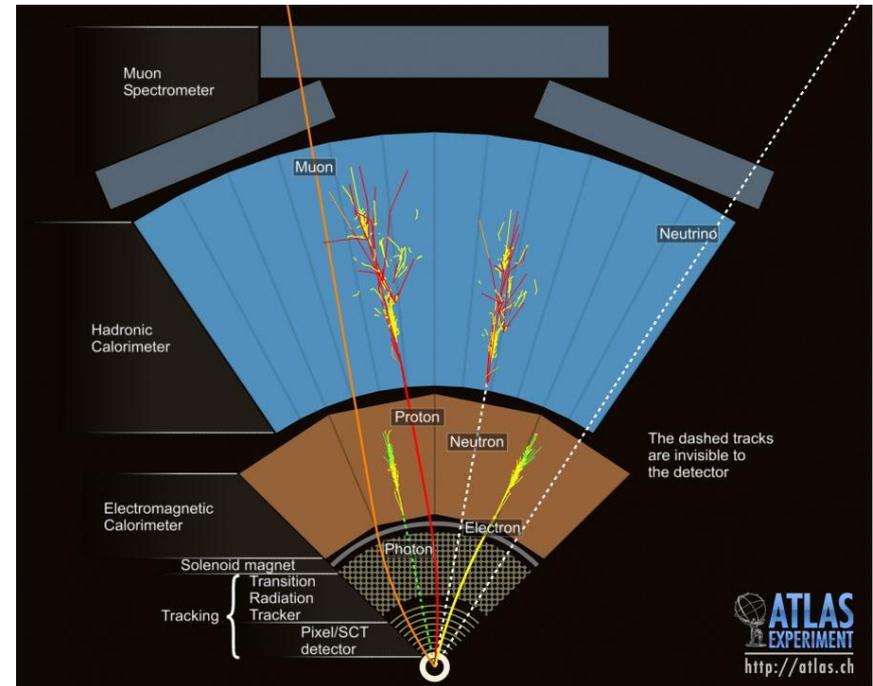
- ▶ La recherche du boson de Higgs
- ▶ La recherche des signes d'une nouvelle physique
- ▶ Mesure des précisions du MS de la physique des particules
 - ▶ L'étude des propriétés du quark top



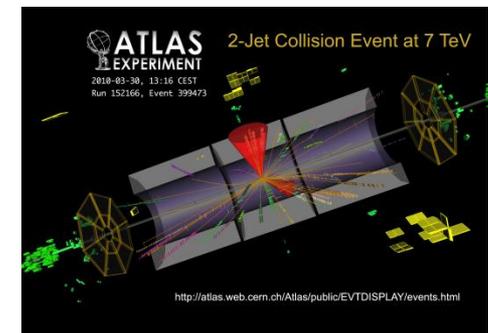
Détecteur ATLAS

Structure du détecteur ATLAS:

- ▶ Le détecteur interne de trace
 - ▶ Identification et reconstruction des trajectoires des particules chargées.
- ▶ La calorimétrie
 - ▶ Identification et mesure des énergies des particules.
- ▶ Le spectromètre à muon
 - ▶ Identification et mesure des impulsions des muons.



1^{ères} collisions à 7 TeV



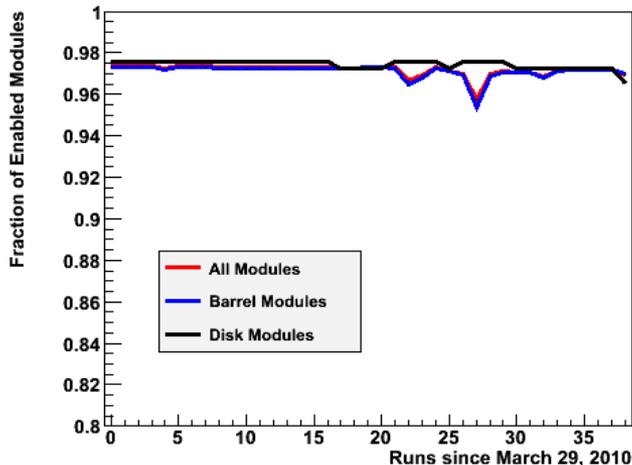
Détecteur pixel

Status du détecteur Pixel

- ▶ Le détecteur le plus proche du point d'interaction
- ▶ 80 millions de pixels répartis en des couches concentriques
- ▶ reconstruction des trajectoires des particules ainsi que des vertex → crucial pour le *b-tagging*
- ▶ La performance du *b-tagging* dépend en grande partie sur la performance du détecteur pixel



Shift Pixels : ~ 30 %



- ▶ # total de modules : 1744
- ▶ # de modules désactivés : ~3.1%
- ▶ efficacité des hits : 0.98 %

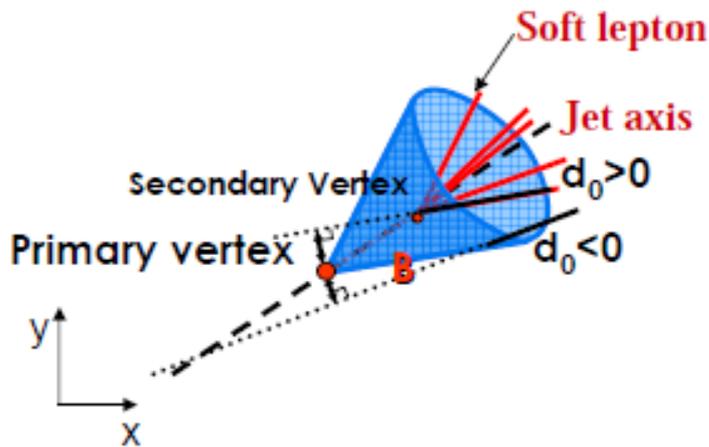
- ▶ **Shift online dans la salle de contrôle : surveillance des données et calibration du détecteur**
- ▶ **Shift offline : surveillance de la qualité des données et création du masque des pixels bruyants**

Outils

Etiquetage des jets issus d'un quark b

- ▶ L'étiquetage des jets issus d'un quark b est crucial pour :
 - ▶ la sélection d'un lot enrichi en événements tt
 - ▶ la mesure de la section efficace de production des paires bb
 - ▶ la recherche du boson de Higgs du MS de basse masse
 - ▶ la recherche de SUSY

Mesurer l'efficacité de l'étiquetage des jets issus d'un quark b est très important pour ces études : deux méthodes → **System8** et **pTrel**



- ▶ Les algorithmes d'étiquetage des jets issus de quark b reposent sur :
 - ▶ La présence d'un vertex secondaire
 - ▶ le quark b vol une certaine distance avant de se désintégrer
 - ▶ Les propriétés du paramètre d'impact
 - ▶ la distance minimale entre une trace associée au jet et le vertex primaire
 - ▶ La désintégration semi-leptonique des hadrons B
 - ▶ La présence d'un lepton mou dans le jet

System 8

Méthode pour mesurer l'efficacité de l'étiquetage des jets issus d'un quark b dans les données

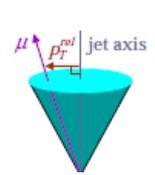
System 8 : 8 équations avec 8 inconnus

2 échantillons de compositions différentes de saveurs lourdes

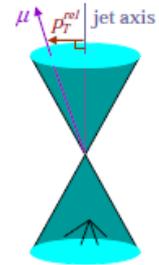
- ▶ *Muon-jets* : jets contenant un muon mou
- ▶ *Di-jets Muon-jets* : jets contenant un muon mou avec un jet opposé étiqueté b

2 algorithmes d'étiquetages non-corrélés:

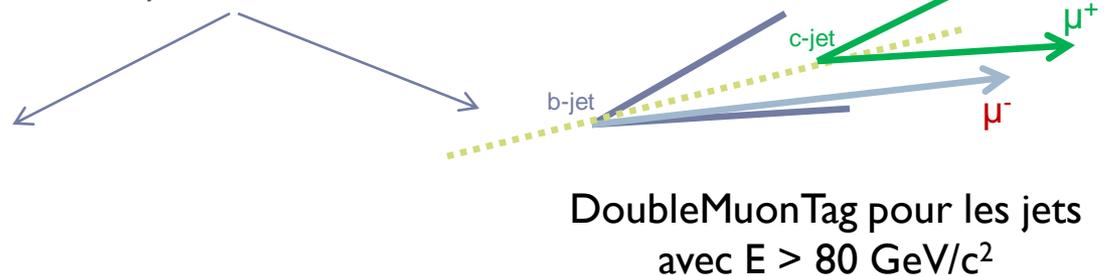
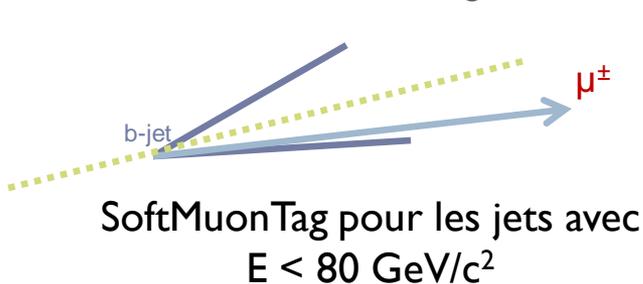
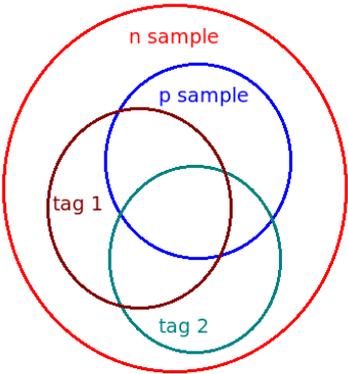
- ▶ LifeTime algorithme : algorithme basé sur les propriétés du vertex secondaire et/ou le paramètre d'impact des traces associées au jet
- ▶ algorithme à base d'un lepton : un muon



n-sample :
muon-jets



p-sample :
muon-jets
+ btb
b-tagged jet



System 8 : Equations

System 8 : Les équations

Estimés du MC

des jets dans
chaque échantillon

$$n = n_b + n_{cl}$$

$$p = p_b + p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec le LT algorithme

$$n^{LT} = \varepsilon_b^{LT} n_b + \varepsilon_{cl}^{LT} n_{cl}$$

$$p^{LT} = \alpha_6 \varepsilon_b^{LT} p_b + \alpha_4 \varepsilon_{cl}^{LT} p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec le SM
algorithme

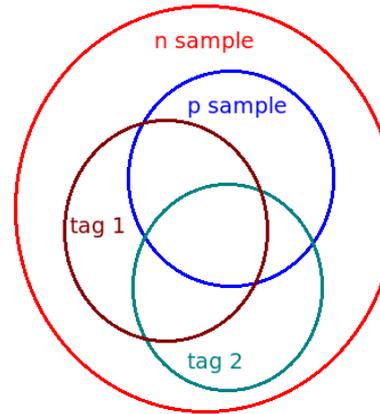
$$n^{SM} = \varepsilon_b^{SM} n_b + \varepsilon_{cl}^{SM} n_{cl}$$

$$p^{SM} = \alpha_5 \varepsilon_b^{SM} p_b + \alpha_3 \varepsilon_{cl}^{SM} p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec les 2
algorithme

$$n^{LT,SM} = \alpha_1 \varepsilon_b^{LT} \varepsilon_b^{SM} n_b + \alpha_2 \varepsilon_{cl}^{LT} \varepsilon_{cl}^{SM} n_{cl}$$

$$p^{LT,SM} = \alpha_7 \alpha_5 \alpha_6 \varepsilon_b^{LT} \varepsilon_b^{SM} p_b + \alpha_8 \alpha_3 \alpha_4 \varepsilon_{cl}^{LT} \varepsilon_{cl}^{SM} p_{cl}$$



$$\alpha_1 = \varepsilon_b^{LT,SM,n} / (\varepsilon_b^{LT,n} \varepsilon_b^{SM,n})$$

$$\alpha_2 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,n} / (\varepsilon_{cl}^{LT,n} \varepsilon_{cl}^{SM,n})$$

$$\alpha_3 = \varepsilon_{cl}^{SM,p} / \varepsilon_{cl}^{SM,n}$$

$$\alpha_4 = \varepsilon_{cl}^{LT,p} / \varepsilon_{cl}^{LT,n}$$

$$\alpha_5 = \varepsilon_b^{SM,p} / \varepsilon_b^{SM,n}$$

$$\alpha_6 = \varepsilon_b^{LT,p} / \varepsilon_b^{LT,n}$$

$$\alpha_7 = \varepsilon_b^{LT,SM,p} / (\varepsilon_b^{LT,p} \varepsilon_b^{SM,p})$$

$$\alpha_8 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,p} / (\varepsilon_{cl}^{LT,p} \varepsilon_{cl}^{SM,p})$$

System 8 : Solution

System 8 : Les équations

des jets dans
chaque échantillon

$$n = n_b + n_{cl}$$

$$p = p_b + p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec le LT algorithme

$$n^{LT} = \varepsilon_b^{LT} n_b + \varepsilon_{cl}^{LT} n_{cl}$$

$$p^{LT} = \alpha_6 \varepsilon_b^{LT} p_b + \alpha_4 \varepsilon_{cl}^{LT} p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec le SM
algorithme

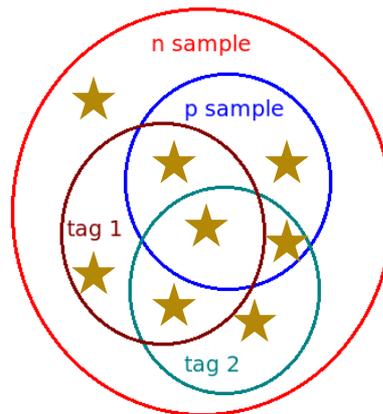
$$n^{SM} = \varepsilon_b^{SM} n_b + \varepsilon_{cl}^{SM} n_{cl}$$

$$p^{SM} = \alpha_5 \varepsilon_b^{SM} p_b + \alpha_3 \varepsilon_{cl}^{SM} p_{cl}$$

des jets étiquetés
avec les 2
algorithmes

$$n^{LT,SM} = \alpha_1 \varepsilon_b^{LT} \varepsilon_b^{SM} n_b + \alpha_2 \varepsilon_{cl}^{LT} \varepsilon_{cl}^{SM} n_{cl}$$

$$p^{LT,SM} = \alpha_7 \alpha_5 \alpha_6 \varepsilon_b^{LT} \varepsilon_b^{SM} p_b + \alpha_8 \alpha_3 \alpha_4 \varepsilon_{cl}^{LT} \varepsilon_{cl}^{SM} p_{cl}$$



Estimés du MC

$$\alpha_1 = \varepsilon_b^{LT,SM,n} / (\varepsilon_b^{LT,n} \varepsilon_b^{SM,n})$$

$$\alpha_2 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,n} / (\varepsilon_{cl}^{LT,n} \varepsilon_{cl}^{SM,n})$$

$$\alpha_3 = \varepsilon_{cl}^{SM,p} / \varepsilon_{cl}^{SM,n}$$

$$\alpha_4 = \varepsilon_{cl}^{LT,p} / \varepsilon_{cl}^{LT,n}$$

$$\alpha_5 = \varepsilon_b^{SM,p} / \varepsilon_b^{SM,n}$$

$$\alpha_6 = \varepsilon_b^{LT,p} / \varepsilon_b^{LT,n}$$

$$\alpha_7 = \varepsilon_b^{LT,SM,p} / (\varepsilon_b^{LT,p} \varepsilon_b^{SM,p})$$

$$\alpha_8 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,p} / (\varepsilon_{cl}^{LT,p} \varepsilon_{cl}^{SM,p})$$

Solution

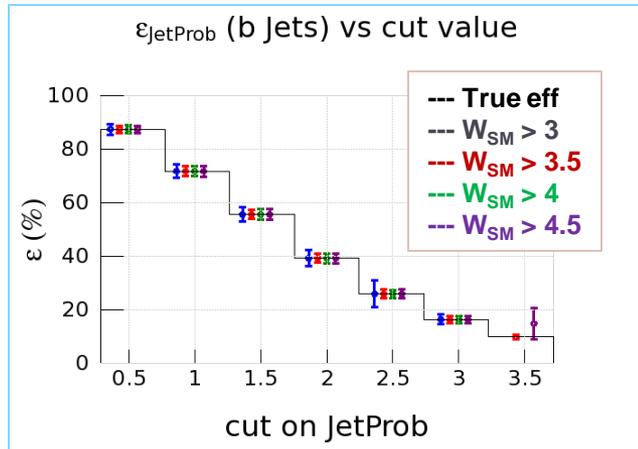
fit en utilisant une fonction de minimisation χ^2 en utilisant MINUIT

8 observables – 8 paramètres = 0 ddl

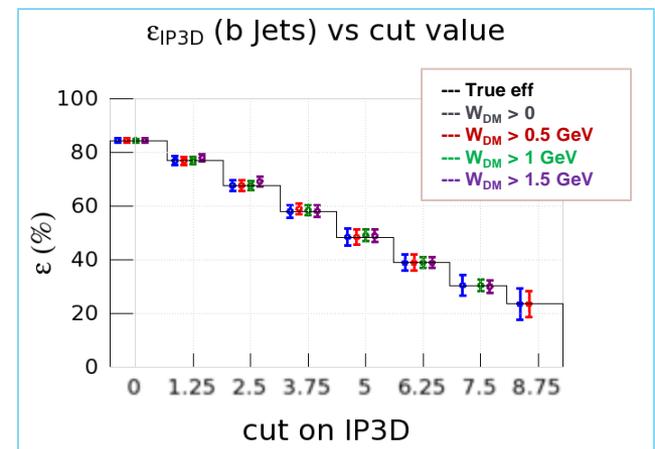
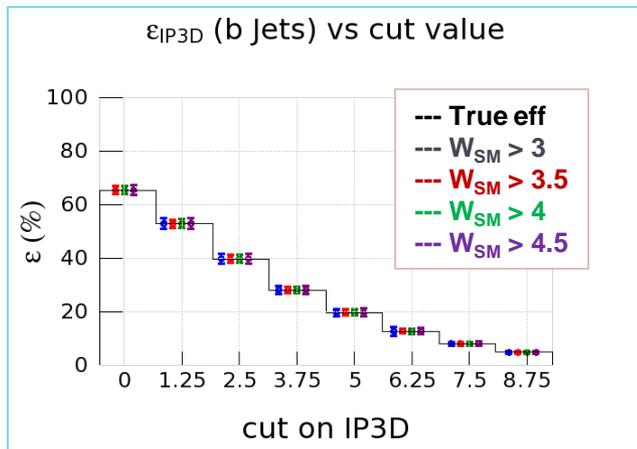
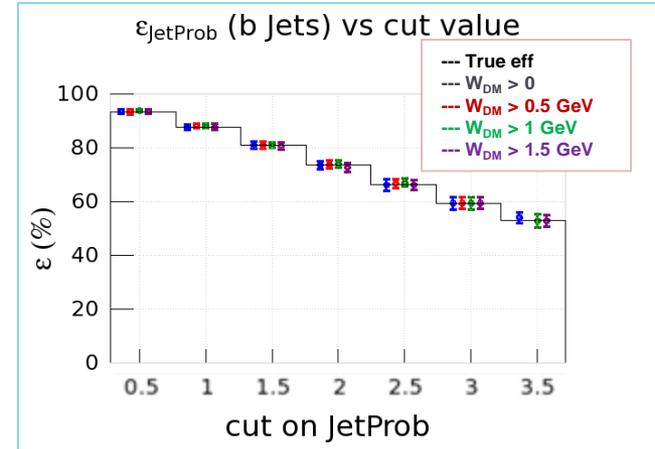
→ System contraint

System 8 : Résultats

Jets avec $E < 80 \text{ GeV}/c^2$ (Avec SMT)



Jets avec $E > 80 \text{ GeV}/c^2$ (Avec DMT)



Analyse $t\bar{t}$

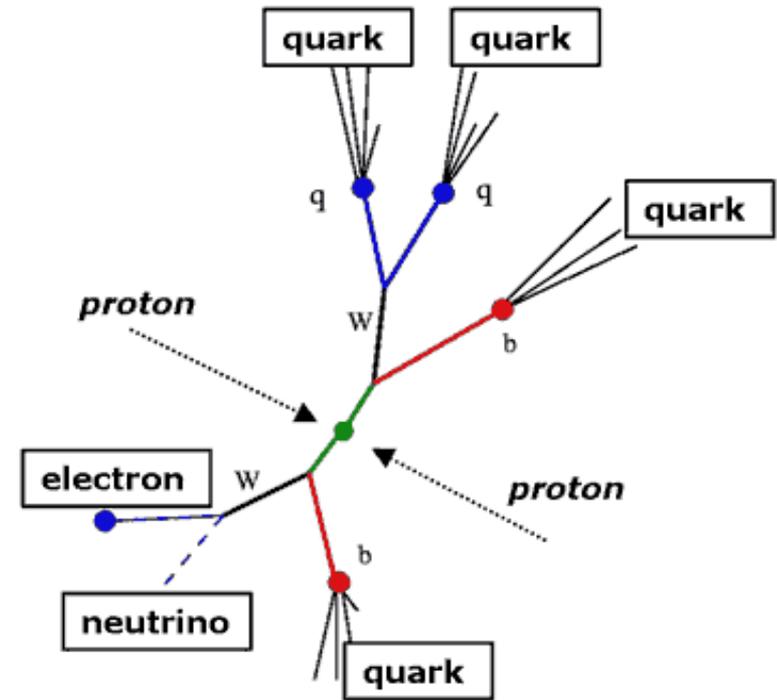
Canal « électron + jets »

▶ Présélection:

- ▶ Un électron (loose ou medium → diapo prochain):
 - ▶ $p_T > 20$ GeV
 - ▶ $|\eta| < 2.5$
 - ▶ $1.37 < |\eta| < 1.52$ exclue
- ▶ Au moins 4 jets avec $p_T > 20$ GeV
 - ▶ Dont au moins 3 avec $p_T > 40$ GeV

▶ Bruits de fond:

- ▶ Physique:
 - ▶ $W \rightarrow e\nu$ + jets additionnels : $\sigma \sim 13 \times 10^3$ pb
 - ▶ Production du top individuel : $\sigma \sim 15$ pb
- ▶ Instrumental:
 - ▶ QCD multi-jets : $\sigma \sim 10^9$ pb
 - ▶ Modélisation des événements est très incertaine
 - ▶ Problème de statistique ($\sim 3\,500\,000$ evts générés → $L \sim 0.033$ pb $^{-1}$)

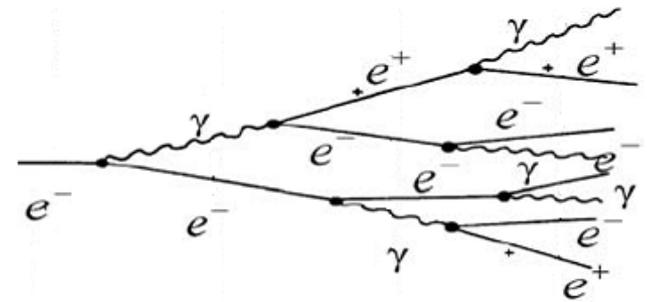


Identification des électrons

Electron = dépôt d'énergie dans le calorimètre EM + trace correspondante dans le détecteur interne.

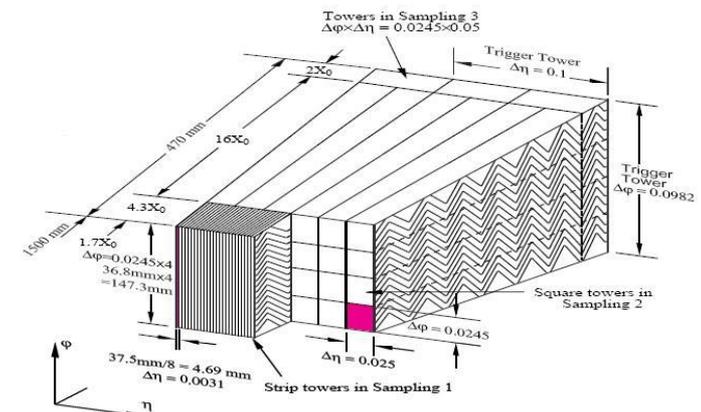
▶ Coupures Loose : informations du calorimètre EM:

- ▶ Exemple:
- ▶ Largeur de la gerbe
- ▶ Rapport entre la fuite d'énergie dans le calorimètre hadronique et l'énergie de l'amas.
- ▶ L'énergie dans le deuxième compartiment du calorimètre EM
- ▶ Très bonne efficacité d'identification des électrons ($\sim 88\%$) mais faible rejection du bruit de fond



▶ Coupures Medium : informations du calorimètre EM + informations du détecteur interne :

- ▶ Exemple:
- ▶ Nombre de coups dans le détecteur interne.
- ▶ Forme de la gerbe dans le calorimètre EM.
- ▶ Les énergies dans le calorimètre EM.
- ▶ Réduction de l'efficacité d'identification ($\sim 77\%$) mais amélioration de la rejection du bruit de fond

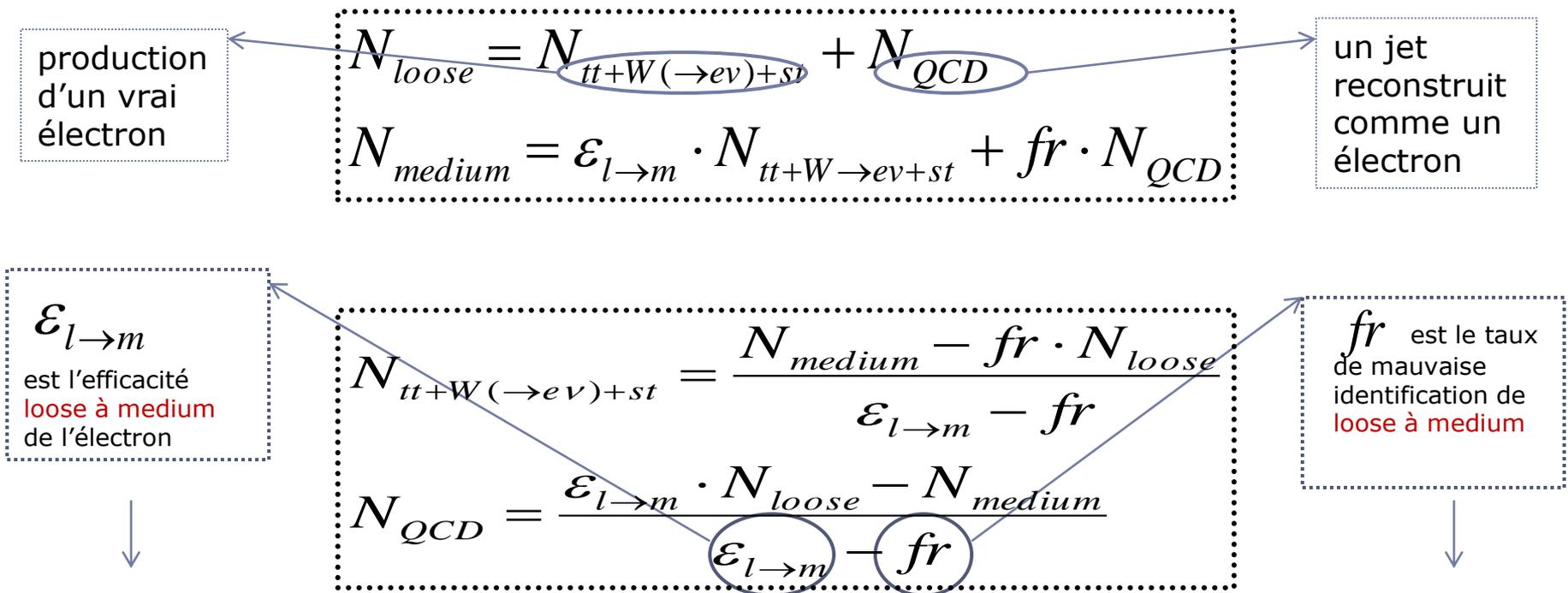


Estimation du bruit de fond QCD multi-jets

Méthode de la Matrice : Estimation du bruit de fond QCD dans les données

Deux échantillons différents de l'analyse tt :

N_{loose} le # d'événements qui passe l'analyse tt en présélectionnant un **électron loose**,
et N_{medium} en présélectionnant un **électron medium**

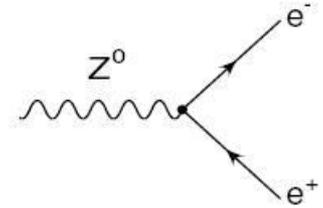


Développer deux méthodes qui peuvent être appliquées sur les données pour mesurer **l'efficacité loose à medium** de l'électron et **le taux de mauvaise identification**

Méthode Tag and probe

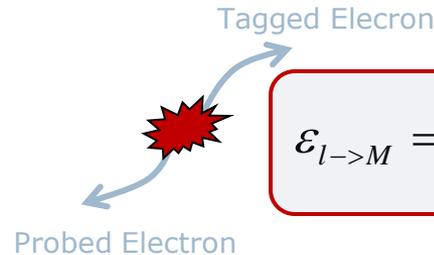
Mesure de l'efficacité loose → medium avec la méthode tag and probe

- ▶ **Tag and Probe** appliquée sur les données se base sur le processus $Z \rightarrow ee$
 - ▶ Etiqueter un propre échantillon d'électrons en demandant un électron medium dans l'événement
 - ▶ Mesurer l'efficacité loose à medium en utilisant le second électron



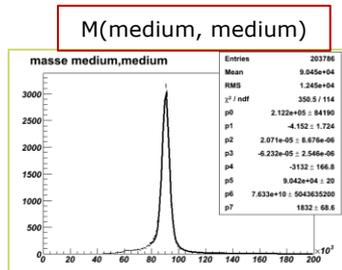
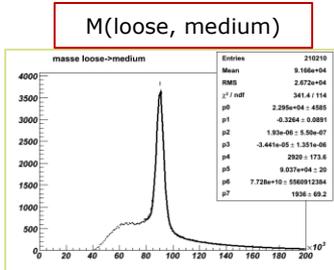
Présélection:

- **Evénements:** # électrons = 2
 $\Delta\phi(e,e) > 3\pi/4$
- **Electrons:** $P_t > 20$ GeV
 $|\eta| < 2.5$
 $1.37 < |\eta| < 1.52$ exclue



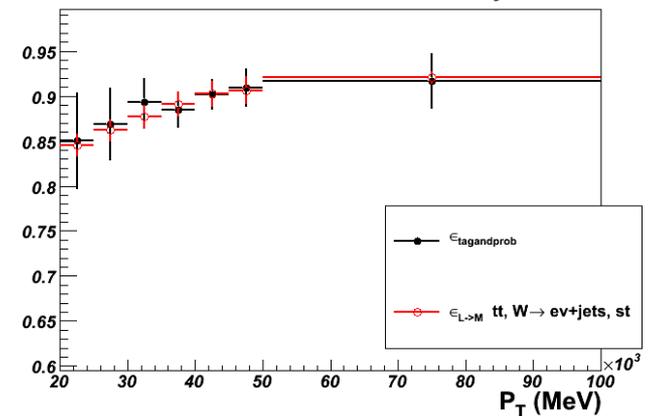
$$\varepsilon_{l \rightarrow M} = \frac{N_2}{N_1}$$

N_2 : # d'evts avec 2 e medium
 N_1 : # d'evts avec au moins un e medium



Ajustement avec la somme de deux fonctions:
une fonction Gaussienne convolutive avec une Breit-Wigner pour le signal + fonction exponentielle pour le bruit de fond

Loose to medium electron efficiency



Taux de mauvaise identification

Mesure du taux de la mauvaise identification de l'électron (fake rate)

Le fake rate = le taux suivant lequel un **jet hadronique** est mal-identifié et reconstruit comme un **électron loose**, passe les coupures medium et sera identifié comme un **électron medium**.

Présélection:

- Petite énergie transverse manquante (< 10 GeV)
- Un **jet hadronique**
 - $P_t > 20$ GeV
 - $|\eta| < 2.5$
 - $1.37 < |\eta| < 1.52$ exclue
- Un **électron loose** émis dos-à-dos avec le jet $\Delta\phi(e, \text{jet}) > 3\pi/4$

Elimine la contamination de l'étude de ($W \rightarrow e\nu$) + jets additionnels

Elimine la contamination de l'étude de $Z \rightarrow ee$

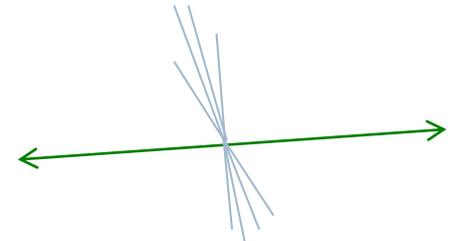
Identifier

- N_1 : le # d'événements avec un jet et un électron émis dos-à-dos
- N_2 : le # d'événements où l'électron loose passe les coupures medium

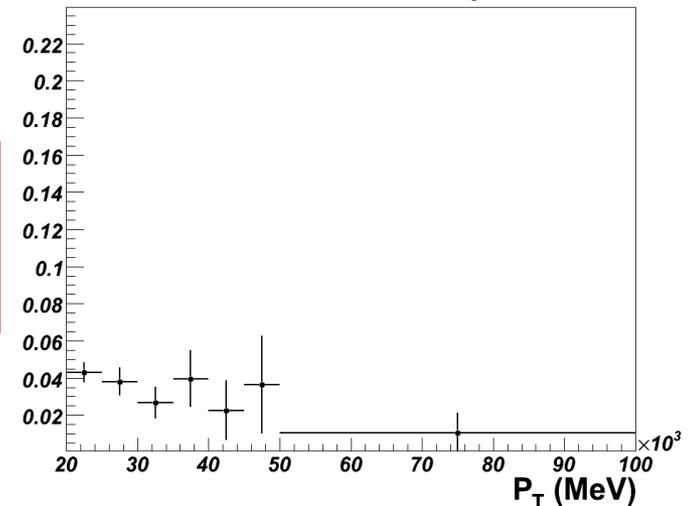
$$fr = \frac{N_2}{N_1}$$

En cours d'étude :

le changement du fake rate dans les échantillons étiquetés et sa variation dans les 2 topologie d'événements : tt et di-jets.



fake rate as a function of P_t

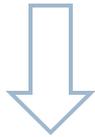


Estimation du bruit de fond QCD multi-jets

Résultat

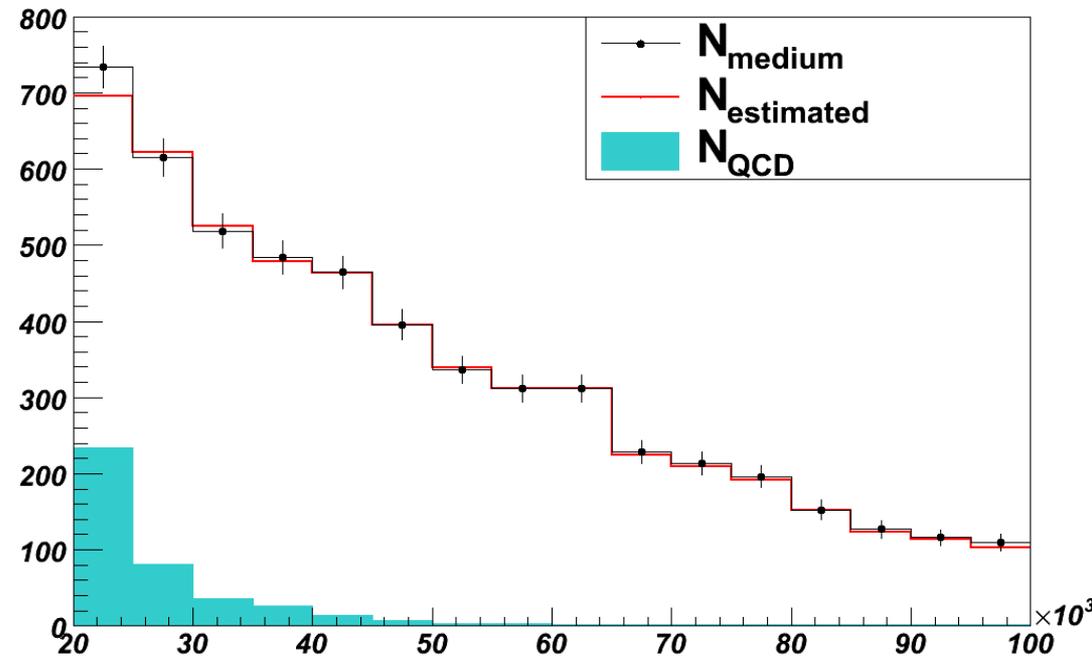
$$N_{loose} = N_{tt+W(\rightarrow ev)+st} + N_{QCD}$$

$$N_{medium} = \epsilon_{l \rightarrow m} \cdot N_{tt+W \rightarrow ev+st} + fr \cdot N_{QCD}$$



$$N_{tt+W(\rightarrow ev)+st} = \frac{N_{medium} - fr \cdot N_{loose}}{\epsilon_{l \rightarrow m} - fr}$$

$$N_{QCD} = \frac{\epsilon_{l \rightarrow m} \cdot N_{loose} - N_{medium}}{\epsilon_{l \rightarrow m} - fr}$$



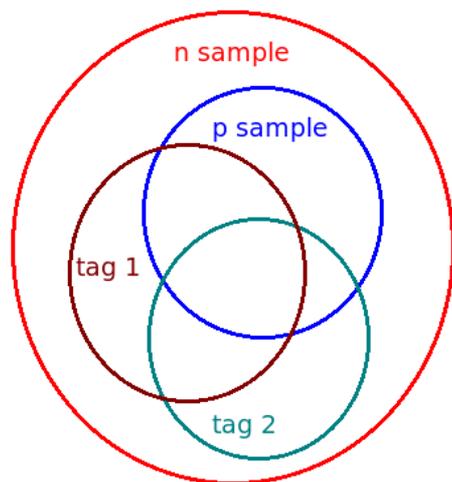
Résumé

- ▶ Etude menant à la mesure de:
 - ▶ la section efficace de production des paires tt dans ATLAS et recherche de signes d'une nouvelle physique
- ▶ Dans le cadre de cette analyse on travaille sur les outils suivantes:
 - ▶ Mesure de l'efficacité des jets issus d'un quark b
 - ▶ System 8 : méthode d'estimation des performances b -tagging à partir des données dans le lot muon+jets
 - ▶ L'estimation du bruit de fond QCD multi-jets
 - ▶ Méthode de la Matrice : Système d'équations linéaires ayant comme input l'efficacité et le taux de mauvaise identification, mesurés dans les données.

Merci pour votre attention

Back up

System8 Solution(1) : Fixed α Fit



- ▶ 8 disjoint (independent) sets of events that are measured.
 - ▶ the error on the # of evts in each set i is $\sqrt{N_i}$
 - ▶ 8 parameters :
 - ▶ 4 efficiencies : $\mathcal{E}_b^{LT}, \mathcal{E}_b^{SM}, \mathcal{E}_{cl}^{LT}, \mathcal{E}_{cl}^{SM}$
 - ▶ 4 sub-samples flavor composition : p_b, p_{cl}, n_b, n_{cl}
 - ▶ The α coefficients:
 - ▶ Estimated from Monte Carlo
- ▶ We bin by category and fit the population of each category to the 8 model parameters :
- ▶ χ^2 fit using MINUIT :
 - ▶ 8 bins – 8 parameters = 0 dof (completely constrained)
 - ▶ χ^2 at minimum must be 0. We “solve” but also obtain statistical error using the fit method.

System8 Solution(2) : Floating α Fit

$$\alpha_1 = \varepsilon_b^{LT,SM,n} / (\varepsilon_b^{LT,n} \varepsilon_b^{SM,n})$$

$$\alpha_2 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,n} / (\varepsilon_{cl}^{LT,n} \varepsilon_{cl}^{SM,n})$$

$$\alpha_3 = \varepsilon_{cl}^{SM,p} / \varepsilon_{cl}^{SM,n}$$

$$\alpha_4 = \varepsilon_{cl}^{LT,p} / \varepsilon_{cl}^{LT,n}$$

$$\alpha_5 = \varepsilon_b^{SM,p} / \varepsilon_b^{SM,n}$$

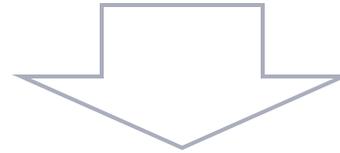
$$\alpha_6 = \varepsilon_b^{LT,p} / \varepsilon_b^{LT,n}$$

$$\alpha_7 = \varepsilon_b^{LT,SM,p} / (\varepsilon_b^{LT,p} \varepsilon_b^{SM,p})$$

$$\alpha_8 = \varepsilon_{cl}^{LT,SM,p} / (\varepsilon_{cl}^{LT,p} \varepsilon_{cl}^{SM,p})$$

The α coefficients:

- ▶ Estimated from Monte Carlo
- ▶ Their statistical errors from Monte Carlo enter in the fit
→ Full Covariance between all the 8 α coefficients



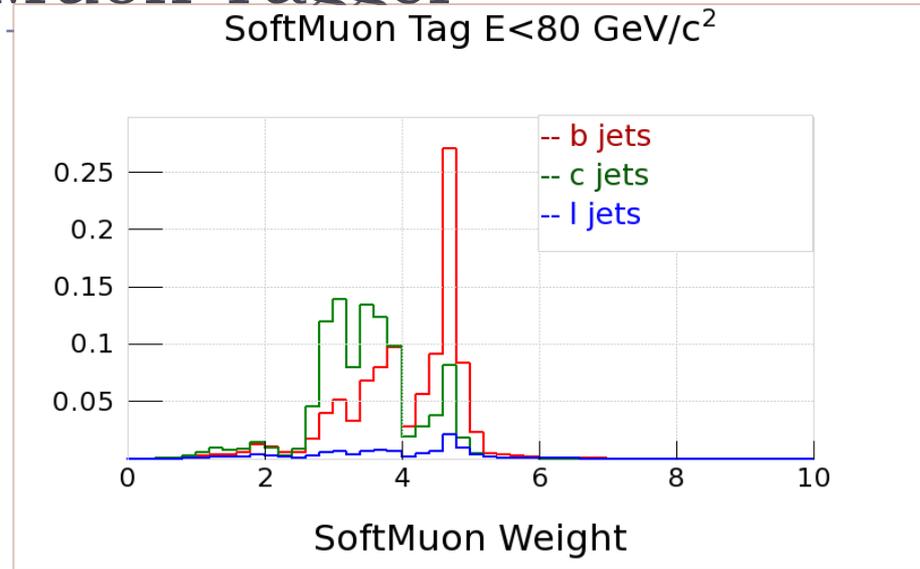
- ▶ Extend the fit by floating the α coefficients
- ▶ Add a term $(\alpha - \alpha_0)^T \mathbf{C}^{-1} (\alpha - \alpha_0)$ to the χ^2 to constrain them.
→ Fit has 16 inputs + 16 parameters
→ still 0 dof

Note:

In this study we estimate the alphas from the same sample we use for calibration. → perfect correction

Calibration Using Soft Muon Tagger

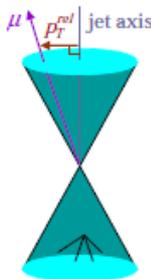
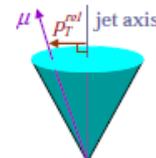
- ▶ **SoftMuon tagger:**
 - ▶ Likelihood ratio of the p_T^{rel}
 - ▶ good purity + low correlation with the lifetime taggers
 - ▶ *used to calibrate the b-tagging efficiency for jets with $E < 80 \text{ GeV}$*



- ▶ **Pre-selection:**
 - ▶ jets:
 - ▶ $p_T > 15 \text{ GeV}$
 - ▶ $|\eta| < 2.5$
- ▶ **n-sample:**
 - ▶ Only jets with a muon
 - ▶ $\text{SMT} > 0$ (one muon found by the SoftMuon tagger)



- ▶ **p-sample:**
 - ▶ opposite side b-tagged jet :
 - ▶ **tagged with the tagger to calibrate**



cut on the weight chosen to give a good difference in the f_b between the two samples

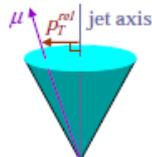
Calibration Using The Double Muon Tagger

▶ DoubleMuon tagger:

- ▶ 2 μ s with opposite charge
- ▶ weight is the invariante mass of the 2 μ
- ▶ used to calibrate the b-tagging efficiency for jets with $E > 80$ GeV
- ▶ -2 GeV/c² \rightarrow don't have two μ
- ▶ -1 GeV/c² \rightarrow 2 μ with same charge

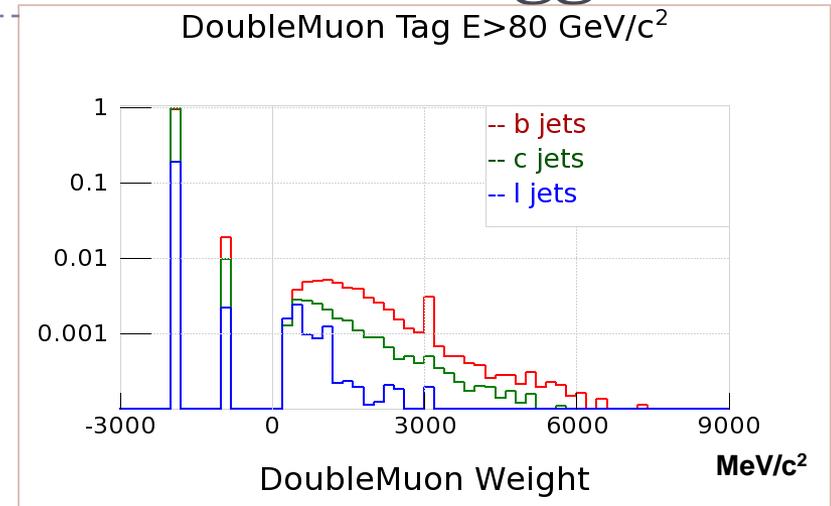
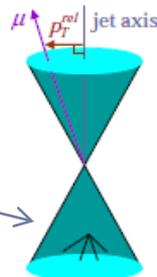
▶ n-sample:

- ▶ Jets with a muon



▶ p-sample:

- ▶ opposite side b-tagged jet :
 - ▶ **tagged with (IP3D+SVI) > 2**



Electron Identification

- isEM is a flag option that can be set, checking every electron past a selection criteria and then for each return either a bool 0 or 1, for pass or rejected respectively.
- isEM can be set to various states, with each different state including or excluding certain criteria, (ex: isEM = **Loose**, isEM = **Medium**, isEM = Tight).

isEM = **Loose** checks for the criteria:

- Cluster Eta Range
- Cluster Hadronic Leakage
- Cluster Middle Energy
- Cluster Middle Energy Ratio 37
- Cluster Middle Energy Ratio 33
- Cluster Middle Width

Each of these criteria has its own definition in terms of variables extractable from the ElectronContainer and EMshower Information.

Electron Identification

- **Cluster Eta Range**

The Eta for each Electron determines the level of the cut for the subsequent criteria.

- **Cluster Hadronic Leakage**

The amount of leakage into the hadronic calorimeter calculated as the amount of energy in the HCAL ($ethad1$), divided by transverse cluster energy (pt).

- **Cluster Middle Energy**

Checks the variable ($e277$) which is the uncalibrated energy (sum of cells) of the middle sampling in a rectangle of size 7×7 (in cell units eta x phi).

- **Cluster Middle Energy Ratio 37**

This is the ratio of ($e237$) divided by ($e277$), where $e237$ is the same as $e277$ but for a rectangle size of 3×7 .

- **Cluster Middle Energy Ratio 33**

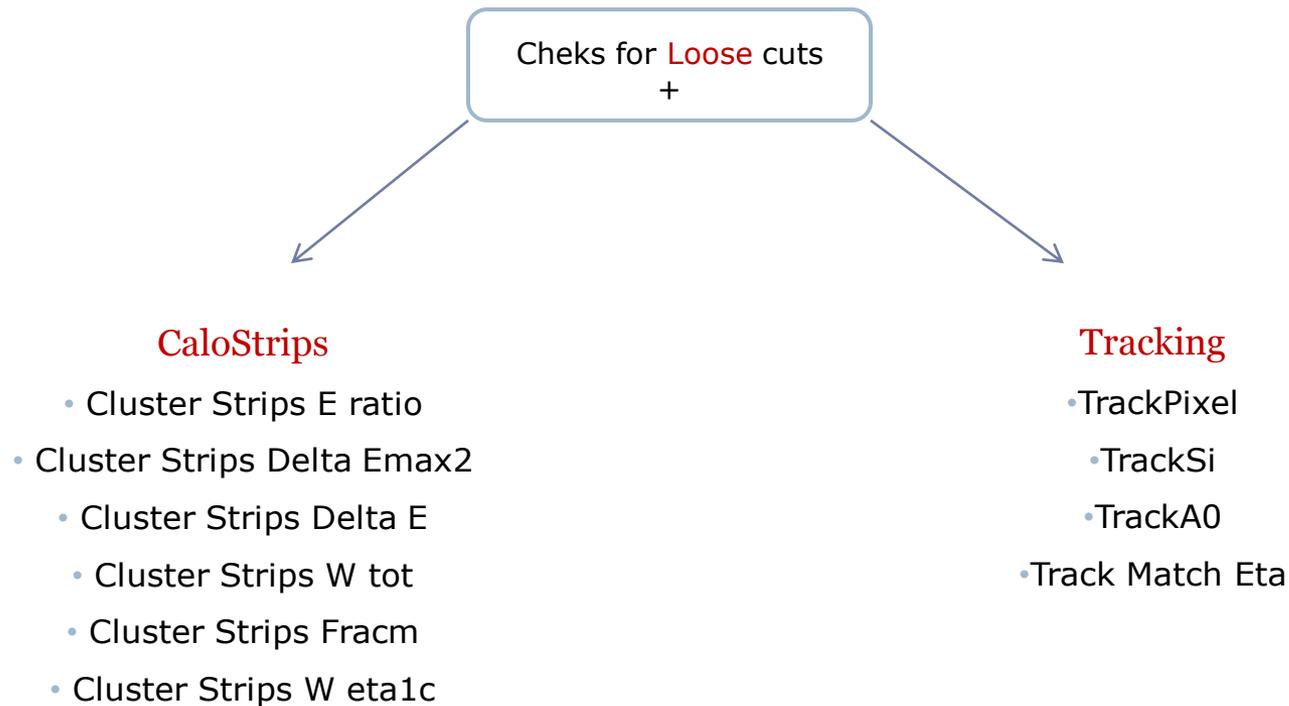
This is the ratio of ($e233$) divided by ($e277$), where $e233$ is again the same as $e277$ but for a rectangle this time of size 3×3 .

- **Cluster Middle Width**

The variable ($Weta2$) is a measure of the shower width in the ECAL.

Electron Identification

isEM = **Medium** includes the **Loose** criterias + **new** criterias :



Electron Identification

CaloStrips

- **Cluster Strips E ratio**

Fraction of energy found in the first sampling.

- **Cluster Strips Delta Emax2**

Energy of the second maximum in the first sampling

- **Cluster Strips Delta E**

Difference between second maximum and first minimum in strips

- **Cluster Strips W tot**

Shower width in the first sampling

- **Cluster Strips Fracm**

Shower shape in shower core 1st sampling

- **Cluster Strips W eta1c**

Shower width weighted by distance from the 1st maximum

Tracking

- **TrackPixel**

Number of hits in the pixel detector (At least one hit)

- **TrackSi**

Number of hits in the pixel detector + SCT
(at least nine hits)

- **TrackA0**

Distance of closest approach

- **Track Match Eta**

Eta difference between cluster and extrapolated track in the 2nd sampling

Matrix Method

Error calculation

$$N_{tt+Wev+st} = \frac{N_{medium} - fr \cdot N_{loose}}{\varepsilon - fr}$$

$$N_{QCD} = \frac{\varepsilon N_{loose} - N_{medium}}{\varepsilon - fr}$$



$$N_1 = N_{loose} - N_{medium}$$

$$N_2 = N_{medium}$$

$$\Delta N_{tt+Wev+st} = \sqrt{\left(\frac{dN_{tt+Wev+st}}{d\varepsilon_{l \rightarrow m}}\right)^2 \Delta\varepsilon_{l \rightarrow m}^2 + \left(\frac{dN_{tt+Wev+st}}{dfr}\right)^2 \Delta fr^2 + \left(\frac{dN_{tt+Wev+st}}{dN_1}\right)^2 \Delta N_1^2 + \left(\frac{dN_{tt+Wev+st}}{dN_2}\right)^2 \Delta N_2^2}$$

$$\Delta N_{QCD} = \sqrt{\left(\frac{dN_{QCD}}{d\varepsilon_{l \rightarrow m}}\right)^2 \Delta\varepsilon_{l \rightarrow m}^2 + \left(\frac{dN_{QCD}}{dfr}\right)^2 \Delta fr^2 + \left(\frac{dN_{QCD}}{dN_1}\right)^2 \Delta N_1^2 + \left(\frac{dN_{QCD}}{dN_2}\right)^2 \Delta N_2^2}$$