

Rapport de stage

Master 2 NPAC

Physique du quark top au LHC avec le détecteur ATLAS



Auteur :
AURÉLIEN DEMILLY

Superviseurs :
TRISTAN BEAU
DIDIER LACOUR

9 mai 2011

Résumé

Ce document présente le contexte et le sujet du stage « Physique du quark top au LHC avec le détecteur ATLAS » qui aura lieu au LPNHE sous la direction de DIDIER LACOUR au sein du groupe ATLAS. Le document est construit à partir des informations extraites des articles cités en références. Le stage portera sur la compréhension et l'étude d'une méthode d'analyse des données visant à effectuer la mesure de la masse du quark top.

1 Contexte scientifique

1.1 Le modèle standard et au-delà

Le modèle standard est une théorie quantique des champs décrivant de façon exhaustive les interactions entre les particules connues. Imposant l'invariance de jauge au lagrangien du modèle standard, les interactions découlant de cette symétrie se voient naturellement véhiculées par des bosons de masses nulles. Or les bosons vecteurs W^+ , W^- et Z de l'interaction électrofaible sont observés massifs. Un mécanisme générant les masses des bosons vecteurs, conservant la masse nulle du photon et respectant l'invariance de jauge, devient alors nécessaire. Ce peut-être réalisé via une brisure spontanée de symétrie, ce que le mécanisme de HIGGS fait simplement en introduisant un nouveau champ scalaire massif, le boson de HIGGS, et son potentiel dans le lagrangien du modèle standard. La découverte du boson de HIGGS devient alors un enjeu important pour la validité du modèle standard.

De nos jours le modèle standard est compris comme une théorie effective à basse énergie d'une théorie plus fondamentale. Problème de hiérarchie, réglage fin des paramètres ou encore problème de naturalité, liés dans les questions qu'ils soulèvent, viennent conforter ce point de vue. De plus, la non prise en compte de la matière noire apparaît comme une limite de plus du modèle standard dans son exhaustivité.

Les candidats à la nouvelle physique, perçus comme plus fondamentaux, sont nombreux : supersymétrie, théories à dimensions supplémentaires ou encore théories de gravité quantique. Tous ont en commun la possible émergence de nouveaux phénomènes à des échelles d'énergie de l'ordre de quelques TeV, d'où la nécessité d'une machine travaillant à ces énergies pour permettre la discrimination parmi ces modèles.

1.2 Le quark top

Le quark top, postulé en 1973 MAKOTO KOBAYASHI et TOSHIHIDE MASKAWA pour expliquer la violation CP dans les désintégrations des kaons, découvert en 1995 par CDF¹ et DØ² au Tevatron à Fermilab est l'une des dernières briques contribuant au succès du modèle standard. Du fait de sa masse, le quark top est fortement couplé au boson de HIGGS, faisant de lui une contribution importante à prendre en compte dans les prédictions théoriques de la masse du HIGGS. De plus, il intervient aussi dans les calculs des corrections radiatives relatives aux bosons vecteurs, utilisées dans les tests de précision de la théorie électrofaible. Ainsi une bonne mesure de la masse du quark top, en tant que paramètre du modèle standard, apparaît nécessaire. À ce jour, deux collisionneurs sont capables de produire des quark top : le Tevatron au Fermilab et le LHC au CERN. C'est avec ces deux accélérateurs que sont étudiées les propriétés du quark top, dont sa masse. Au LHC, le quark top est principalement produit en paires $t\bar{t}$ via l'interaction forte entre gluons suffisamment énergétiques.

La durée de vie extrêmement courte du quark top, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-25}$ s inférieure au temps caractéristique d'hadronisation donne accès à la masse nue du quark. Le quark top se désintègre presque exclusivement via l'interaction faible en un quark b et un boson W , le quark b donnant un jet et le boson W se désintégrant soit hadroniquement soit leptoniquement. Une paire de quarks $t\bar{t}$ donnera donc plusieurs topologies d'état final, ayant tous en commun la présence de deux jets de quarks b, dépendant des désintégrations des bosons W comme l'illustre la Figure 1 :

Complètement hadronique : les deux bosons W se désintègrent en quarks qui s'hadroniseront, donnant naissance à des jets. Ce canal possède un bruit de fond QCD important.

Lepton plus jet : un boson W en lepton et neutrino, l'autre en quarks. Dans cette topologie une partie de l'énergie est dite manquante, celle du neutrino, non détecté. C'est avec cette topologie que la mesure de la masse du top est principalement réalisée au Tevatron et au LHC, du fait de la possibilité de reconstruire la masse invariante d'un des top de la paire et d'un bruit de fond moins important que dans le précédent canal.

1. *The Collider Detector at Fermilab*
2. *The DØ Experiment*

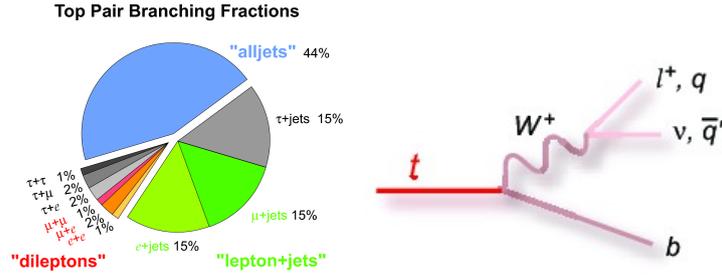


FIGURE 1 – Rapports d’embranchement de paires de quark top en différents états finals (à gauche) et diagramme de désintégration d’un quark top (à droite)

Dileptonique : les deux bosons W se désintègrent en leptons. Ce canal ne permet pas la reconstruction de la masse invariante à cause de l’énergie manquante des neutrinos mais possède comparative-ment peu de bruit de fond. Néanmoins, le nombre d’événements de ce type est bien moindre étant donné que le rapport d’embranchement leptonique du boson W est plus faible que le rapport d’embranchement hadronique. C’est dans ce canal que l’équipe ATLAS au LPNHE utilise la méthode dite des « éléments de matrices » pour la mesure de la masse, du fait de son efficacité à faible statistique.

2 Dispositif expérimental

2.1 Le LHC

Le LHC [1], *Large Hadron Collider*, est un collisionneur proton-proton de 27 km de circonférence conçu pour atteindre une énergie dans le centre de masse de 14 TeV. Cette exigence en énergie découle de la volonté de faire du LHC une machine de précision du modèle standard mais aussi une machine de découverte de nouvelle physique.

Le LHC devient fonctionnel en septembre 2008, avant que l’incident du 19 septembre 2008 ne repousse la mise en service effective à novembre 2009. Depuis début 2010, le LHC opère à 7 TeV accumulant les données jusque fin 2012 pour une première phase. La machine sera ensuite arrêtée pour effectuer les travaux nécessaires à la montée à 14 TeV et une augmentation de la luminosité en 2014.

2.2 Le détecteur ATLAS

ATLAS [2], *A Toroidal LHC ApparatuS*, est l’une des quatre expériences principales installées sur le LHC. Afin de s’assurer ne manquer aucun signal de nouvelle physique, ATLAS est conçu de façon à détecter une très large bande de signal, faisant de lui un détecteur polyvalent. Ces exigences font que le détecteur doit obéir à des contraintes importantes en termes d’électroniques, de granularité des détecteurs et d’acceptance en pseudo-rapacité. ATLAS est composé en partant du point d’interaction des éléments suivants (Fig. 2) :

Les détecteurs de traces permettent via la reconstruction des traces des particules chargées d’identifier les vertex secondaires. Sa résolution spatiale est primordiale, sa résolution en impulsion est voulue de l’ordre de $\sigma_{p_T}/p_T = 0.05\% \cdot p_T \pm 1\%$. Ce détecteur permet l’identification des jets de quark b, des leptons τ et la mesure des charges des particules.

Les calorimètres électromagnétiques et hadroniques doivent réaliser une bonne identification et mesurer l’énergie des électrons et photons, la résolution voulue étant $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \pm 0.7\%$. La calorimétrie électromagnétique est complétée par un calorimètre hadronique afin d’assurer la mesure de l’énergie des jets, avec une résolution voulue de $\sigma_E/E = 50\%/\sqrt{E} \pm 3\%$, et de l’énergie manquante.

Les **chambres à muons** doivent être capable d'identifier les muons et de mesurer leurs impulsions avec une bonne résolution, $\sigma_{p_T}/p_T = 10\%$ à $p_T = 1 \text{ TeV}/c^2$, sur une large plage de valeurs.

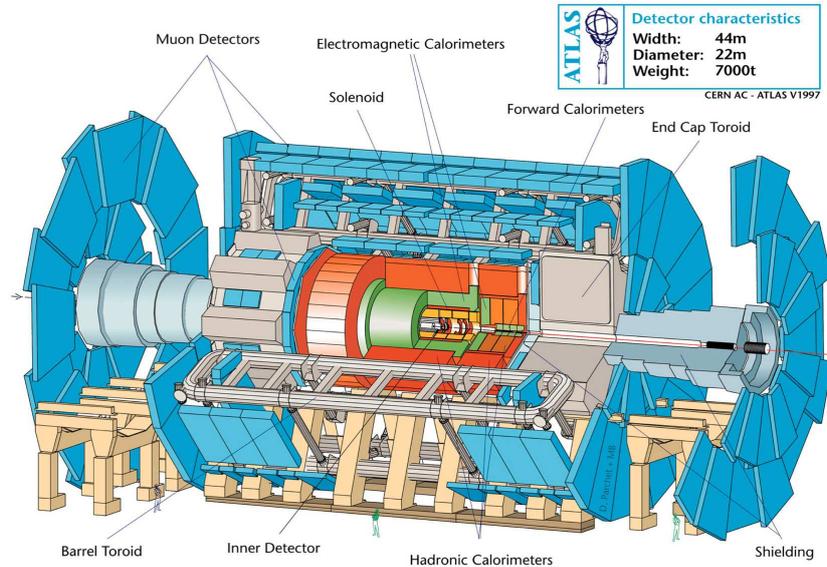


FIGURE 2 – Le détecteur ATLAS

3 Laboratoire d'accueil

3.1 Le LPNHE

Le laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies [3], basé sur le campus de Jussieu, est une unité mixte de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique de Particules, IN2P3, (institut du CNRS) et des universités Pierre et Marie Curie, et Paris Diderot. Regroupant une centaine de chercheurs et doctorants, une cinquantaine d'ingénieurs, techniciens et personnels administratifs, le laboratoire est impliqué dans plusieurs grands programmes expérimentaux internationaux. Ses activités regroupent différents thèmes :

Physique des particules en participant aux analyses de données au sein de CDF et DØ au Tevatron³ à Fermilab et BaBar, physique du quark b, au SLAC⁴ National Laboratory, en étant présent sur ATLAS et LHCb au CERN, T2K⁵ au Japon et dans le projet de futur accélérateur ILC⁶.

Cosmologie observationnelle en s'impliquant dans Supernovae Legacy Survey, étude de l'énergie noire, du Canadian French Hawaiï Telescope, dans Supernovae Factory, étude de l'expansion de l'univers, et en s'engageant auprès des projets Supernova Acceleration Probe et Large Synoptic Survey Telescope.

Nature et origine du rayonnement cosmique avec HESS⁷ en Namibie et Auger en Argentine.

Pour l'ensemble de ces thèmes, les engagements concernent la R&D détecteurs et instrumentation, la participation à la construction, l'étalonnage et la mise en place des instruments, l'analyse des données prises et leur interprétation physique jusqu'à la publication des résultats, faisant du laboratoire un acteur impliqué à long terme dans ces collaborations.

3. Collisionneur proton-antiproton

4. *Stanford Linear Accelerator Center*

5. *Tokai to Kamioka* : physique des neutrinos

6. *International Linear Collider*

7. *High Energy Stereoscopic System* : astronomie gamma au TeV

3.2 Le groupe ATLAS

Le groupe ATLAS du LPNHE, composé d'une trentaine de chercheurs dont 7 étudiants en thèse, est fortement impliqué dans le calorimètre électromagnétique du détecteur, de sa réalisation au suivi des performances et dans les logiciels de reconstruction et d'identification des photons et électrons. Le groupe s'est aussi engagé dans les activités de grille de calculs, de développement des outils d'analyse de données ou encore de mise au point des algorithmes de déclenchement d'acquisition.

Le groupe prépare et réalise l'analyse de données pour l'étude de la masse et de la section efficace du quark top ainsi que la recherche du boson de HIGGS. Le groupe s'est intéressé à la caractérisation complète des divers bruits de fond dans le canal de désintégration en deux photons du boson de HIGGS, via des simulations théoriques et l'étude du système de détection des photons, améliorant les perspectives de découverte dans ce canal. Quant au quark top, l'équipe étudie actuellement ses propriétés dans le canal dileptonique. Deux thèmes en ressortent : sa masse, dont une étude de la faisabilité de la mesure dans ce canal a été réalisée, et la section efficace de production de paires $t\bar{t}$ qui sera étudiée à partir de cette année dans le canal totalement hadronique.

4 Masse du quark top

4.1 État actuel de la mesure de la masse du quark top

4.1.1 Au Tevatron :

Le Tevatron est un collisionneur proton-antiproton de 6,28 km de circonférence à 1,96 TeV d'énergie dans le centre de masse, qui a permis la découverte du quark top par les deux détecteurs CDF et DØ, le 2 mars 1995.

La Figure 3 montre les résultats obtenus par différentes techniques d'analyses des données du Tevatron. Les mesures dans les différents canaux (Fig. 1), sont indiquées accompagnées de leurs barres d'erreurs. L'erreur statistique étant dominante le canal dileptonique présente une erreur plus grande que le canal lepton plus jets. La valeur de la masse est le résultat de la combinaison de toutes ces mesures, soit $173,3 \pm 1,1 \text{ GeV}/c^2$, en juillet 2010.

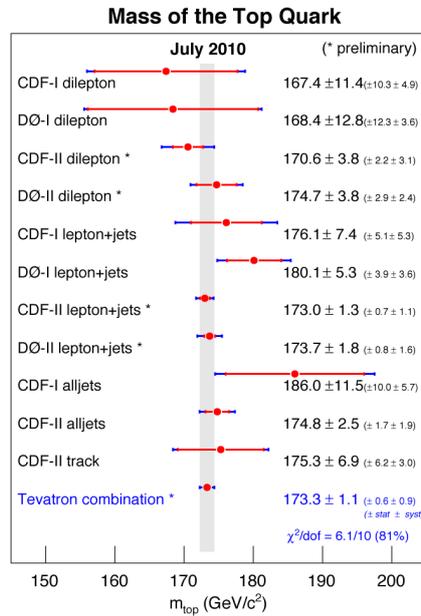


FIGURE 3 – Mesures de la masse du quark top effectuées au Tevatron

4.1.2 Au LHC :

Le LHC a accumulé 46 pb^{-1} de luminosité intégrée sur l'année 2010 à 7 TeV dans le centre de masse en collision p-p. L'objectif pour fin 2011 est d'atteindre 2 fb^{-1} à 7 TeV dans le centre de masse en collision p-p. Avec une section efficace de production $t\bar{t}$ de l'ordre de 170 pb [4] à 7 TeV, l'on s'attend à un nombre d'événements quark top d'environ $3 \cdot 10^5$ dont $6 \cdot 10^3$ dans le canal dileptonique $e\mu$ fin 2011. Plusieurs techniques d'analyse existent pour réaliser la mesure de la masse du quark top :

- La méthode la plus évidente pour mesurer la masse du quark top est la reconstruction de la masse invariante après étiquetage des jets de quarks b et des jets W . Son utilisation est plus aisée dans le canal lepton plus jet, qui présente moins de bruits de fond que le canal purement hadronique.
- La *2-dimensional template analysis* consiste à comparer données et simulations MC⁸ pour en extraire simultanément la masse du quark top et l'échelle en énergie des jets, JES.
- La *1-dimensional R_{32} template analysis*, variante de la précédente, extrait la mesure de la masse du quark top du rapport $R_{32} \equiv \frac{m_{\text{top}}^{\text{reco}}}{m_W^{\text{reco}}}$ défini événement par événement [5].

Une mesure de précision des propriétés du quark top, notamment sa masse, au LHC est importante. Le Tevatron et le LHC sont deux machines bien démarquées, l'un collisionneur proton-antiproton à 1,96 TeV, l'autre collisionneur proton-proton à 7 TeV. Ils sondent ainsi une physique différente. Mesurer la masse du quark top permet de confirmer la maîtrise de l'instrument et de ses détecteurs, tout comme les mesures des paramètres de la théorie électrofaible, masse du Z , du W . Rétroactivement une bonne connaissance de la masse du quark top permet de s'en servir comme test pour la reconstruction dans le détecteur. L'importance d'utiliser toutes les méthodes à disposition pour réaliser la mesure la plus précise de ce paramètre du modèle standard apparaît alors. Le groupe ATLAS du LPNHE se propose donc d'utiliser la méthode dite « des éléments de matrice » afin d'apporter une contribution à la mesure de la masse du quark top dans le canal $e\mu$ au LHC.

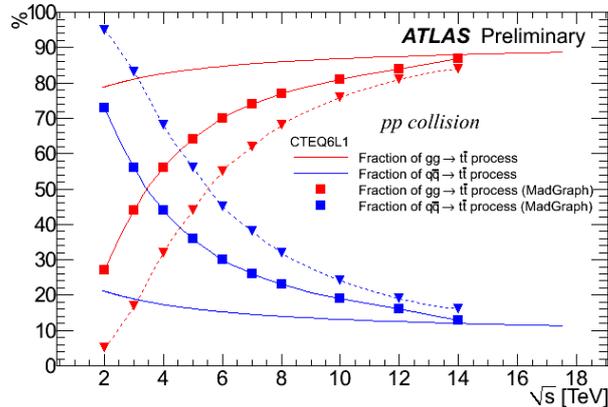


FIGURE 4 – Part des modes de production des paires $t\bar{t}$ en fonction de l'énergie dans le centre de masse. Les lignes continues correspondent à des hypothèses simplifiées à hautes énergies, les carrés à un processus proton-proton et les triangles à un processus proton-antiproton. Au LHC le mode dominant de production est $gg \rightarrow t\bar{t}$ contrairement au Tevatron où $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ domine.

4.2 La méthode des éléments de matrice

La méthode des éléments de matrice est une méthode de mesure précise de la masse, adaptée à des analyses sur un faible nombre d'événements. Elle est ainsi utilisée sur les données du Tevatron, le

8. Monte-Carlo

nombre d'événements quark top étant relativement faible, dans le canal dileptonique. Elle a également été utilisée dans le canal lepton plus jet. Auprès d'ATLAS, il est envisagé de l'utiliser dans le canal dileptonique du fait du faible bruit de fond. La méthode a d'abord été étudiée au sein du groupe dans sa faisabilité à 14 TeV puis à 7 TeV en utilisant des données simulées. Les différences majeures entre ces deux énergies sont les contributions relatives entre les deux modes de production des paires $t\bar{t}$ que sont $gg \rightarrow t\bar{t}$ et $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$. Le dernier est dominant à « basse énergie » tandis que le premier l'est à 14 TeV.

4.2.1 Principe

La description des principes de la méthode s'appuie sur la note ATLAS « *Top mass measurement in the electron-muon channel using the matrix element method with the first expected data of the ATLAS detector at 14 TeV : prospective study* » [6], produite après la thèse de PIETRO CAVALLERI « *Étude de la faisabilité de la mesure de la masse du quark top dans le canal électron muon avec la méthode des éléments de matrice avec le détecteur ATLAS auprès du LHC* », soutenue en 2009 au LPNHE sous la direction de DIDIER LACOUR. Cette thèse a validé la pertinence de l'utilisation de cette méthode à 14 TeV grâce à son étude sur des données simulées.

La probabilité d'une désintégration dans un état final défini avec une certaine configuration de l'espace de phase est proportionnelle à la section efficace différentielle qui décrit cette désintégration. Le principe de la méthode des éléments de matrice consiste à calculer une probabilité événement par événement pour le signal et le bruit de fond en fonction de l'hypothèse de masse du quark top M_t . La masse mesurée est alors l'hypothèse correspondant à un maximum de vraisemblance. La probabilité totale par événement s'écrit :

$$P_{\text{evt}}(\mathbf{x}, M_t) = f_{\text{top}} P_{\text{sig}}(\mathbf{x}, M_t) + (1 - f_{\text{top}}) P_{\text{bdf}}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

- \mathbf{x} étant les quantités mesurées.
- f_{top} étant la fraction de signal donnée par la sélection.
- $P_{\text{sig}}(\mathbf{x}, M_t)$ la probabilité que l'événement soit de type signal pour une masse M_t donnée.
- $P_{\text{bdf}}(\mathbf{x})$ la probabilité que l'événement soit de type bruit de fond.

La probabilité pour un événement d'avoir un état final donné s'écrit comme la section efficace différentielle normalisée à la section efficace totale :

$$P_{\text{sig}}(\mathbf{x}, M_t) = \frac{1}{\sigma(M_t)} \frac{d\sigma(M_t)}{d\mathbf{x}} \text{ avec } \int d\mathbf{x} P_{\text{sig}}(\mathbf{x}, M_t) = 1 \quad (2)$$

- $\sigma(M_t)$ la section efficace totale, fonction de l'hypothèse de masse du quark top.
- $\frac{d\sigma(M_t)}{d\mathbf{x}}$ la section efficace différentielle calculée, fonction de l'hypothèse de masse du quark top.

Cette dernière s'écrit :

$$\frac{d\sigma(M_t)}{d\mathbf{x}} \propto \int dg_1 dg_2 d\Phi |M_{t\bar{t}}(g_1, g_2, \mathbf{p}, M_t)|^2 W(\mathbf{p}, \mathbf{x}) f_{\text{pdf}}(g_1) f_{\text{pdf}}(g_2) \quad (3)$$

- g_i est la fraction d'impulsion emportée par le parton i .
- $d\Phi$ est l'espace de phase disponible pour le processus : $g_1 g_2 \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b_1 l_1 \nu_1 b_2 l_2 \nu_2$.
- $M_{t\bar{t}}(g_1, g_2, \mathbf{p}; M_t)$ est l'élément de matrice au LO⁹ de production et désintégration d'une paire $t\bar{t}$.
- $f_{\text{pdf}}(g_i)$ fonction de densité de parton du proton, probabilité qu'un parton ait l'impulsion g_i dans le proton, dépendant de l'énergie dans le centre de masse.

9. *Leading Order* : ordre principal

- $W(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ est la fonction de transfert donnant la probabilité de reconstruire un objet d'observable \mathbf{x} à partir d'un parton d'impulsion $\mathbf{p} \propto g_i$.

La probabilité P_{bdf} que l'événement soit de type « bruit de fond » est définie de la même manière. La section efficace de ce bruit de fond est exprimée de façon analogue à $\frac{d\sigma(M_t)}{dx}$.

P_{sig} et P_{bdf} étant calculées pour chaque événement, P_{evt} peut être construite comme définie ci-avant. Pour une luminosité donnée \mathcal{L} , le nombre attendu d'événements de type signal est :

$$N_{\text{sig}} = \mathcal{L}\sigma_{\text{sig}}(M_t)\epsilon_{\text{sig}}(M_t) \quad (4)$$

De même pour le bruit de fond :

$$N_{\text{bdf}} = \mathcal{L}\sigma_{\text{bdf}}\epsilon_{\text{bdf}} \quad (5)$$

- σ_{process} étant la section efficace du processus considéré.
- $\epsilon_{\text{process}}$ étant l'efficacité de détection du processus considéré.

La probabilité totale s'écrit finalement :

$$P_{\text{evt}}(\mathbf{x}, M_t) = P_{\text{sig}}(\mathbf{x}, M_t) \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{sig}} + N_{\text{bdf}}} + P_{\text{bdf}}(\mathbf{x}) \frac{N_{\text{bdf}}}{N_{\text{sig}} + N_{\text{bdf}}} \quad (6)$$

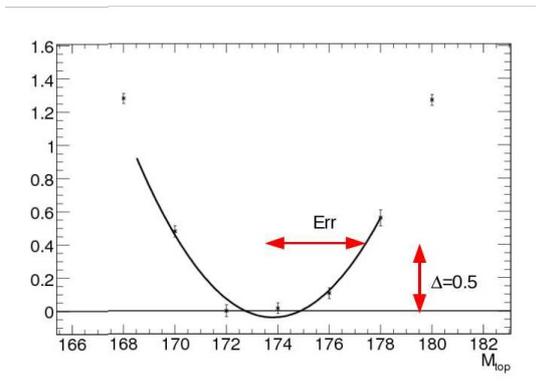
De cette probabilité individuelle est construite une fonction de vraisemblance $L(\mathbf{x}, M_t)$ définie comme :

$$L(\mathbf{x}, M_t) = \prod_{\text{evt}=1}^n P_{\text{evt}}(\mathbf{x}, M_t) \quad (7)$$

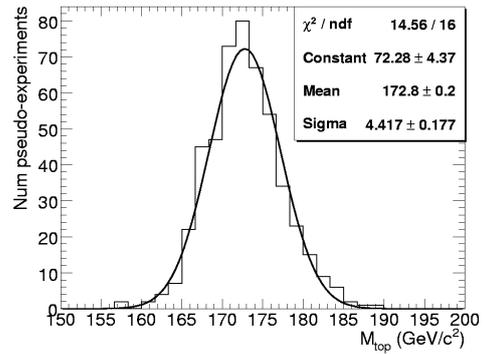
La masse mesurée est alors le maximum de cette fonction. Par convention est préférée la minimisation de la forme suivante :

$$-\ln(L(\mathbf{x}, M_t)) = -\sum_{\text{evt}=1}^n \ln(P_{\text{evt}}(\mathbf{x}, M_t)) \quad (8)$$

Est alors obtenu le type de courbes de la Figure 5.



(a) Courbe de vraisemblance de la masse du quark top. L'erreur sur la mesure est définie comme étant la largeur de la courbe ajustée à 0,5 du minimum.



(b) Mesure de la masse du quark top à 14 TeV, les événements étant simulés pour une masse de 174,3 GeV/c²

FIGURE 5

4.2.2 *MadGraph*, *MadEvent* et *MadWeight*

Le LHC opérant à 7 TeV jusque fin 2012, il est nécessaire d'étudier la méthode à cette énergie sur données simulées en vue de son emploi sur les données réelles. La suite logicielle *MadGraph*, *MadEvent* et *MadWeight* [7] est employée à cette fin.

MadGraph est un logiciel de génération d'amplitude de diagrammes de FEYNMAN pouvant être utilisé seul ou au sein d'une suite logicielle plus importante. Il est tout autant capable de produire simplement la phénoménologie demandée, par exemple $t\bar{t} \rightarrow e^+\mu^-\nu_e\bar{\nu}_\mu b\bar{b}$ ou $t\bar{t} \rightarrow e^-\mu^+\bar{\nu}_e\nu_\mu b\bar{b}$, que l'ensemble des diagrammes nécessaires à un processus, par exemple $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow$ état final désiré, générant au passage les diagrammes $gg \rightarrow t\bar{t}$ et $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$. *MadEvent* est un générateur d'événements se basant sur les diagrammes fournis par *MadGraph*. Les calculs sont faits au LO.

MadWeight a été choisi en tant qu'implémentation de la méthode des éléments de matrice pour sa modularité et son aisance d'utilisation. Il calcule l'élément de matrice associé au processus demandé à partir des entrées cinématiques données par l'utilisateur. Dans le cas $t\bar{t} \rightarrow e\mu\nu_e\nu_\mu b\bar{b}$, est fourni à *MadWeight* les quadrivecteurs énergie-impulsion de l'électron, du muon et des jets de quark b. Il est à noter que *MadWeight* travaille au niveau partonique. *MadWeight* en infère les observables relatives aux neutrinos. À partir des hypothèses fournies en entrée, ici la masse du quark top, *MadWeight* calcule les poids P_{evt} définis par l'équation (1). Dans l'utilisation faite au sein du groupe, les masses testées vont de 140 à 210 GeV/c², par pas de 10 GeV/c² puis se réduisant à 5 GeV/c² jusqu'à l'intervalle 170 à 175 GeV/c² parcouru avec un pas plus fin. *MadWeight* réalise alors le calcul du poids pour chaque hypothèse.

La chaîne de simulation *MadGraph* + *MadEvent* est utilisée pour générer des événements $t\bar{t}$ à une certaine masse M_t du quark top dans le canal dileptonique $e\mu$. La méthode des éléments de matrice est ensuite appliquée, grâce à *MadWeight*, sur cet échantillon d'événements pour extraire la masse du quark top et ainsi valider la méthode en vérifiant l'adéquation entre la masse mesurée et la masse générée. Jusqu'ici cette vérification à 7 TeV ne s'est réalisée qu'au niveau partonique en utilisant les générateurs d'événements *MadEvent*, travaillant au LO, et MC@NLO¹⁰. Il apparaît nécessaire de bien comprendre des fonctions de transfert afin de remonter au niveau partonique, niveau auquel *MadWeight* travaille.

4.3 Contribution envisagée

Suite aux études menées pour valider l'utilisation de cette méthode à 14 TeV, la validation à 7 TeV puis l'emploi de la méthode sur les données réelles sont le prolongement naturel du travail à effectuer. Le stage et la thèse proposée se placent dans ce cadre.

L'objectif du stage est la compréhension de la méthode des éléments de matrice en tant que technique d'analyse de données permettant la mesure de la masse du quark top. L'utilisation des outils *MadWeight* et *MadGraph* devient alors primordiale afin de se les approprier et d'étudier la méthode par sa mise en pratique. Sur données simulées dans un premier temps, plusieurs études sont à effectuer sur différents sujets :

- Les fonctions de transfert
- La compréhension des bruits de fond
- Les erreurs systématiques
- Les coupures cinématiques
- L'énergie transverse manquante
- Les canaux $\mu\mu$ et ee
- Test et utilisation de MadGraph 5, la version courante utilisée étant MadGraph 4, espérant un gain en temps de calcul

10. Monte-Carlo au *Next-to-Leading Order*

L'ensemble de ces études feront également l'objet d'une première partie de la thèse envisagée. Elles seront ensuite effectuées sur les données réelles pour permettre finalement la mesure de la masse couplée à une bonne estimation des erreurs et la maîtrise des erreurs systématiques. À court terme dans le cadre du stage, le travail se focalisera sur les études suivantes :

4.3.1 Les fonctions de transfert

La méthode des éléments de matrice est fondée sur la convolution entre la matrice du processus et la résolution du détecteur. Les fonctions de transfert interviennent dans la détermination de P_{evt} de chaque événement à travers le calcul de P_{sig} et P_{bdf} . Ces fonctions assurent le lien entre le niveau partonique et le niveau reconstruit. Dans le cadre de données simulées, le niveau partonique est simplement issu de la simulation MC tandis que le niveau reconstruit tient compte du détecteur. Ainsi la maîtrise des fonctions de transfert est nécessaire pour employer la méthode en considérant la résolution des détecteurs.

Dans le cas de la mesure de la masse du quark top dans le canal dileptonique $e\mu$, les observables déterminées avec une erreur faible sont les impulsions des leptons et les directions des jets. Les fonctions de transfert W correspondantes peuvent alors être approximées par des distributions δ de DIRAC. L'étude de l'influence de cette approximation sur l'efficacité de la méthode a été faite à 14 TeV sur des données simulées et doit être étendue à 7 TeV, sur données simulées et réelles. Les impulsions transverses des deux gluons initiaux sont considérées comme négligeables. Quant aux observables liées aux neutrinos, elles sont contraintes par la cinématique. La fonction de transfert de l'énergie des jets est à définir et fera l'objet d'une étude approfondie.

4.3.2 Incidence des bruits de fond

Dans le cas du $t\bar{t}$ en dilepton, les bruits de fond principaux sont le processus de DRELL-YAN, ici $Z \rightarrow \tau\bar{\tau} \rightarrow ll\nu\nu + jets$, et $WW \rightarrow ll + jets$. Dans le travail réalisé à 14 TeV, le processus de DRELL-YAN, dominant, a été inclus. Son étude à 7 TeV au sein de la chaîne *MadGraph* est à faire et devrait faire l'objet d'une partie du stage.

4.3.3 Les erreurs systématiques

La méthode s'accompagne d'erreurs systématiques qu'il faut nécessairement comprendre. Afin de les évaluer, il convient de réaliser de multiples simulations en faisant varier certaines caractéristiques. Les écarts en masse mesurée renseignent alors sur les erreurs systématiques.

L'énergie des jets est mesurée moins précisément que l'énergie des leptons. L'erreur systématique résultante provient de l'incertitude sur les fonctions de transfert et de la reconstruction de l'énergie. Bien que les fonctions de transfert tiennent en partie compte de cette dernière, d'autres effets peuvent influencer comme l'empilement d'événements dans le détecteur. La reconstruction des énergies des jets nécessite donc une calibration du calorimètre hadronique. La réduction de l'erreur systématique associée se fera avec l'accroissement de la compréhension du détecteur.

Au LHC, le mode de production dominant des paires $t\bar{t}$ est la fusion de gluons. La détermination des fonctions de densités des gluons dans le proton joue donc un grand rôle dans le calcul des poids de chaque événement. Que l'incertitude sur ces fonctions soit une source d'erreur systématique est donc attendu, or les fonctions de densités des partons ne sont pas connues parfaitement aux énergies mises en jeu. Elles devraient néanmoins être mieux déterminées avec l'accumulation de données au LHC, permettant la réduction des erreurs associées.

L'émission de gluons dans l'état initial ou à l'état final, ISR-FSR¹¹, se traduit par des jets supplémentaires dans la topologie de l'état final, rendant plus difficile la sélection des jets qui en elle-même est source d'erreur systématique. Elle repose sur la capacité à correctement étiqueter les jets de quarks b, donc sur la sensibilité du détecteur de traces.

4.3.4 Les coupures cinématiques

Les coupures suivantes ont été utilisées dans l'étude de la méthode à 14 TeV avec simulation du détecteur :

- Nombre de jets supérieur ou égal à deux. Sont gardés les deux jets ayant les impulsions transverses les plus importantes.
- Les impulsions transverses de l'électron et du muon doivent être supérieures à 15 GeV/c.
- Les deux leptons doivent être de charges opposées.
- Les impulsions transversales des deux jets doivent être supérieures à 20 GeV/c.
- Seules les particules vérifiant $|\eta| < 2,5$ sont conservées.¹²
- Un critère sur l'énergie transverse manquante peut être imposé, si nécessaire.
- $\Delta R > 0,1$ entre les objets.¹³

Dans le cadre d'une étude de la méthode à 7 TeV, ces coupures et leur influence devront être réévaluées et optimisées.

5 Conclusion

Le stage s'inscrit dans la préparation d'un projet de thèse dans l'expérience ATLAS. La thèse proposée est la « Mesure de la masse du quark top au LHC avec le détecteur ATLAS » encadrée par DIDIER LACOUR au sein du groupe ATLAS au LPNHE. Cette thèse est dans la continuité du travail effectué sur la faisabilité de la mesure avec la méthode des éléments de matrice. Validée à 14 TeV sur données simulées, la méthode est étudiée à 7 TeV, toujours sur données simulées, en vue d'être utilisée sur les données réelles d'ATLAS afin de réaliser la mesure de la masse du quark top. Cette thèse devrait profiter de l'accumulation de données sur une première période complète de fonctionnement du LHC, jusque fin 2012.

La mesure d'un paramètre du modèle standard comme la masse du quark top correspond à mes goûts pour la physique expérimentale, à mon intérêt pour l'analyse de données. Du fait de l'impossibilité de reconstruire une masse invariante dans le canal dileptonique, l'analyse des données se fait grâce à une méthode complexe. Cette mesure se réalisant au sein de la collaboration ATLAS, c'est aussi l'occasion d'assister au fonctionnement d'une grande collaboration. Ces raisons ont motivé mon choix de thèse.

11. Initial State Radiation-Final State Radiation

12. La pseudorapidité est définie comme $\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$, θ étant l'angle entre la direction de la particule et celle du faisceau

13. La distance ΔR entre deux objets est définie comme étant $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$, ϕ étant l'angle azimutale.

Table des matières

1	Contexte scientifique	1
1.1	Le modèle standard et au-delà	1
1.2	Le quark top	1
2	Dispositif expérimental	2
2.1	Le LHC	2
2.2	Le détecteur ATLAS	2
3	Laboratoire d'accueil	3
3.1	Le LPNHE	3
3.2	Le groupe ATLAS	4
4	Masse du quark top	4
4.1	État actuel de la mesure de la masse du quark top	4
4.1.1	Au Tevatron :	4
4.1.2	Au LHC :	5
4.2	La méthode des éléments de matrice	5
4.2.1	Principe	6
4.2.2	<i>MadGraph</i> , <i>MadEvent</i> et <i>MadWeight</i>	8
4.3	Contribution envisagée	8
4.3.1	Les fonctions de transfert	9
4.3.2	Incidence des bruits de fond	9
4.3.3	Les erreurs systématiques	9
4.3.4	Les coupures cinématiques	10
5	Conclusion	10

Références

- [1] LYNDON EVANS et PHILIP BRYANT : *LHC Machine*, Journal of Instrumentation, Volume 3 (2008)
- [2] The ATLAS Collaboration, G Aad et al : *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, Journal of Instrumentation, Volume 3 (2008)
- [3] Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies : *Rapport d'activité 2008-2009*, 2^e trimestre 2011
- [4] CMS Public Web : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsTOP11001Update>
- [5] The ATLAS collaboration : *Measurement of the Top-Quark Mass using the Template Method in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector*, ATLAS note ATLAS-CONF-2011-033, 18 mars 2011
- [6] PIETRO CAVALLERI, DIDIER LACOUR, MÉLISSA RIDEL et SOPHIE TRINCAZ-DUVOID : *Top mass measurement in the electron-muon channel using the matrix element method with the first expected data of the ATLAS detector at 14 TeV : prospective study*, ATLAS note ATL-COM-PHYS-2010-006, 15 février 2010
- [7] MadGraph Home Page : <http://madgraph.hep.uiuc.edu/>