

Rapport de stage

Etude préliminaire pour la production de quatre quarks top au LHC

Mikaël Leroy

Juin 2017

1 Informations générales

Le laboratoire de Physique de Clermont (LPC) est une unité de recherche sous la tutelle de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (institut IN2P3 du CNRS) et de l'Université Clermont Auvergne (UCA).

Le laboratoire comporte 6 pôles de recherche ayant pour thèmes les Particules, la Physique pour la Santé et l'Environnement, les Plasmas et l'Innovation et Transfert Technologique. L'équipe ATLAS se situe dans le pôle *Particules et Univers*. D'autres d'autres équipes travaillent aussi sur d'autres projets internationaux du LHC : ALICE et LHCb.

Après des années de recherche et développement sur la calorimétrie électromagnétique/hadronique (collaborations RD1 et RD34), l'équipe LHC du LPC, développée en 1990, a travaillé sur le projet EAGLE puis a abouti à la collaboration ATLAS en 1992.

L'équipe est constituée de 17 membres, originaires de France, La Réunion, Italie, Serbie, Grèce, Venezuela, Kazakhstan et du Burundi :

- . 10 chercheurs dont 2 enseignant-chercheurs
- . 3 chercheurs postdoctoraux
- . 4 doctorants

Le chef d'équipe - David Calvet (chercheur) - gère le budget du groupe ATLAS, qui provient à 90% du CNRS et 10% de l'UCA. La Région Auvergne et l'Europe contribuent également des financements ponctuels mais tous les financements sont gérés par le CNRS et l'UCA.

Les missions de permanences au CERN en Suisse sont le premier poste de dépense de l'équipe, elles sont réalisés plusieurs fois par ans par chaque membre de l'équipe. Viennent ensuite les conférences et semaines en France et à l'étranger puis le matériel : ordinateurs ...

2 Sujet du stage

Après la découverte du boson de Higgs en 2012 qui vient compléter le modèle standard de la physique des particules, les chercheurs expérimentateurs au LHC (Large Hadron Collider) tentent toujours de répondre aux questions les plus fondamentales de l'univers : qu'est-ce que la matière noire ? Existe-t-il d'autres particules plus fondamentales ?

L'enjeu est également de fixer des contraintes sur d'autres modèles au-delà du Modèle Standard qui n'est pas la théorie unificatrice finale, ne serait-ce que parce qu'elle ne traite pas l'interaction gravitationnelle. Pour cela, les chercheurs étudient les produits de désintégrations de réactions proton-proton réalisées au sein des détecteurs ATLAS, ALICE et CMS. Ces processus étant quantiques, on ne peut pas pour des conditions initiales fixées, prévoir les propriétés d'une unique réaction ; on peut seulement raisonner en terme de moyennes et probabilités. L'approche statistique est donc adaptée et nécessite d'avoir suffisamment de données pour obtenir des résultats de mesures viables. Pour un processus de section efficace σ , le nombre de réactions par unité de temps au sein du détecteur est $dN/dt = \sigma \mathcal{L}$ où $\mathcal{L}(t)$ est la luminosité instantanée, propriété inhérente à l'accélérateur. Ainsi pendant une durée quelconque Δt , le nombre d'événements attendu est $N = \sigma \mathcal{L}_{\text{int}}$ avec $\mathcal{L}_{\text{int}} = \int \mathcal{L}(t) dt$.

La luminosité intégrée est donc un des plus importants paramètres d'un détecteur, puisqu'elle détermine le taux d'événements qu'il est susceptible d'enregistrer. C'est dans ce but qu'est prévue l'amélioration du LHC pour 2025 : le Grand collisionneur d'hadrons haute luminosité (HL-LHC) qui aura une plus grande luminosité et devra aussi être capable de traiter le nombre gigantesque de collisions réalisées : en 2016 la luminosité totale intégrée était de 36 fb^{-1} ce qui correspond à environ 3 milliards de millions de collisions.

Le quark top, découvert en 1994, est toujours au coeur de l'actualité notamment à cause de son statut particulier : c'est la plus lourde des particules élémentaires. En conséquence, sa durée de vie est extrêmement faible, ce qui ne lui permet pas de s'hadroniser avec d'autres quarks ; il se désintègre pour donner un quark b et un boson W.

Dans les détecteurs, le quark b, comme les autres quarks autres que le top, va former un jet de hadrons qui sont des états liés (de l'interaction forte) à deux ou trois quarks, le quark initial apportant l'énergie nécessaire à la matérialisation de nouveaux quarks. Le boson chargé W^\pm se désintègre à 68% de manière hadronique en donnant deux quarks (\rightarrow deux jets) ou bien en donnant un lepton et le neutrino associé, emportant avec lui son énergie puisqu'il n'est pas détecté : il interagit très peu avec la matière, seulement par interaction faible.

La signature d'un quark top dans le détecteur est donc un ou plusieurs jets et potentiellement un lepton ainsi qu'une énergie transverse manquante.

La production simultanée de quatre quarks top est particulièrement intéressante puisqu'elle est très rare dans le cadre du modèle standard mais a, dans certains modèles au-delà du modèle standard, un taux (de production) qui est largement augmenté.

Ainsi, l'observation et la mesure d'un taux de production sensiblement différent de celui prédit par le Modèle Standard seraient le signe d'une nouvelle physique et permettraient de fixer des contraintes sur ces modèles.

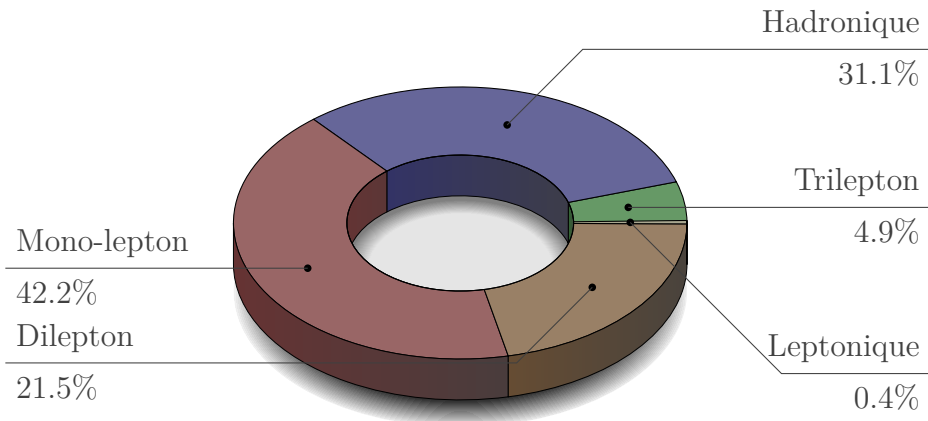
Il est donc nécessaire de définir une stratégie pour observer ce processus dans les détecteurs, c'est-à-dire trouver les variables et les canaux (hadroniques, 1 leptons, 2 leptons...) qui permettent d'avoir un rapport signal sur bruit optimal.

La compréhension du bruit de fond dans les détecteurs joue un rôle primordial dans l'étude de ces pro-

cessus car celui-ci est en partie irréductible. On distingue ainsi les bruits de fond irréductibles qui sont des processus physiques (*e.g.* $pp \rightarrow t\bar{t}Z$), et des bruits de fond réductibles, associés aux performances du détecteur : mauvaise mesure de la charge, mauvaise reconstruction des jets/leptons.

Il faut ensuite déterminer la signature du processus, c'est-à-dire la trace qui va être laissée par quatre quarks top dans les détecteurs. Chaque quark top se désintégrant pour donner un quark b, il est clair que le nombre de jets (en particulier de jets b) est une variable caractéristique du processus puisque les bosons W y contribuent aussi largement. Par ailleurs, il est possible de réaliser une étude dans le canal à quatre leptons, ce qui est une chance puisque cela permet d'éliminer déjà tous les bruits de fond ne pouvant donner 4 leptons (*e.g.* $t\bar{t}, t\bar{t}W\dots$).

Selon le mode de désintégration des bosons W, on observe 5 catégories d'états finals :



La contrainte majeure est d'obtenir un nombre suffisamment élevé d'événements après sélection des événements à quatre leptons, sachant que l'état final à quatre leptons représente seulement 0.4% de tous les états finals.

Au laboratoire, le quark top constitue, avec le calorimètre hadronique TileCal l'un des objets d'étude principaux. Son étude se divise en quatre problématiques, axées sur la recherche d'une nouvelle physique :

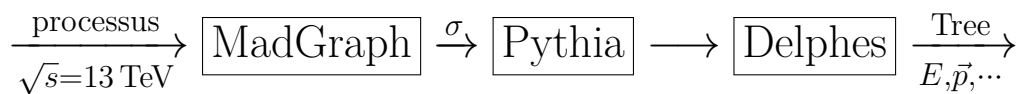
- étude du couplage du quark top au boson de Higgs en observant l'état final $t\bar{t}h$
- recherche d'une nouvelle physique dans les canaux à deux leptons de même charge (**production de quatre top...**)
- recherche d'une nouvelle physique : canal $t\bar{b}$ (recherche d'un boson massif hypothétique W') et recherche d'un processus «monotop» (quark top + énergie manquante \leftrightarrow matière noire)
- recherche de nouvelles particules se désintégrant en $t\bar{t}$

3 Travail réalisé

J'ai cherché, à partir de données simulées, des variables et des canaux (nombre de leptons, jets..) intéressants qui permettent d'optimiser le rapport signal (quatre quarks top)/bruit.

Il a donc fallu dans un premier temps simuler des collisions (signal et bruits de fond). Pour cela, j'ai utilisé le logiciel MadGraph qui permet de simuler un processus quelconque d'un modèle (ici Modèle Standard) à une énergie donnée (principaux paramètres). Les particules de l'état final (quatre quarks top ici) sont ensuite désintégrées avec Pythia. Enfin la détection des produits de désintégration est simulée avec Delphes.

FIGURE 1 – Schéma de production des données



J'ai considéré les bruits de fond irréductibles suivants :

- $pp \rightarrow t\bar{t}$
- $pp \rightarrow t\bar{t}H$
- $pp \rightarrow t\bar{t}Z \rightarrow t\bar{t}\ell\nu_\ell$
- $pp \rightarrow t\bar{t}W \rightarrow t\bar{t}\ell\nu_\ell$
- $pp \rightarrow t\bar{t}Wb\bar{b} \rightarrow t\bar{t}\ell^+\ell^-b\bar{b}$

J'ai réalisé mon étude à une énergie dans le centre de masse $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ et à une luminosité intégrée $\mathcal{L}_{\text{int}} = 36 \text{ fb}^{-1}$, ce qui correspond à la quantité de données acquises par le détecteur ATLAS durant l'année 2016.

J'ai généré 100 000 événements pour le signal et les bruits principaux ainsi que 25 000 pour le bruit $t\bar{t}Wb\bar{b}$ qui nécessitait une trop grande mémoire.

On récupère en sortie un fichier .root ayant la structure d'un Tree (objet du logiciel d'analyse de données ROOT) avec différentes branches qui contiennent toutes les informations sur les particules (type de particule, énergie, impulsion, charge...) aux différents stades de la détection (avant/après désintégration/détection).

Puis j'ai écrit un programme en C++ qui permet de récupérer les variables relatives aux particules détectées pour chaque événement (impulsion transverse, nombre de leptons/jets, énergie transverse manquante). J'ai pu alors étudier dans les différents canaux quelles variables étaient intéressantes pour améliorer la qualité du signal. L'outil naturel pour étudier des variables issues de la répétition d'événements est l'histogramme. Mais pour pouvoir comparer les différents processus, il faut pondérer les histogrammes par un poids w qui permet de reproduire le nombre d'événements attendu. Ainsi, si on génère n événements d'un processus de section efficace σ , il faut multiplier l'histogramme par $w = \sigma/n \times \mathcal{L}_{\text{int}}$ de sorte que $n\sigma = \text{nombre d'événements attendu} = \sigma \times \mathcal{L}_{\text{int}}$.

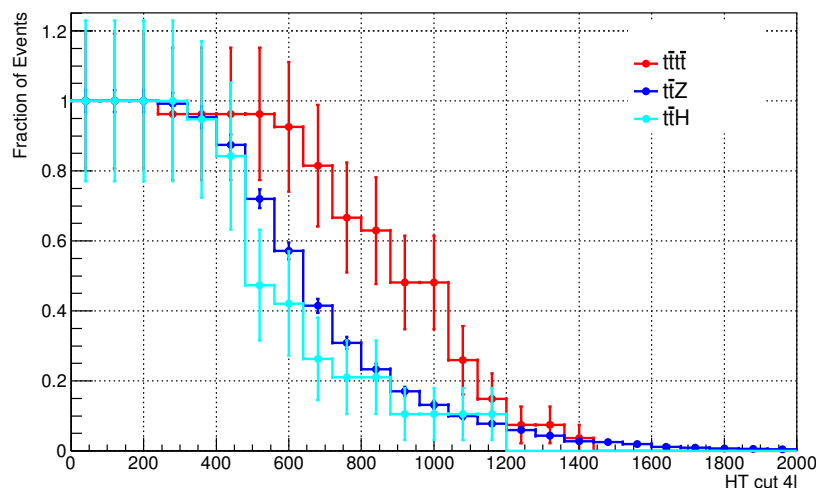
Si on ne retrouve pas de manière quantitative les résultats escomptés (nombre moyen de jets, leptons..) du fait des performances du détecteur, on retrouve néanmoins de manière qualitative les propriétés relatives à chaque processus. Le nombre de jets est notamment le plus élevé pour le signal à quatre quarks top.

Par ailleurs, une méthode pertinente pour améliorer la qualité d'un signal consiste à réaliser des coupures, c'est-à-dire à ne garder que les événements pour lesquels une certaine variable v soigneusement choisie vérifie la condition $v \geq v_{\text{coupure}}$

J'ai trouvé une variable intéressante qui permet, dans le canal à quatre leptons, de garder 65/70% du signal après coupure contre 20/25% pour les bruits $t\bar{t}Z$ et $t\bar{t}H$.

Il s'agit de la somme de l'énergie transverse reconstruite sur les jets et leptons et de l'énergie transverse manquante, $H_T = \cancel{E}_T + \sum_{\text{jets}, \ell} p_T$

FIGURE 2 – Événements restant après coupure de H_T



En effet, le nombre de jets restant important dans le canal à quatre leptons par rapport aux bruits de fond, l'énergie reconstruite sur les jets doit être importante devant l'énergie des jets des autres bruits de fond.

Mais malgré un rapport signal/bruit correct ($\sim 10^{-1}$ à comparer au rapport signal sur bruit du Higgs dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ de 10^{-2}), une telle coupure ne suffirait pas à extraire ce processus du bruit de fond. En effet, le nombre d'événements à quatre tops attendu dans le canal leptonique après coupure est très faible : on attend en moyenne un événement pour une luminosité intégrée de 36 fb^{-1} . Or il faudrait disposer de plusieurs dizaines voir centaines d'événements avant d'espérer observer le signal. C'est-à-dire qu'il faudrait une luminosité intégrée supérieure à 1000 fb^{-1}

4 Bilan personnel et conclusion

Je tiens à remercier toute l'équipe ATLAS Clermont-Ferrand pour m'avoir si bien accueilli. Je remercie particulièrement mon tuteur de stage Romain Madar qui a toujours été à l'écoute; il m'a permis de rentrer plus rapidement dans le vif du sujet en m'évitant de me perdre dans la profondeur des concepts. Je remercie également le chef de l'équipe David Calvet pour m'avoir accordé sa confiance malgré la durée réduite de ce stage. Par ailleurs, je suis reconnaissant envers les doctorants Fabricio Jimenez Morales et Arthur Chomont qui ont pris de leur temps pour m'aider à installer des logiciels et m'expliquer des concepts de base en physique des accélérateurs (overlap removal, pile-up..). Enfin, j'ai apprécié les retours constructifs de Julien Donini et Djamel Boumediene sur ma présentation devant l'équipe.

De manière générale, ce stage m'a permis d'y voir plus clair dans le métier de chercheur expérimentateur en physique des particules, un domaine dans lequel je me verrai bien travailler en tant que chercheur.

D'un point de vue technique, j'ai passé une grande partie de mon stage sur le terminal de l'ordinateur à écrire des programmes et à chercher les différentes informations relatives aux particules et aux algorithmes dans les classes de ROOT et Delphes. Cela m'a permis de renforcer mon savoir faire en utilisant un langage nouveau pour moi : le C++, et d'élargir mes connaissances en informatique avec par exemple la notion de classe.

Par ailleurs, j'ai pu voir de près comment est rythmée la vie de ces physiciens et physiciennes. Dans une collaboration internationale comme ATLAS, la communication est vitale et passe par de nombreux séminaires et conférences à l'étranger mais aussi des conférences en lignes. Au sein de l'équipe, la communication, en langue anglaise, se fait avec des réunions hebdomadaires et des discussions au laboratoire et au déjeuner.

J'ai pu aussi saisir les responsabilités des membres de l'équipe. Ils doivent notamment chaque année faire des permanences au CERN en Suisse pour s'assurer du bon fonctionnement du détecteur ATLAS. Les enseignant-chercheurs ont des quotas d'heures d'enseignements à réaliser à l'université mais ce ne sont pas les seuls impliqués dans l'éducation. Par exemple David Calvet organise chaque année des visites de laboratoires pour les lycéens.

En conclusion, ce stage a été une riche expérience à tout point de vue. Il est resté en adéquation avec les objectifs fixés au départ, notamment la découverte du monde de la recherche. Si la durée du stage ne m'a pas permis d'aller au fond des concepts fondamentaux, elle a été suffisante pour me motiver à poursuivre mes études dans ce domaine.