

RECONSTRUCTION D'ÉLECTRONS PROVENANT DU BOSON Z^0 DANS L'EXPÉRIENCE ATLAS AUPRÈS DU LHC

Rapport de Stage

Auteur :
Raphaël-David
LASSERI

Responsable :
Frédéric DERUE

Mai-Juin 2013

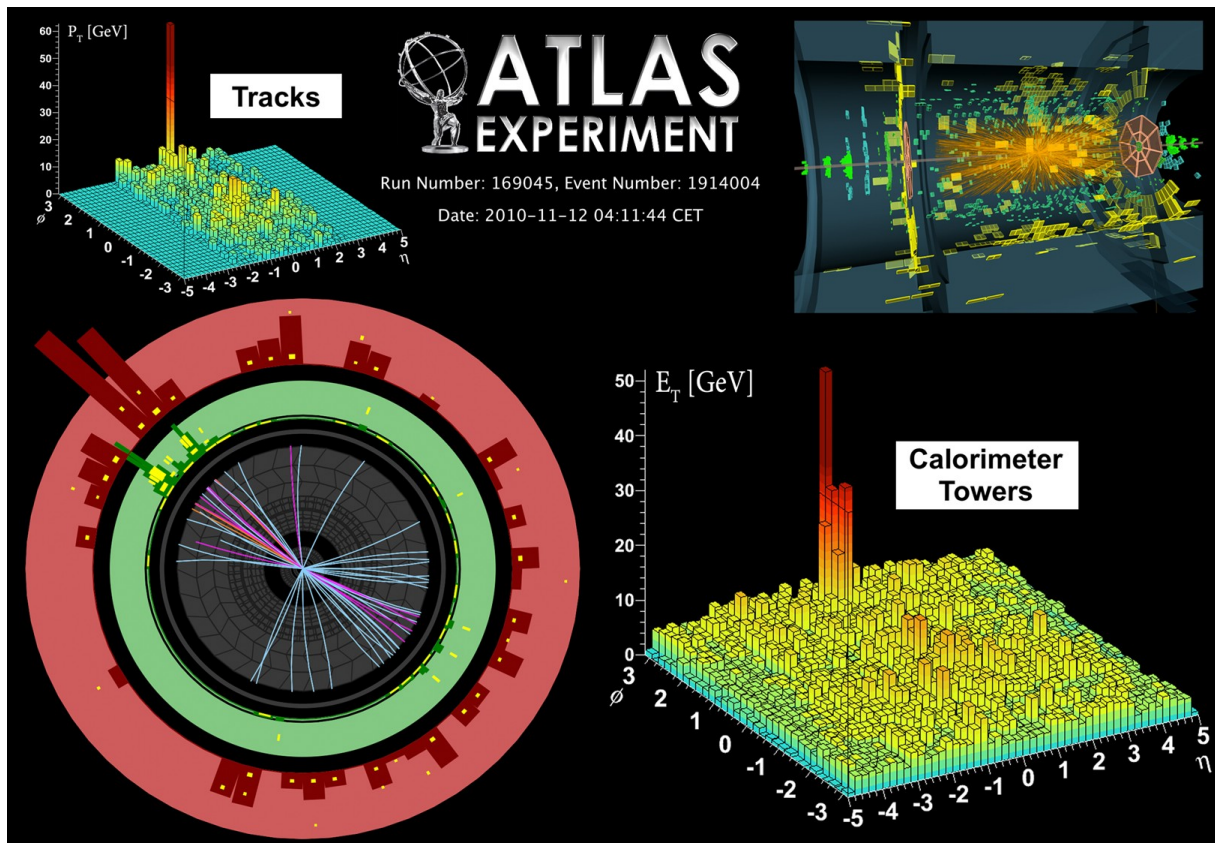


Table des matières

Présentation du laboratoire	2
1 Contexte scientifique	3
1.1 Le modèle standard de la physique des particules.	3
1.2 Le dispositif expérimental	3
1.3 Objet du stage	4
2 Travail Personnel	5
2.1 Données utilisées	5
2.2 Premiers pas	5
2.3 Identification des électrons	5
2.4 Reconstruction du boson Z^0	6
Conclusion	8

Présentation du laboratoire

Le Laboratoire de **Physique Nucléaire et des Hautes Energies** (LPNHE), est une **Unité Mixte de Recherche de l'IN2P3**, institut du CNRS, et des universités Pierre et Marie Curie (UPMC) et Paris Diderot. Il est situé sur le campus de Jussieu de l'UPMC à Paris.

Groupes de Recherche

Le laboratoire est engagé dans plusieurs grands programmes expérimentaux, poursuivis dans le cadre de collaborations internationales auprès de très grandes infrastructures de recherche du monde entier, centres d'accélérateurs de particules et observatoires. Ces programmes couvrent les enjeux actuels de la physique des particules, des astroparticules, et de la cosmologie :

- L'origine de la masse des particules élémentaires et l'étude des interactions fondamentales, en particulier avec l'expérience **ATLAS**¹ auprès du Large Hadron Collider au CERN.
- l'étude de l'asymétrie matière anti-matière avec des études sur le quark b (expérience LHCb au CERN) et sur les neutrinos (expérience **T2K**² au Japon).
- l'étude de la matière et de l'énergie noire par le groupe de cosmologie auprès de télescopes, principalement pour la recherche de supernovae.
- l'origine des rayons cosmiques de très haute énergie : rayons gamma au TeV pour l'observatoire **HESS**³ en Namibie, et rayons cosmiques d'ultra haute énergie (10^{18} eV) pour l'observatoire **AUGER** en Argentine.

J'ai effectué mon stage sous la direction de Frédéric Derue au sein du groupe ATLAS du LPNHE.

ATLAS est une collaboration internationale regroupant près de 174 instituts dans 38 pays et plus de 3000 chercheurs dont plusieurs centaines d'étudiants effectuant leur thèse de doctorat. Le groupe du LPNHE est constitué de seize physicien(ne)s permanent(e)s dont huit enseignants-chercheurs et huit chercheurs au CNRS. Le groupe accueille neuf étudiants en thèse et deux chercheurs en contrats post-doctoraux. Les analyses de physique en cours dans le groupe sont liées à l'étude de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible avec la recherche du boson de Higgs dans son canal de désintégration en deux photons, mais aussi à travers l'étude des mécanismes de production et de propagation des bosons W ou d'études sur les propriétés du quark top; c'est dans le sous groupe en charge de cette dernière analyse (6 chercheurs permanents et 3 étudiants en thèse) que j'ai effectué ce stage.

1. *A Toroidal LHC ApparatuS*
2. *Tokai to Kamioka*
3. *High Energy Stereoscopic System*

1 Contexte scientifique

1.1 Le modèle standard de la physique des particules.

Le modèle standard de la physique des particules est une construction théorique qui permet de décrire les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions en terme de particules.

Ce modèle contient 12 fermions élémentaires de spin 1/2 (6 quarks et 6 leptons) et leurs antiparticules (décrit dans la Table 1.), ainsi que des bosons de spin entier (décrit dans la Table 2.) qui sont les vecteurs des interactions électromagnétique, faible et forte (le γ , le Z^0 et les W^\pm , les 8 gluons respectivement). Les quarks et les leptons sont classés en trois générations, ou familles. La matière ordinaire (protons et neutrons) est constituée de fermions de la première génération. Ce modèle a également permis d'unifier les interactions électromagnétique et faible en une seule : l'interaction électrofaible.

De plus, dernier succès le modèle stipule l'existence d'un boson supplémentaire, appelé boson de Higgs, qui permet d'expliquer l'origine de la masse des particules élémentaires. Ce boson aurait été découvert par les expériences ATLAS et CMS auprès du LHC en juillet 2012

	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille
Quarks	$\begin{pmatrix} up\ u \\ down\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} charm\ c \\ strange\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} top\ t \\ bottom\ b \end{pmatrix}$
Leptons	$\begin{pmatrix} neutrino\ \nu_e \\ électron\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} neutrino\ \nu_\mu \\ muon\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} neutrino\ \nu_\tau \\ tau\ \tau \end{pmatrix}$

TABLE 1 – *Les particules de type fermionique du modèle standard*

Interactions	Faible	Forte	Electromagnétique
Bosons	Z et W	Gluons g	Photons γ

TABLE 2 – *Les particules de type bosonique du modèle standard*

Actuellement, ce modèle est compris comme une théorie effective à basse énergie, qui doit être liée à une théorie plus fondamentale qui expliquerait par exemple l'origine de la matière noire. Afin de pouvoir tester certaines de ces théories, la communauté scientifique a eu besoin d'accélérateurs de particules pouvant atteindre des énergies de l'ordre du TeV.

1.2 Le dispositif expérimental

Le Large Hadron Collider

Le LHC est un collisionneur circulaire protons-protons de 27 km de diamètre situé à 100 m de profondeur près de Genève au CERN, le laboratoire Européen de physique des particules. En activité depuis novembre 2009, il accélère les faisceaux à 8 TeV⁴ dans le centre de masse des protons, avec des trains de protons séparés de 50 ns. A l'arrêt depuis mars 2013 les prochaines prises de mesures sont prévues pour 2015 avec cette fois une énergie de 14 TeV. Les collisions se produisent en 4 points du LHC, à chacun de ces points d'interaction un détecteur est présent.

4. 1 Tev ou Tera electron-Volt

Le détecteur ATLAS

Le détecteur ATLAS, permet d'étudier le modèle standard et de chercher des signes de nouvelle physique. C'est un cylindre de 25 m de haut et 44 m de longueur pour un poids de quelques 7000 tonnes, c'est le plus grand détecteur de physique des particules jamais construit. En interagissant avec la matière le constituant les particules, issues de la collision de protons, se désintègrent en particules filles, leptons, jets de particules, de hadrons etc., c'est à partir de l'identification de ces particules dans le détecteur que l'on peut reconstituer les caractéristiques de la particule initiale.

On distingue quatre sous détecteurs, en partant du vertex primaire, le point où la collision des deux faisceaux a lieu :

Le trajectographe, baignant dans un champ magnétique, permet de reconstruire la trajectoire des particules chargées et d'en déduire leur charge et leur impulsion. Le calorimètre électromagnétique permet la mesure de la position et de l'énergie déposée par les électrons et les photons qui s'y développent en gerbes électromagnétique. Le calorimètre hadronique mesure l'énergie déposée sous formes de gerbes hadroniques par des pions, protons, mésons... Le spectromètre à muons, identifie ces derniers, c'est la couche externe du détecteur.

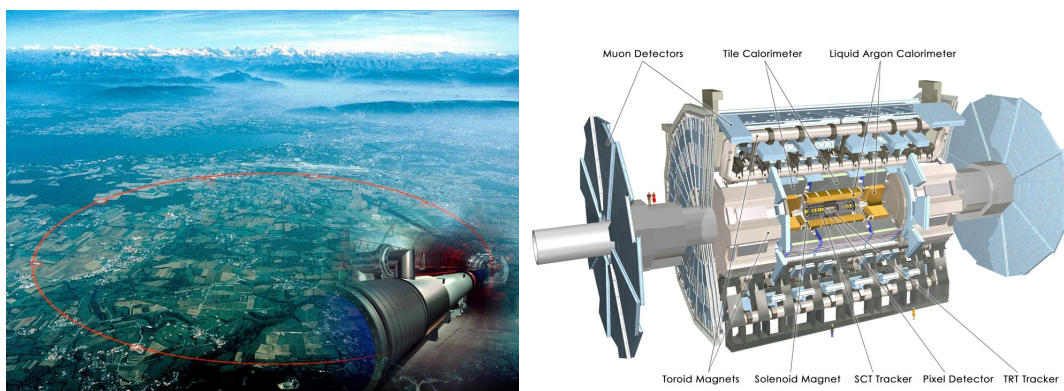


Fig 1. *Le LHC vu du ciel et le détecteur ATLAS*

1.3 Objet du stage

Mon stage porte principalement sur la reconstruction et l'identification d'électrons provenant de la désintégration du boson Z^0 dans ATLAS.

Pour traiter les données à ma disposition j'ai développé un code C++ dans le cadre du logiciel ROOT, développé par le CERN pour le traitement de données et la manipulation d'histogrammes.

Dans un premier temps il a fallu que je comprenne le fonctionnement d'ATLAS en visualisant les données issues des différents sous détecteurs et en déduire les principes de l'identification des électrons.

La littérature est nombreuse sur ce sujet ; pour la compréhension de ce stage je me suis basé sur quelques documents, thèses et notes de cours écrites dans le groupe. Par la suite j'ai continué l'écriture d'un programme permettant l'identification d'électrons pour différents niveaux d'exigence et l'évaluation de la qualité de cette reconstruction.

Enfin j'ai pu reconstruire à partir des électrons ainsi identifiés le boson Z^0 .

2 Travail Personnel

2.1 Données utilisées

J'ai utilisé des données collectées par la collaboration ATLAS en 2012. Elles ont été reconstruites par un logiciel de la collaboration qui permet, à partir des signaux électriques enregistrés par les différents éléments du détecteur, de reconstruire des variables plus facilement exploitables, comme des traces dans le trajectographe ou des amas d'énergie dans les calorimètres. Ce programme donne une liste de candidats électrons, c'est à dire un objet associant une trace à un amas dans le calorimètre ; c'est à partir de ces données reconstruites que j'ai travaillé. J'ai aussi utilisé des données issues d'un générateur Monte-Carlo simulant des collisions protons-protons à 8 TeV. On peut de plus en restreindre les états finaux des collisions simulées à ceux qui nous intéressent ici, à savoir, $Z^0 \rightarrow e^+e^-$. Après cette génération, les listes de particules sont injectées dans une simulation du détecteur ATLAS basée sur le logiciel GEANT4, permettant à la fois de construire un détecteur virtuel (représentant au mieux les sous-détecteurs, leurs matériaux, leur emplacement ...) et de simuler sa réponse au passage de chaque particule.

2.2 Premiers pas

J'ai développé un code C++ permettant le traitement des données et la visualisation d'histogrammes pour les électrons que j'ai sélectionnés.

Ce premier programme permet la gestion de nombreuses variables utiles pour le stage. En travaillant sur des données issues de simulations on a accès à la "vérité", c'est à dire que l'on peut obtenir la cinématique attendue pour les électrons et la liste des particules générées lors de la simulation de la collision. On peut aussi associer un objet reconstruit par GEANT4 à une particule "vraie". J'ai ainsi pu savoir si un objet reconstruit correspondait à un électron "vrai" et connaître sa particule mère. Avec ces informations on peut tracer des histogrammes de variables propres aux électrons issus de la désintégration d'un boson Z^0 .

2.3 Identification des électrons

Un événement $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ s'accompagnant toujours d'un cortège de hadrons (assemblages de quarks), il faut être à même de distinguer parmi les candidats, les électrons des hadrons. La Fig.2 montre la distribution d'impulsion transverse (pT) pour les électrons issus du Z et des hadrons. On pourra donc effectuer une sélection d'électrons de haut pT . Un électron est caractérisé par une trace dans le trajectographe, une gerbe fine dans le calorimètre, et une faible différence entre l'impulsion mesurée (P) et son dépôt d'énergie (E) dans le calorimètre (de part sa faible masse). Un hadron a une gerbe plus large et ne dépose qu'une partie de son énergie dans le calorimètre électromagnétique. La Fig.2 montre ainsi que la distribution de $\frac{E}{P}$ est clairement discriminante entre les deux populations. Aussi en coupant sur cette variable entre 0.5 et 1.4 on sélectionne les électrons. Pendant deux semaines, j'ai étudié des variables issues du trajectographe, donnant les points de mesures dans les différentes parties de ce sous-détecteur et des variables caractérisant les dépôts dans le calorimètre, ce qui m'a permis de me familiariser avec la géométrie du détecteur. J'ai ainsi pu définir des critères de sélection basés sur de nombreuses variables.

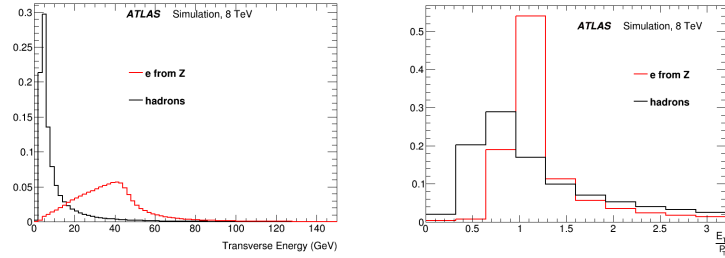


Fig.2A gauche la distribution d'impulsion transverse pour les électrons et les hadrons
A droite la distribution de $\frac{E_T}{p_T}$

Après avoir défini mes propres séries de coupures j'ai également pu utiliser les coupures standards (Tight et Loose) définies par le groupe ATLAS.

On peut mesurer l'efficacité de ces sélections avec les données simulées. La Fig.3 montre l'efficacité de sélection des électrons en fonction de pT pour ces deux niveaux d'identification. Au delà de 40 GeV on a une efficacité de 88% pour la sélection Loose et de 74% pour Tight.

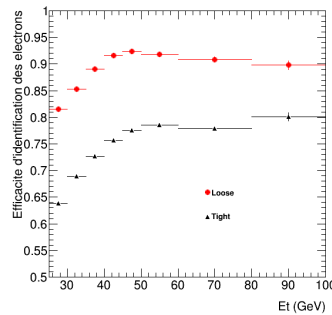


Fig.3 Efficacité d'identification des électrons en fonction de l'énergie transverse pour deux series de coupures

En fonction du niveau d'exigence requis pour une analyse on choisiras l'une où l'autre des sélections.

2.4 Reconstruction du boson Z^0

La dernière étape du stage a été la reconstruction du boson Z^0 . Après une étude sur les données simulées j'ai reconstruit les masse invariante⁵ de paires d'électrons de charges opposées avec un lots de données réelles. La distribution ainsi obtenue est la Fig.4 dans laquelle on voit trois pics apparaître, correspondant au boson Z à l'état final Υ (état lié de quarks $b\bar{b}$) et la particule J/Ψ (état lié de quarks $c\bar{c}$). Entre ces particules on voit un continuum de bruit dû à la mauvaise identification de hadrons en électrons. On peut à partir de ces particules obtenir des lots "purs" d'électrons, permettant une mesure d'efficacité sur les données réelles ; ceci a été abordé à l'extrême fin du stage.

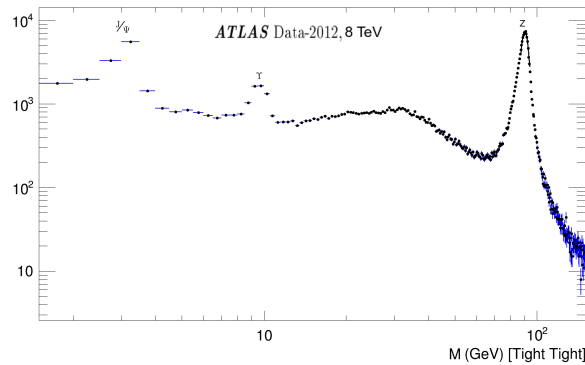


Fig.4 Distribution de masses invariantes de paires e^+e^- , avec les données du détecteur ATLAS

Pendant les derniers jours j'ai pu pousser l'analyse, en ajustant ces données pour déterminer les masses de ces états finaux.

5. $m_{invariante} = \sqrt{\frac{E_i^2}{c^4} - \frac{\vec{p}_i^2}{c^2}}$ ou i est l'indice des particules reconstruites

Conclusions

Cette immersion de cinq semaines au LPNHE m'a permis d'avoir un aperçu du métier de chercheur. Ayant choisi ce stage par intérêt pour la physique des particules, j'ai pu aborder différents aspects de ce domaine, allant de la production des particules sur accélérateurs, jusqu'à la reconstruction de particules aussi fondamentales qu'un boson Z^0 , en passant par le fonctionnement des grands détecteurs, en particulier pour la reconstruction d'électrons.

Cette première approche a renforcé mon envie de comprendre la théorie sous-jacente.

J'ai également pu comprendre les enjeux et défis de la reconstruction de particules dans les détecteurs, me familiariser avec l'environnement ROOT et consolider mes connaissances en C++

Par delà l'aspect purement scientifique, j'ai également découvert le fonctionnement d'un laboratoire et d'un groupe de recherche, j'ai pu participer à des réunions du groupe TOP-ATLAS toutes les semaines et y exposer par deux fois l'avancement de mon travail.

De plus j'ai eu l'opportunité d'assister aux séminaires du laboratoires portant sur des sujets aussi divers que la formation de supernovae ou les programmes qui succéderont au LHC.

Ce stage m'a également permis de parler avec de nombreux chercheurs de leurs formation et de leurs carrières et m'a ouvert des perspectives nouvelles pour les années à venir.

En conclusion ce stage m'a beaucoup apporté aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan humain et m'a surtout permis de conforter mon envie d'épouser une carrière de chercheur.