

Etude sur les bosons Z^0 avec l'expérience ATLAS auprès du LHC

**Rapport de stage de licence L3 – Physique mono-disciplinaire UPMC
Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies
(11 – 22 janvier 2016)**

Murugesu DEELOSHAN – Clara CIESLIK

Encadrant : Frédéric Derue

Le LPNHE et l'expérience ATLAS auprès du LHC

Le LPNHE est une unité composée de plusieurs groupes de recherche dont les expériences sont principalement liées à : la physique des particules (ATLAS), les astroparticules (HESS, CTA, Auger), la cosmologie (LSST) et la physique des neutrinos (T2K). Ils sont épaulés par 3 services techniques (informatique, électronique et mécanique) et 2 services de support (administration et logistique).

L'expérience ATLAS^[1] est une collaboration de plus de 3000 scientifiques venant de 174 laboratoires et universités situés dans 38 pays différents. Elle est basée sur le LHC^[2], le grand collisionneur de hadrons au CERN^[3], l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Le LHC est le plus puissant accélérateur de particules du monde (en marche depuis 2010), il s'agit d'un anneau circulaire de 27 km de diamètre qui accélère les hadrons à une vitesse proche de celle de la lumière.

ATLAS est un détecteur polyvalent construit au début des années 2000 et en fonctionnement depuis 2008. Il peut mesurer précisément les caractéristiques des particules produites lors des collisions de protons afin d'étudier le modèle standard.

Le modèle standard de la physique des particules

Le cadre théorique de la physique des particules élémentaires est appelé modèle standard^[4] des interactions électromagnétiques, faibles et fortes. Il a été développé dans la deuxième partie du XXe siècle et il décrit les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions. Ces constituants sont au nombre de douze (et leurs douze antiparticules associées qui composent l'antimatière). Ce sont tous des fermions (des particules à spin demi-entier qui obéissent à la statistique de Fermi-Dirac) : il existe 6 quarks et 6 leptons regroupés en trois familles (cf. figure 1).

Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions	boson de masse	
	I	II	III		
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 u up	1.27 GeV +2/3 1/2 c charm	171.2 GeV +2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon	125 GeV 0 0 H boson de Higgs
	4.8 MeV -1/3 1/2 d down	104 GeV -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon	
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z⁰ boson Z	BOSONS DE JAUGE nom spin charge électrique masse symbole 125 GeV 0 0 H boson H
	511 KeV -1 1/2 e électron	105.7 MeV -1 1/2 μ muon	1.777 GeV -1 1/2 τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] bosons W	

Figure 1. Tableau des particules élémentaires du modèle standard de la physique des particules

La première famille est constituée de deux leptons (l'électron et son neutrino associé) et de deux quarks (up et down) qui composent la matière telle qu'on la connaît. Les particules des familles II et III sont composées de particules beaucoup plus massives et donc de durée de vie plus courte ce qui explique que l'on ne les rencontre pas dans la matière ordinaire.

Le modèle inclut aussi les bosons de spin entier qui sont responsables des interactions électromagnétiques (photon), fortes (gluon qui assure la cohésion du noyau atomique), et faibles (bosons Z^0 , W^+ et W^- responsables de la désintégration et fission nucléaire). Les leptons chargés et leurs antiparticules sont sensibles aux interactions faibles et électromagnétiques. Les neutrinos ne sont sensibles qu'à l'interaction faible. Les quarks sont sensibles aux trois types d'interactions.

On s'intéresse plus particulièrement au boson Z^0 . Il est de charge électrique nulle et est un des vecteurs de l'interaction faible. Sa durée de vie est très courte ($\sim 10^{-25}$ s), on ne peut donc pas le détecter de manière directe mais on détecte le produit de sa désintégration. Le Z^0 peut se désintégrer :

- en une paire lepton/anti-lepton (10% des cas et équiprobabilité des trois types de leptons possibles)
- en une paire de neutrinos (20% des cas)
- en une paire quark/antiquark (70% des cas)

On verra par la suite comment ces différents produits de désintégration sont détectés par ATLAS.

Quelques mots sur la masse invariante

En relativité restreinte, la masse invariante d'une particule est définie comme :
$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$
 où E est l'énergie de la particule, p sa quantité de mouvement et c, la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette grandeur se conserve, donc lorsque qu'un Z^0 se désintègre on peut remonter à sa masse à partir des énergies et impulsions des produits de la désintégration qui sont mesurables par le détecteur. Pour le cas lepton/anti-lepton on a :

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E_{l^-} + E_{l^+}}{c^2}\right)^2 + \left(\frac{p_{l^-} + p_{l^+}}{c}\right)^2}$$
 où E_{l^-} et p_{l^-} sont l'énergie et la quantité de mouvement de la

particule chargée négativement et E_{l^+} et p_{l^+} l'énergie et la quantité de mouvement de son anti-particule de charge opposée.

Les paires électrons-positrons dont la masse reconstruite est proche de celle du Z^0 (91.2 GeV) seront alors dites issues de la désintégration d'un Z^0 .

Structure du détecteur ATLAS

Le détecteur ATLAS a la forme d'un cylindre de 25 m de large et de 46 m de long comprenant plusieurs couches de détecteurs. Il détecte les particules créées lors des collisions proton-proton du

LHC (leptons, jets). A partir de leur quantité de mouvement, leur charge électrique ou de leur énergie, les physiciens sont capables de caractériser ces nouvelles particules.

Les quatre parties du détecteur sont :

- Le détecteur interne : les particules chargées qui y passent voient leur trajectoire courbée par le champ magnétique qui y règne. En mesurant le rayon de courbure on déduit l'impulsion et la charge.
- Le calorimètre électromagnétique : il mesure les énergies des photons et électrons (dont l'énergie est entièrement absorbée et qui sont donc stoppés à ce niveau) et des hadrons (de manière partielle) par interaction électromagnétique.
- Le calorimètre hadronique : il permet de détecter les particules composées de quarks (neutrons, protons) et (ou) antiquarks par interaction forte.
- Les chambres à muons : les muons sont des particules capables de traverser toutes les couches d'ATLAS sans être stoppées par les calorimètres grâce à leur masse importante. Un autre dispositif est donc mis en place sur la partie extérieure du détecteur. Les chambres à muons se trouvent dans un champ magnétique toroïdal intense généré par d'immenses bobines. La détection de l'impulsion des muons y est donc très précise. L'énergie des muons est, elle, déterminé par mesure de la différence de potentiel créée lorsque que les muons ionisent le gaz qui remplit les chambres.

Travail réalisé

Une collision est appelée événement. On cherche à identifier les particules qui en résultent et à récupérer les électrons ou positrons (dans la suite, on désignera par « électron » toute particule de ce type sans distinction de charge), puis, grâce à leur masse invariante, à déterminer lesquels sont candidats pour être le produit d'une désintégration de Z^0 .

Durant la première semaine du stage nous avons travaillé avec un lot de 1000 événements de la collaboration ATLAS enregistrés en 2012. Ce lot est utilisé pour un traitement simplement visuel, le plus souvent dans le cadre des Master Classes du CERN^[5], et permet de "visualiser" différentes particules.

Durant la deuxième semaine, nous avons utilisé un lot d'événements simulés d'une collision donnant un boson Z^0 se désintégrant en une paire électron-positron. Ce lot a été analysé en écrivant un programme d'analyse en utilisant le même logiciel que celui utilisé réellement par les membres de la collaboration ATLAS .

Tri des événements avec le logiciel HYPATIA

HYPATIA est un logiciel qui permet d'identifier les événements principalement de manière visuelle.

Sur la figure 2. on peut observer deux vues en coupes sous des angles différents.

La partie grise où se situent les traces est le détecteur interne, la partie verte, le calorimètre électromagnétique, la partie rouge, le calorimètre hadronique et les parties bleues sont les chambres à muons.

A côté se trouve un histogramme qui montre les pics d'énergie, il permet de repérer rapidement si des particules se détachent des autres.

En haut à droite, on a un tableau contenant les informations sur toutes les traces représentées, on peut les sélectionner et les identifier comme électrons, muons ou photons pour le calcul des masses.

Si on regarde les données telles quelles il y a un grand nombre de traces et elles ne sont pas toutes utiles, pour se débarrasser du bruit de fond, on effectue des coupures, principalement en écartant les particules de faible énergie transverse (< 20 GeV).

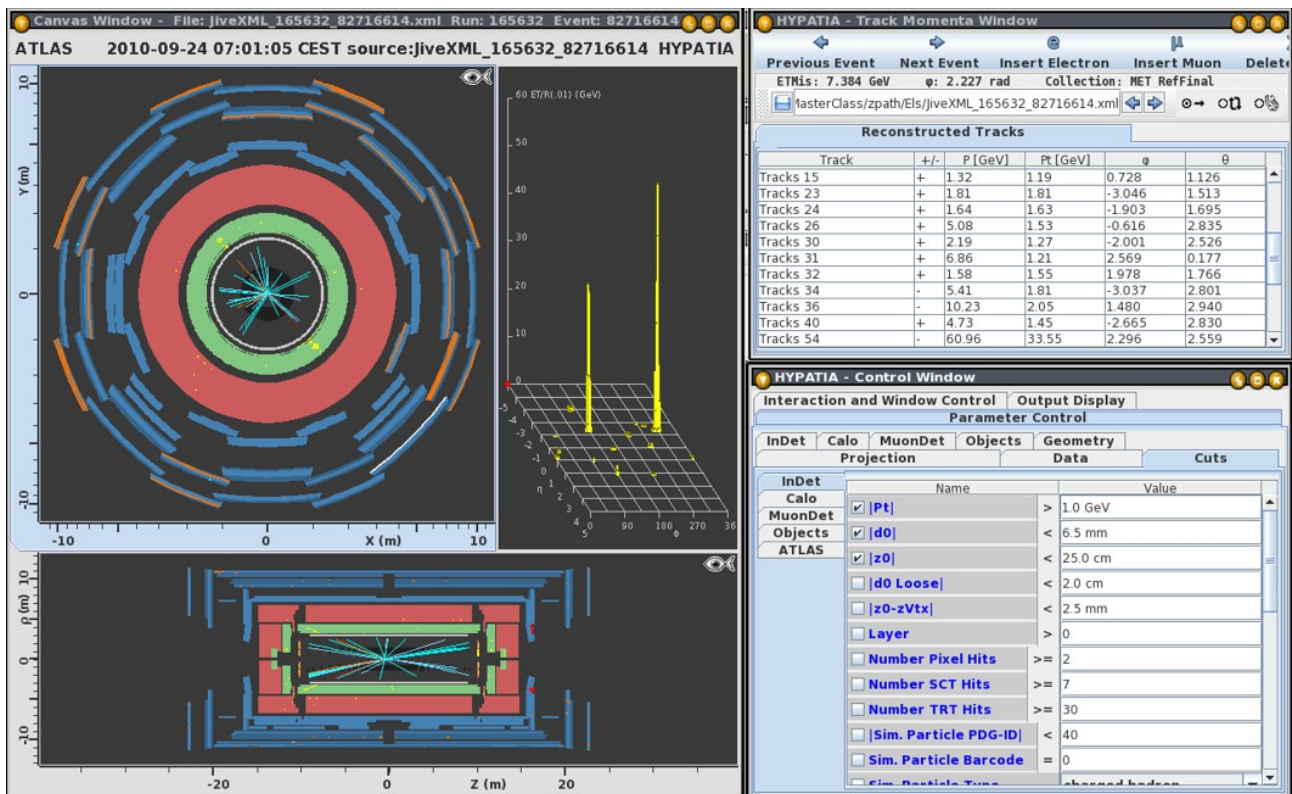


Figure 2. Visualisation d'un événement avec Hypatia

Paires électron/positron

Comme on l'a expliqué précédemment, les électrons déposent toute leur énergie dans le calorimètre électromagnétique. Ils sont donc caractérisés par une trace dans le détecteur interne suivie d'un dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique. Quand on observe un événement il y a généralement beaucoup de bruit de fond provenant de collisions entre protons à plus basse énergie, moins intéressantes que la collision « principale ». Il est donc préférable de supprimer de l'image toutes les particules d'énergie transverse inférieure à 20 GeV. On regarde ensuite le signe de l'impulsion transverse pour déterminer s'il s'agit d'un électron (-) ou d'un positron (+) (cf Figure 3.).

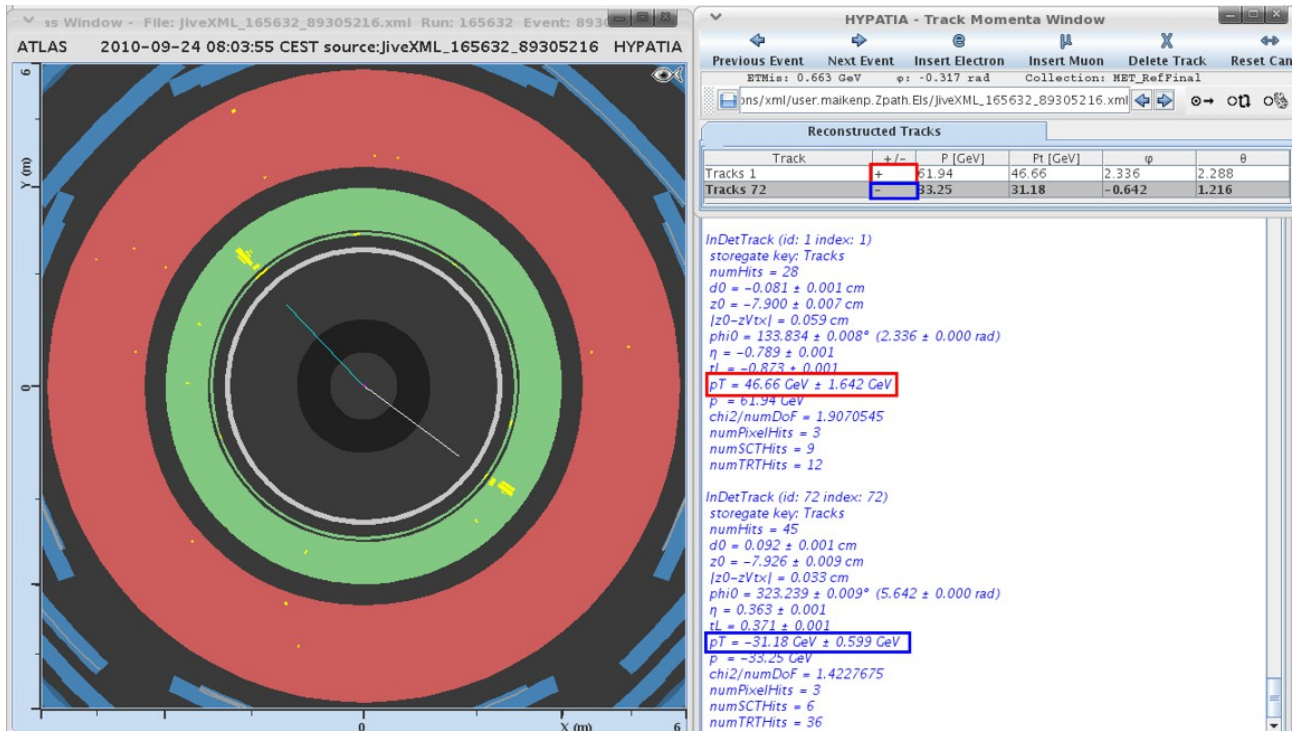


Figure 3. Visualisation d'un événement électron-positron, on voit les deux particules d'impulsions transverses (p_T) de signes opposés et déposant toute leur énergie dans le calorimètre électromagnétique (tache jaune)

Paires muon/anti-muon

Après une sélection des traces d'énergie supérieure à 5 GeV (pour éviter le bruit de fond) les muons sont faciles à repérer car ce sont les seules particules qui traversent tous les détecteurs et ne déposent leur énergie que dans les chambres à muons. On utilise encore le signe de l'impulsion transverse pour différencier muon et anti-muon.

Paires de photons

Les dépôts d'énergie des photons sont similaires à ceux des électrons dans le calorimètre électromagnétique sauf qu'ils ne sont associés à aucune trace dans le détecteur interne puisque les photons sont des particules neutres.

D'autres événements identifiables sont les jets de hadrons qu'on reconnaît par des traces en forme de faisceaux qui aboutissent à des dépôts d'énergie assez étalés dans le calorimètre hadronique.

Toutes ces particules sont détectables directement mais il en existe qui ne laissent de trace dans aucun des détecteurs. En effet les neutrinos n'interagissent presque pas avec la matière et sont difficilement détectables. Heureusement lors d'une collision, l'énergie totale est conservée. Quand on mesure l'énergie transverse totale d'un événement si une partie est manquante on peut en déduire la présence possible d'un neutrino.

Quand on a un événement on ajoute à chaque fois les masses invariantes des particules qu'on identifie dans un tableau qui calcule la masse invariante totale issue de la collision. On utilise un petit programme de tri réalisé par nos soins pour ranger les données de manière utilisable par

Gnuplot pour tracer des histogrammes présentant les masses invariantes (*cf Figure 4.*)

Comme on étudie le boson Z, on s'intéresse plutôt aux événements impliquant des leptons. Les masses invariantes des événements diphotons sont d'ailleurs réparties assez uniformément et on ne voit pas de tendance particulière alors que pour les muons et les électrons on a des pics bien définis.

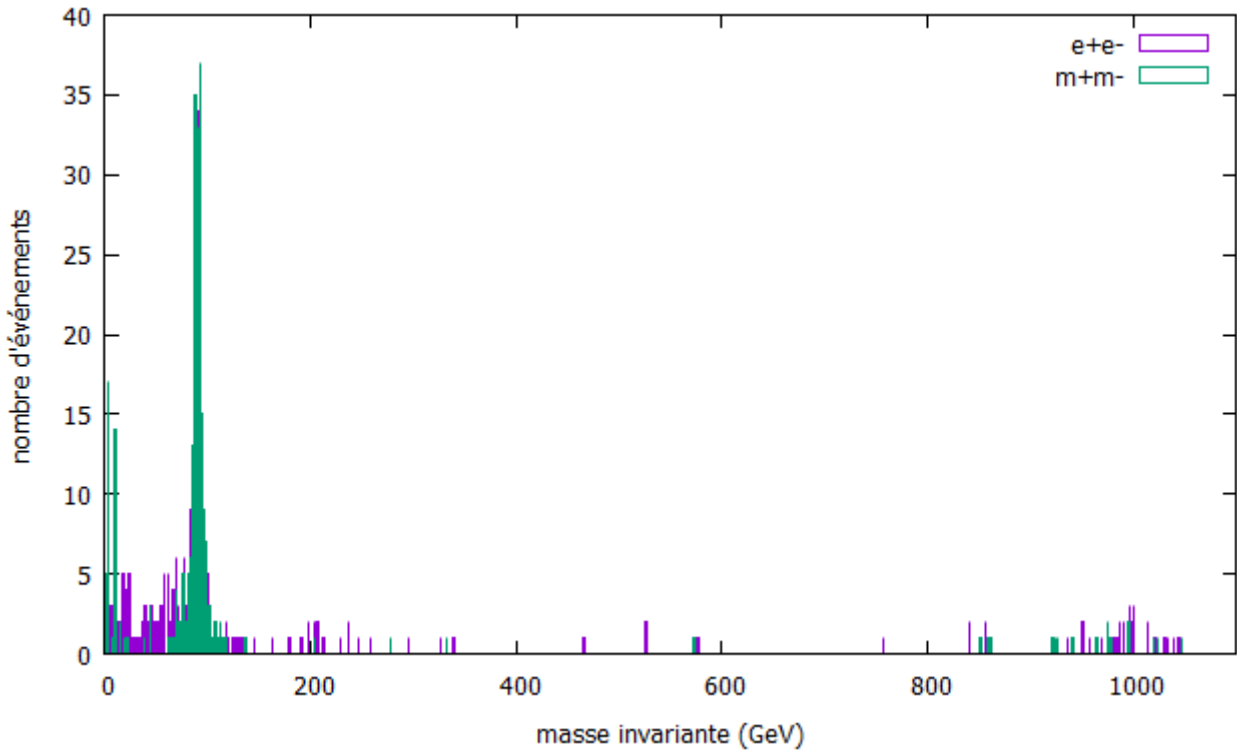


Figure 4. Répartition des masses invariantes des événements e^+e^- et $\mu^+\mu^-$

Le pic qui nous intéresse est celui à environ 90 GeV (*cf Figure 5.*) il est commun à la fois aux électrons et aux muons alors que les autres sont légèrement décalés et il est plus important que les autres. Les événements qui sont concernés sont donc probablement issus d'une désintégration de boson Z^0 mais la masse invariante ne suffit pas à déterminer cela avec certitude. Le pic principal a la forme d'une gaussienne dont la largeur est due à la résolution en énergie et en position du détecteur.

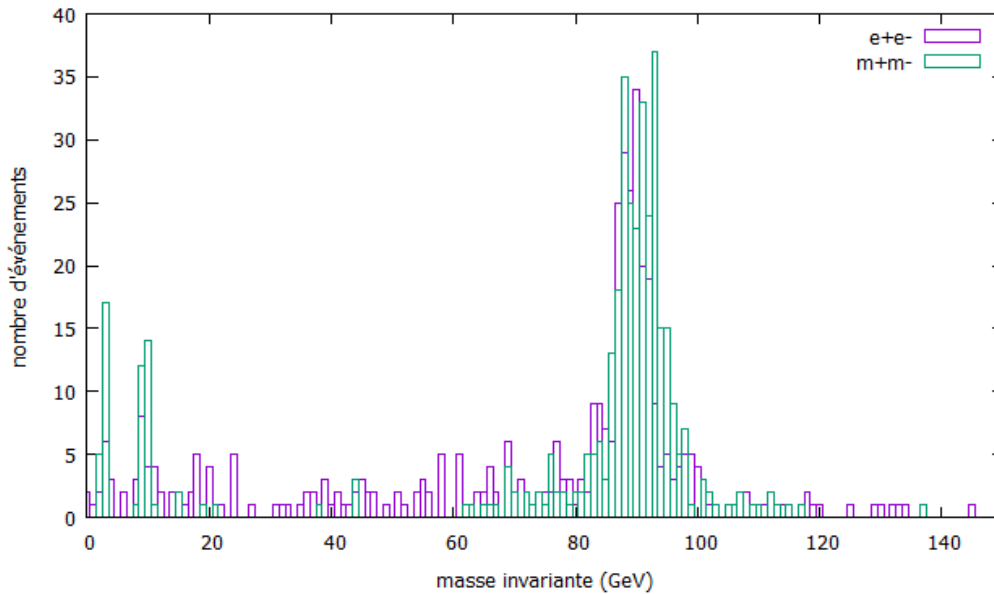


Figure 5. Répartition des masses invariantes des événements e^+e^- et $\mu^+\mu^-$ (suite)

Tri des événements avec le logiciel Root^[6]

Pour faire des sélections sur un nombre plus grand de données, on ne peut pas utiliser Hypatia avec lequel on identifie les événements un par un. On passe sur la version 5.34 de Root, un logiciel développé par le CERN qui permet l'analyse, la visualisation et le stockage de données. Il nous permet de trier un grand nombre d'événements de manière automatisée. On utilise un lot de 1000 événements simulés.

On rédige un script en C qui analyse les données et les trie selon certains critères (portant sur l'énergie des particules, leur quantité de mouvement, etc.).

Comme nous travaillons sur une simulation, il existe une fonction de vérité Monte-Carlo qui détermine directement si la particule est un vrai électron ou pas.

On définit quelques critères discriminants et on les compare ensuite aux « vrais électrons », pour vérifier leur efficacité :

- L'énergie transverse : les événements caractérisés par une faible énergie sont plus probablement du bruit de fond. Sur le premier graphe de la figure 6. on observe un pic à 5 GeV venant du bruit de fond si l'on veut s'en débarrasser totalement il est préférable de ne garder que les particules d'énergie supérieure à 20 GeV même si on perd une partie des vrais électrons : on peut voir en effet sur le deuxième histogramme créé avec la fonction de vérité qu'il y a des électrons d'énergie transverse inférieure mais ceux-ci se recourent avec le bruit de fond.
- Les fuites hadroniques : les électrons étant arrêtés par le calorimètre électromagnétique, il ne doivent pas laisser de dépôt d'énergie dans le calorimètre hadronique. On peut donc éliminer les événements dont les fuites hadroniques (la proportion d'énergie déposée dans le calorimètre hadronique) sont supérieures à 2% (cf Figure 7.).

- Le développement latéral de la gerbe (*cf Figure 8.*) : lorsque les électrons déposent leur énergie dans le calorimètre, leur développement latéral $R\eta$ est faible : ils déposent plus d'énergie dans une fenêtre de 3×7 cellules du calorimètre électromagnétique contrairement aux jets qui sont beaucoup plus étalés et déposent leur énergie dans une fenêtre 7×7 . On ne garde que les événements de $R\eta$ supérieur à 0,8, où $R\eta$ est le rapport de la quantité d'énergie déposée dans une fenêtre 3×7 sur la quantité d'énergie déposée dans une fenêtre 7×7 .

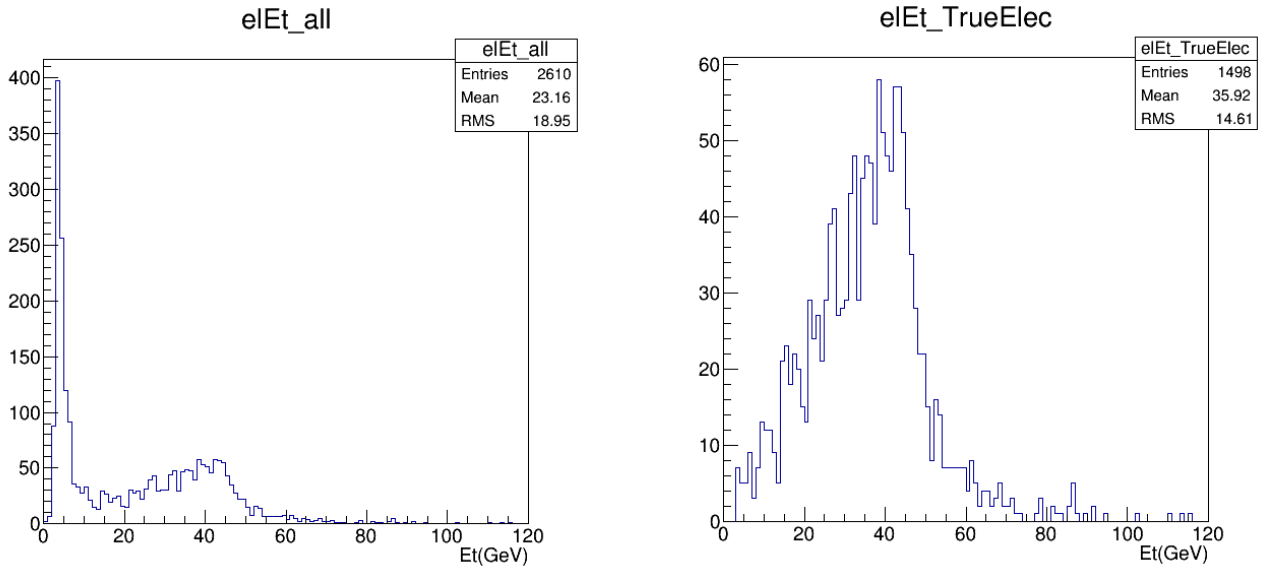


Figure 6. Répartitions des énergies transverses sans sélection (gauche) et pour les vrais électrons (droite)

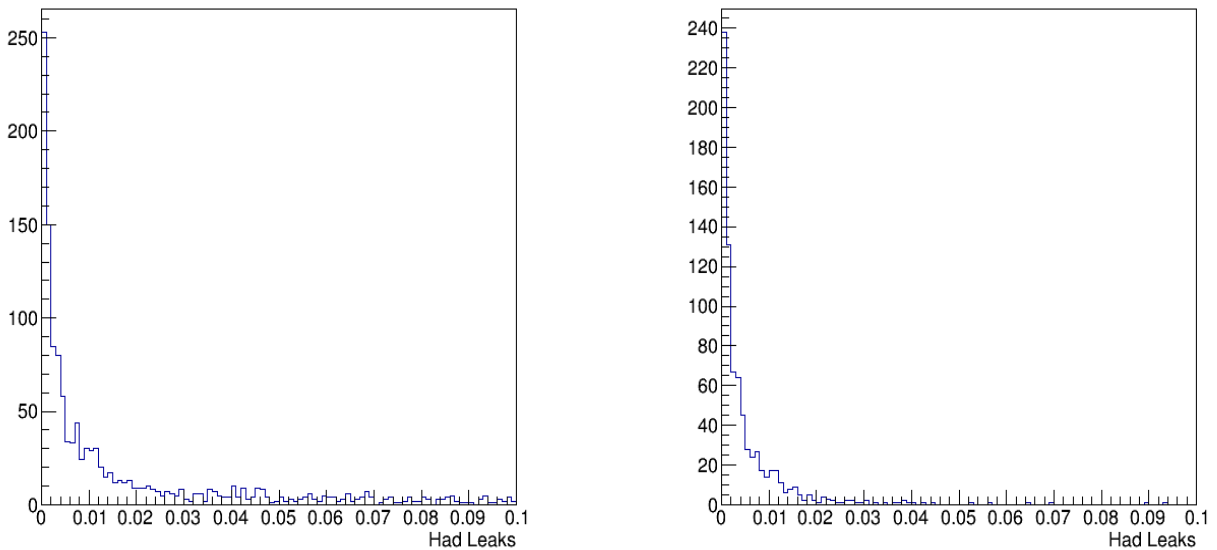


Figure 7. Fuites hadroniques sans sélection (gauche) et vrais électrons (droite)

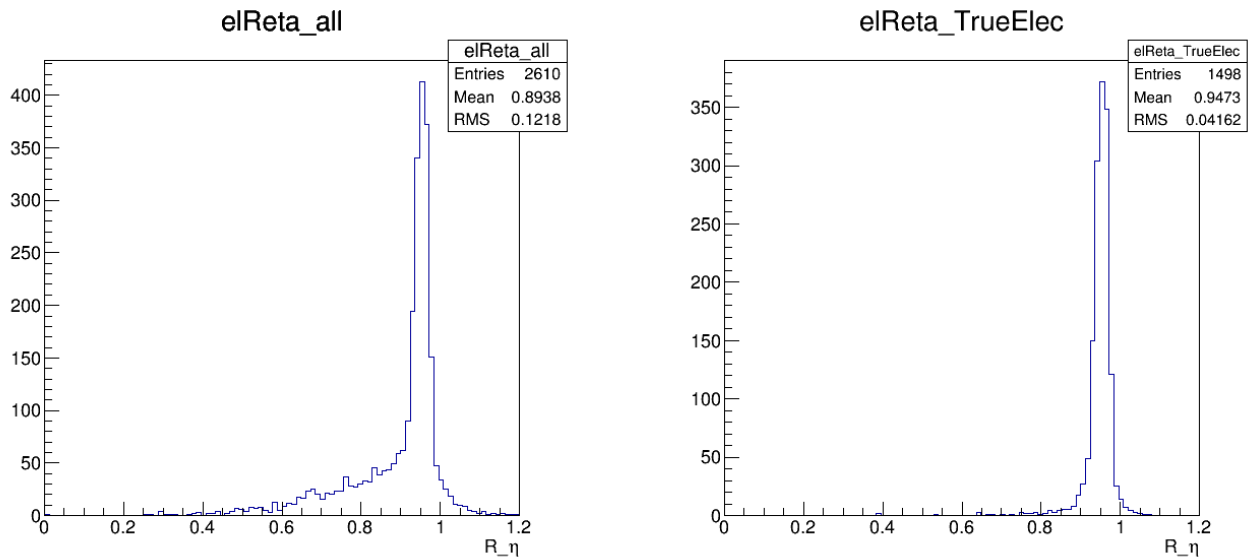


Figure 8. Développement latéral de la gerbe sans sélection (gauche) et vrais électrons (droite)

Maintenant que l'on n'a gardé que les événements qui contiennent des électrons et des positrons sans distinction, on vérifie la charge des particules sélectionnées et on ne garde que les événements qui contiennent un électron et un positron, possiblement produits de la désintégration d'un boson Z^0 .

On calcule alors la masse invariante des paires et on obtient un histogramme similaire à celui obtenu avec Hypatia.

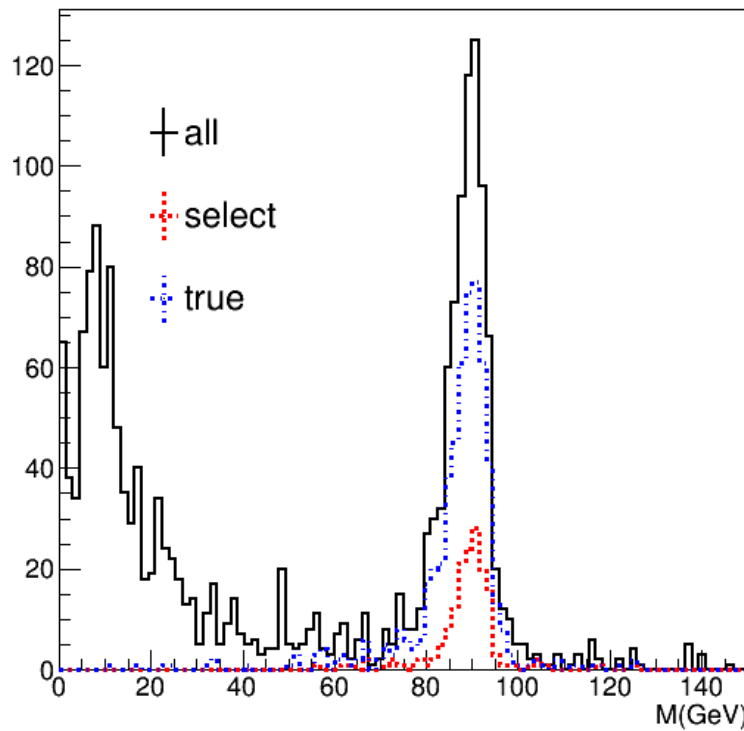


Figure 9. Masse invariante des couples électron-positron

La courbe « select » sur la figure 9. correspond à la sélection que nous avons effectuée. En la comparant à la courbe « true » des vrais électrons on voit qu'elle a la même forme avec un pic à environ 90 GeV de forme gaussienne qui correspond à la masse invariante du boson Z^0 .

Il est intéressant de regarder le nombre d'entrées que l'on a après chaque sélection :

	Pas de discrimination	Entre 80 et 100 GeV
Tous	1889	758
Notre sélection	162	143
Vrais électrons	565	474

Sachant que l'on s'intéresse au Z^0 de masse 91,2 GeV, les chiffres pertinents sont ceux qui concernent les masses comprises entre 80 GeV et 100 GeV.

Seuls 62 % des événements simulés sont éligibles pour être une désintégration de Z^0 (vrais électrons).

On remarque cependant que l'on a perdu plus de la moitié des événements (70%) avec notre sélection, ce qui est nécessaire pour ne pas avoir de bruit de fond. Il vaut mieux perdre quelques vrais électrons plutôt que d'avoir des fausses particules dans notre sélection.

Conclusion :

Hypatia est une bonne méthode pour visualiser les événements et comprendre comment les différentes particules interagissent avec le détecteur, cependant si on veut faire de la manipulation de données il est nécessaire d'avoir un logiciel adapté. Hypatia utilise des données qui ont déjà été triées, à savoir que les données fournies ne contiennent que les événements « faciles » à identifier. En réalité, dans les données brutes il n'y a que peu de collisions qui sont exploitables et une grande sélection est faite à ce moment.

Avec les simulations, on obtient de bons résultats et on retrouve bien la masse du Z^0 juste avec quelques critères discriminants. Le prix à payer est que l'on perd une grosse partie des événements pourtant éligibles car les coupures que l'on effectue sont assez drastiques.

Bilans personnels

Murugesu :

Le stage était divisé en deux parties. La première partie consistait à analyser et détecter les particules caractéristiques d'événement Z. La deuxième partie consistait à trier les événements en utilisant le logiciel Root. Ce stage m'a permis d'améliorer mes connaissances en programmation. Il m'a permis de comprendre les différentes méthodes utilisées par les physiciens pour détecter les particules élémentaires. J'ai surtout rencontré des difficultés dans l'utilisation de Root. Il m'a permis de comprendre le fonctionnement d'un laboratoire.

En conclusion le stage m'a permis de mettre en œuvre mes acquis scolaires et par l'occasion d'acquérir des nouvelles compétences.

Clara :

Ce stage a été pour moi très instructif. En effet je souhaite travailler dans le domaine de la recherche, et passer dix jours dans un laboratoire m'a confortée dans cette décision. Je remercie d'ailleurs Frédéric Derue ainsi que tout le personnel qui nous ont présenté les différents pôles du laboratoire et les thèmes de recherche en cours.

Cette dernière partie étant très intéressante car j'avais jusque là une idée un peu fixe du domaine de la physique dans lequel je voulais travailler (l'astrophysique) et voir des choses différentes m'a appris à élargir mes horizons et à réfléchir à d'autres possibilités. Par exemple, il y a d'autres professions que le métier de chercheur qui interviennent dans un projet de recherche, comme l'informatique, qui est la voie vers laquelle je pense m'orienter si je ne parviens pas à devenir physicienne.

Quant au travail effectué pendant le stage, la première partie permettait bien de visualiser ce qui se passe dans le détecteur ATLAS lors d'une collision, ce qui est très instructif. Mais j'ai trouvé la deuxième plus intéressante car un peu plus ardue à aborder au début mais en même temps plus satisfaisante quand on parvient à un résultat à la fin.

Références

- [1] The ATLAS experiment, Monica Lynn Dunford and Peter Jenni (2014), Scholarpedia, 9(10):32147, http://www.scholarpedia.org/article/The_ATLAS_experiment
- [2] Large Hadron Collider, site web de LHC France, <http://www.lhc-france.fr/>
- [3] CERN, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, <http://home.cern/fr>
- [4] Revue Elementaire, <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>
- [5] CERN master classes, <http://physicsmasterclasses.org/>
- [6] ROOT, <https://root.cern.ch/>