



Préparation à la recherche du boson de Higgs se
désintégrant en deux photons dans le collisionneur
LHC avec l'expérience ATLAS

Laura Zambelli

Mai 2009

Sous la tutelle de Nguyet Thi Trinh

Réalisé au LPNHE

Stage de M1-PF
Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

Table des matières

1	Introduction	1
2	Description du sujet	2
2.1	Le Modèle Standard	2
2.2	Le détecteur Atlas au LHC	3
2.3	Le boson de Higgs	5
2.3.1	Description	5
2.3.2	le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$	5
2.3.3	Le bruit de fond	6
2.4	Photons convertis et non-convertis	6
3	Travail réalisé	7
3.1	Sélection des photons venant du Higgs	7
3.1.1	Pré-sélections	7
3.1.2	Variables discriminantes	7
3.2	Les sélections appliquées	9
3.2.1	Coupures standard	9
3.2.2	Optimisation	9
3.3	L'efficacité du signal et le taux de réjection du bruit de fond	9
3.4	Comparaison avec d'autres techniques de sélection du photon	10
4	Conclusion et perspectives	11
A	Exemple de coupures sur la variable F_{side} pour une énergie comprise entre 30 et 40 GeV	13

1 Introduction

Le LPNHE est une Unité Mixte de Recherche¹ de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), institut du CNRS et des Universités Paris VI et Paris VII. Ce laboratoire est composé de 130 personnes dont 80 chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants et post-doctorants. Le LPNHE comporte plusieurs domaines de recherches : physique des particules, physique des astroparticules, cosmologie, physique théorique ou encore biophysique ; tous impliqués dans de nombreux programmes de recherches nationaux et internationaux tels que le CERN (Suisse et France), le FERMILAB (Chicago, USA), le SLAC (Stanford, USA), HESS (Namibie), T2K (Japon) ou encore AUGER (Argentine).

Les expériences auprès du collisionneur proton-proton LHC² du CERN ont pour but d'explorer de nombreux domaines de la physique des particules avec une énergie dans le centre de masse de 14 TeV, énergie jusque-là jamais atteinte par un accélérateur. L'expérience Atlas (Air Toroidal ApparatuS) a été conçue (avec l'expérience CMS) pour étudier de nombreuses thématiques développées au LHC : la recherche du Boson de Higgs, l'étude du quark Top, l'étude de la brisure de symétrie électrofaible ou encore la recherche de la supersymétrie et de nouvelles dimensions. Le LHC devrait être mis en fonctionnement vers la fin de l'année 2009.

Le groupe Atlas du LPNHE, dirigé par Philippe Schwemling, est composé de 18 chercheurs dont 12 permanents, 2 post-doctorants et 4 doctorants ainsi que d'une équipe de techniciens et ingénieurs en informatique, mécanique et électronique. Le groupe est impliqué dans la réalisation du calorimètre électromagnétique du détecteur, un calorimètre à échantillonnage en plaques de plomb et argon liquide, le tout empilé en accordéon. Il est également impliqué dans le développement et l'amélioration des logiciels permettant la reconstruction des événements ainsi que dans la préparation à l'analyse des données fournies par le détecteur.

Dans une première partie, le sujet sera exposé en revenant brièvement sur le Modèle Standard de la physique des particules qui décrit les différents composants élémentaires de la matière ainsi que leurs interactions fondamentales. Puis, une introduction au Boson de Higgs, particule encore théorique fournissant une explication sur l'origine de la masse, sera donnée ainsi qu'une courte description du détecteur Atlas. Ensuite, le travail effectué lors du stage sera exposé, la préparation à la recherche du Higgs se désintégrant en deux photons.

1. UMR 7585

2. Large Hadron Collider

2 Description du sujet

2.1 Le Modèle Standard

Le Modèle Standard de la physique des particules est une théorie qui décrit les interactions fortes, faibles et électromagnétiques ainsi que les constituants élémentaires de la matière.

Il existe deux types de constituants élémentaires : les Quarks et les Leptons. Ce sont tous des fermions, répartis en trois familles en fonction de leurs masses semblables (cf. Table 1). Notons qu'à chaque particule du Modèle Standard décrite dans la Table 1, lui correspond son antiparticule (même masse, charge opposée). La matière ordinaire est constituée des éléments de la première famille (quarks u et d et électrons), les plus légères et les plus stables des particules élémentaires. Il existe trois types d'interactions au niveau subatomique : La force forte, régulée par le gluon et exercée uniquement sur les quarks ; La force faible, régulée par les bosons Z^0 et W^\pm et exercée sur tous les fermions et enfin la force électromagnétique, régulée par le photon et exercée sur toutes les particules chargées. L'interaction électromagnétique et l'interaction faible ont été unifiées pour donner l'interaction électrofaible. La gravitation n'est pas encore incluse dans le Modèle Standard.

Les constituants les plus lourds sont créés au cours de violentes réactions comme dans les accélérateurs. Cependant, dû à leurs grandes masses, ils se désintègrent rapidement par interaction faible en constituants plus légers. Les quarks ne sont pas observables seuls. Ils s'assemblent en hadrons par interaction forte : un quark et un anti-quark forment un méson et trois quarks ensemble forment un baryon.

Cette théorie n'a pour l'instant jamais été mise en défaut par les observations expérimentales, toutes les prédictions se sont avérées correctes. Cependant, des questions persistent encore comme l'origine de la masse, l'absence d'antimatière dans l'Univers, la supersymétrie, la gravitation ... C'est pour cela que de grands détecteurs sont créés, il servent à confirmer, infirmer ou préciser le modèle.

		1 ^{re} Famille	2 ^e Famille	3 ^e Famille
Fermions	Quarks	up : u down : d	charm : c strange : s	top : t beauty : b
	Leptons	électron : e^- neutrino : ν_e	muon : μ^- neutrino : ν_μ	tau : τ^- neutrino : ν_τ
Bosons	Bosons de jauge	Interactions électromagnétiques : photons γ Interactions faibles : W^\pm et Z^0 Interactions fortes : gluons g		
	Bosons hypothétiques	Le Boson de Higgs Le graviton		

TABLE 1 – Les particules et vecteurs d'interactions du Modèle Standard

2.2 Le détecteur Atlas au LHC

Le détecteur Atlas est l'une des 5 expériences du LHC. Il a été construit pour pouvoir exploiter pleinement le potentiel de découverte du LHC : le Boson de Higgs et les particules supersymétriques. De forme cylindrique, d'une longueur de 40 mètres et d'un diamètre de 22 mètres, il pèse plus de 7000 tonnes. Il est constitué de quatre couches successives de détecteurs concentriques, dits calorimètres (cf. Figure 1) :

Le détecteur interne : aussi appelé le trajectographe, il sert à détecter les trajectoires des particules créées. Il est situé autour du faisceau de protons, c'est à dire très proche de la zone d'interaction, dite vertex d'interaction. A l'aide du champ magnétique intense de 4 Tesla dans lequel il est baigné, crée par le solénoïde, il dévie légèrement les particules chargées et permet grâce aux algorithmes de reconstruire leurs impulsions transverses P_T ainsi que l'origine des vertex primaires et secondaires.

Le calorimètre électromagnétique : le rôle d'un calorimètre est de stopper les particules pour pouvoir mesurer leur énergie. Le calorimètre électromagnétique, constitué d'argon liquide, sert à détecter les particules de nature électromagnétiques : e^+ , e^- , γ , ... Lorsque celles-ci pénètrent dans le détecteur, elles se désintègrent en une gerbe de particules. Le calcul de l'énergie transverse E_T des particules incidentes est possible via leurs produits de désintégration.

Le calorimètre hadronique : tout comme le calorimètre électromagnétique, le calorimètre hadronique sert à mesurer l'énergie des particules non stoppées (les hadrons) par ce précédent en utilisant la même méthode.

Le détecteur à muons : seuls les muons et les neutrinos peuvent traverser les précédents détecteurs sans interagir. Le détecteur à muons est situé en périphérie d'Atlas. Les chambres à muons permettent de reconstituer la trajectoire de ces particules et déterminer parfaitement leurs impulsions transverse. Les neutrinos ne sont pas détectés par Atlas mais il est possible de vérifier leurs présence en calculant la différence entre l'énergie totale mesurée par Atlas et l'énergie dans le centre de masse de la réaction initiale (14 TeV).

Le système de coordonnées propre à Atlas (η, ϕ, z) : ϕ est l'angle azimutal, θ est l'angle polaire et z suit l'axe du faisceau. L'énergie transverse est définie par $E_T = E \sin(\theta)$. La pseudorapidité η est définie par :

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)$$

Les détecteurs sont échantillonnés par des cellules de capteur. Ainsi, le calorimètre électromagnétique est séparé en plusieurs compartiments. Le 1^{er} compartiment, dans lequel la majeure partie de l'étude a porté, a un échantillonnage plus élevé que les autres compartiments.

Comme nous pouvons le voir dans la Figure 2, une étude sur le détecteur interne et le calorimètre électromagnétique, comme présenté ici, est délimité par les valeurs en η telles que $0 \leq |\eta| \leq 2.5$. De plus, la zone où $1.37 \leq |\eta| \leq 1.52$ est dite « zone de crack » : dans cette région, il n'y a pas de détecteur mais une zone de service où l'on fait passer les câbles. De ce fait, cet intervalle est exclue de l'étude.

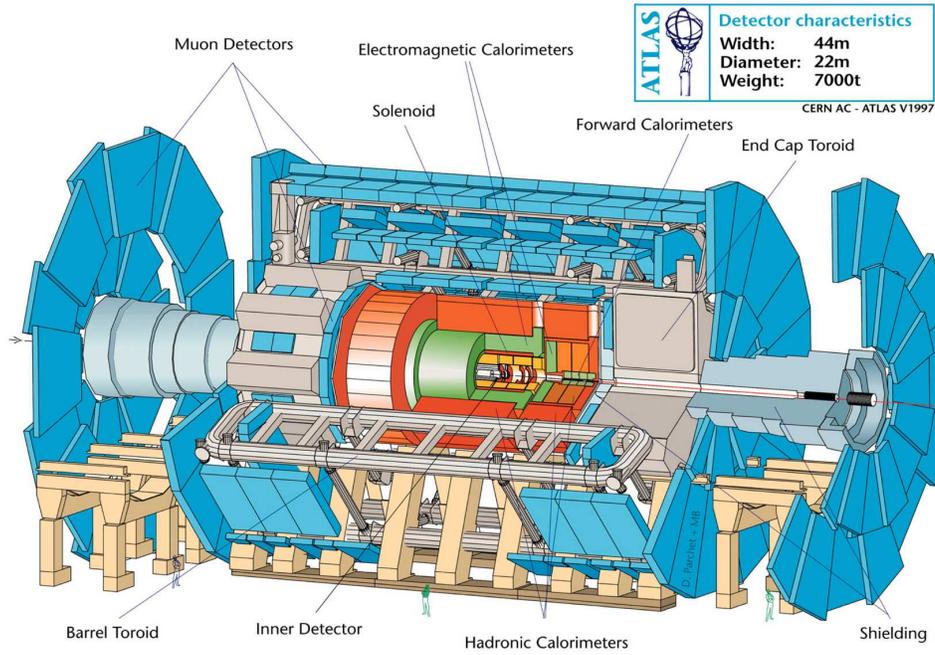


FIGURE 1 – Le détecteur ATLAS

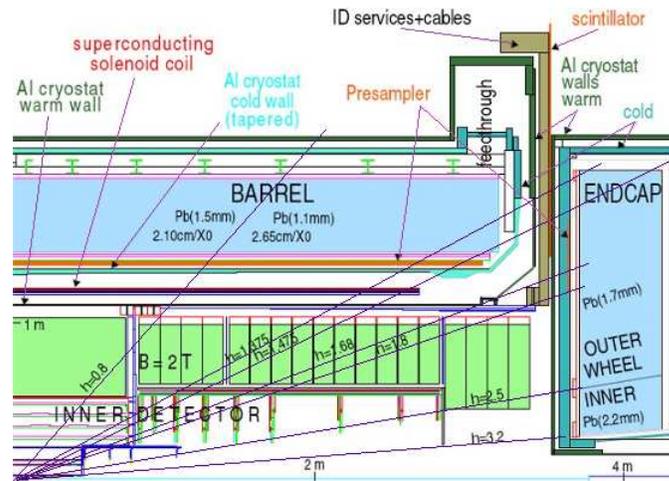


FIGURE 2 – Les zones délimitées par η du détecteur Atlas-vue en coupe

2.3 Le boson de Higgs

2.3.1 Description

Le boson de Higgs est une particule élémentaire, le quantum du champ de Higgs, dont l'existence a été proposée en 1964 par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs. Ce constituant permet d'expliquer la brisure de l'interaction unifiée électro-faible. En effet, les bosons de jauge de l'interaction faible Z^0 et W^\pm possèdent une masse alors que le boson de l'interaction électromagnétique, le photon, n'en possède pas. En se couplant avec le champ de Higgs, les constituants élémentaires acquièrent leurs masses. Le boson de Higgs peut également se coupler à lui-même pour créer sa propre masse. Cependant, n'ayant encore jamais été observé, sa masse reste inconnue. D'après de récentes études au Tevatron, on peut seulement prédire qu'elle sera comprise entre $114 \text{ GeV}/c^2$ et $185 \text{ GeV}/c^2$ en excluant la zone $160\text{-}170 \text{ GeV}/c^2$. L'intervalle de masse le plus probable pour le boson de Higgs est $114\text{-}160 \text{ GeV}/c^2$. La Figure 3 à gauche représente les modes de productions du boson de Higgs. Les deux diagrammes de Feynmann du haut représentent la production par fusion de gluons et par fusion de bosons vecteurs (Vector Boson Fusion) qui sont les plus probable au LHC. Les diagrammes du bas représentent quant à eux la production associée du Higgs.

La découverte du boson de Higgs est un enjeu majeur en physique des particules. Son observation permettrait de valider complètement le Modèle Standard car, à l'heure actuelle, c'est l'unique constituant manquant à cette théorie. Le LHC a été en grande partie construit pour sa recherche.

2.3.2 le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Lors d'une éventuelle production du Higgs, on ne peut le détecter directement mais retrouver la trace de sa présence grâce à ses produits de désintégration : le boson de Higgs a un temps de vie très court. Comme dit précédemment, la masse du Higgs a de fortes chances d'être dans la gamme $115\text{-}150 \text{ GeV}/c^2$. Dans cet intervalle de masse, on observe que le processus dominant est $H \rightarrow b\bar{b}$ (cf. Figure 3, graphique de droite). Or, contrairement à d'autres collisionneurs de particules élémentaires comme au LEP, le LHC fait collisionner deux protons composés de quarks et de gluons, ce qui crée un fort bruit de fond de chromodynamique quantique. Or, les b et \bar{b} produits se désintègrent ensuite en jets qui se mélangent au bruit de fond. Ce canal, même s'il est très probable, est donc peu étudié.

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$, bien qu'il présente l'inconvénient d'avoir un rapport d'embranchement très faible, de l'ordre de 0.002, a l'avantage d'avoir une signature très facilement identifiable. A l'état final, on obtient deux photons isolés de très haute énergie et l'on pourrait ainsi remonter à la masse du Higgs.

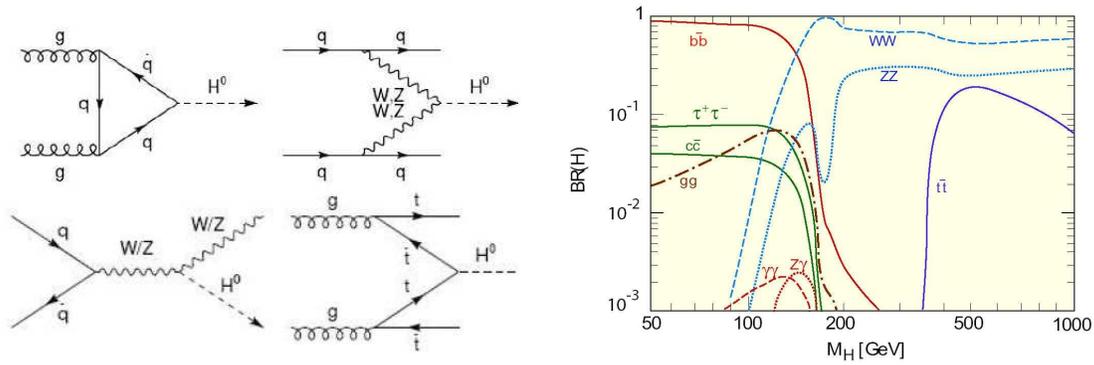


FIGURE 3 – *A gauche : modes de productions du boson de Higgs. A droite : canaux de désintégration du Boson de Higgs en fonction de sa masse*

2.3.3 Le bruit de fond

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ est certes très intéressant, mais, comme tout processus, il existe un bruit de fond empêchant de bien distinguer l'état final. Pour ce processus, le bruit de fond consiste en deux catégories :

- Le bruit de fond réductible* : vient de jets mal identifiés. En améliorant les algorithmes et les techniques de reconstructions, il peut être diminué de plusieurs ordres de grandeurs.
- Le bruit de fond irréductible* : vient de la production directe de paires de photons par l'intermédiaire d'autres processus (cf. Figure 4). Malgré les techniques de réjections, ce bruit de fond reste le principal obstacle à la détection du Higgs car il est très important.

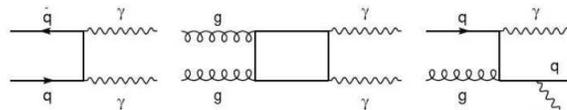


FIGURE 4 – *Bruit de fond irréductible du canal $H \rightarrow \gamma\gamma$*

2.4 Photons convertis et non-convertis

Lors de la désintégration du boson de Higgs en deux photons, ces mêmes photons peuvent soit se désintégrer en une paire électron-positon $\gamma \rightarrow e^-e^+$: ce sont les « photons convertis » soit ne pas se désintégrer : ce sont les « photons non-convertis ». Environ 40% se convertissent en paire d'électrons.

3 Travail réalisé

Dans cette section, nous allons présenter le travail réalisé pendant le stage. L'étude a porté sur les techniques d'identification des photons détectés dans Atlas, et l'optimisation des algorithmes permettant la sélection des photons venant de la désintégration du Higgs. Nous nous sommes penchés sur la technique dite des « coupures », qui consiste à éliminer intelligemment le maximum de bruit de fond tout en conservant le maximum de signal. Pour ce faire, nous avons utilisé une simulation de données réalisée par le logiciel Athéna avec une basse luminosité intégrée de $10fb^{-1}$ et un boson de Higgs de masse $M = 120 \text{ GeV}/c^2$ car nous ne pouvons encore travailler sur des données réelles.

3.1 Sélection des photons venant du Higgs

3.1.1 Pré-sélections

Une fois toutes les données collectées, une première réjection, très générale, est effectuée pour diminuer le nombre d'événements à traiter. Tous les événements ayant une trop basse impulsion $P_T < 25 \text{ GeV}/c$ et une trop basse énergie transverse $E_T < 17 \text{ GeV}$ sont supprimés. De plus, les photons se désintègrent en gerbes électromagnétiques dans le calorimètre : leurs rayons se calculent par $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$, et seules les gerbes ayant un rayon $0.1 < \Delta R < 0.3$ sont conservées.

3.1.2 Variables discriminantes

L'utilisation de variables discriminantes construites autour des données venant du détecteur interne et du calorimètre électromagnétique servent à séparer les vrais photons issus du Higgs de ceux du bruit de fond. La Figure 5 montre la distribution de chacune de ces variables. Six variables sont définies pour les données venant du 1^{er} compartiment du calorimètre électromagnétique :

$\Delta E = E_{2max} - E_{min}$ où E_{2max} est le second maxima d'énergie détecté dans 40 cellules autour d'un maximum d'énergie déposée. E_{min} est la différence entre ces deux maxima.

$\Delta E_{max} = E_{2max}/(1 + 9 \times 10^{-3}E_T)$ où E_T est l'énergie transverse de la gerbe dans le calorimètre électromagnétique.

$F1$: est la fraction d'énergie reconstruite dans le 1^{er} compartiment.

$F_{side} = [E(\pm 3) - E(\pm 1)]/E(\pm 1)$ considère les gerbes étroites restantes ayant un maxima. $E(\pm n)$ est l'énergie déposée dans $\pm n$ cellules autour du maxima.

$W_{eta} = \sqrt{\Sigma E_i \times (i - i_{max})^2 / \Sigma E_i}$ est la largeur de gerbe dans 3 cellules autour de l'énergie déposée maximale. i indique le numéro de la cellule, i_{max} est la cellule de plus haute énergie.

W_{tot} : Même chose que W_{eta} mais on considère 40 pistes autour du maxima d'énergie.

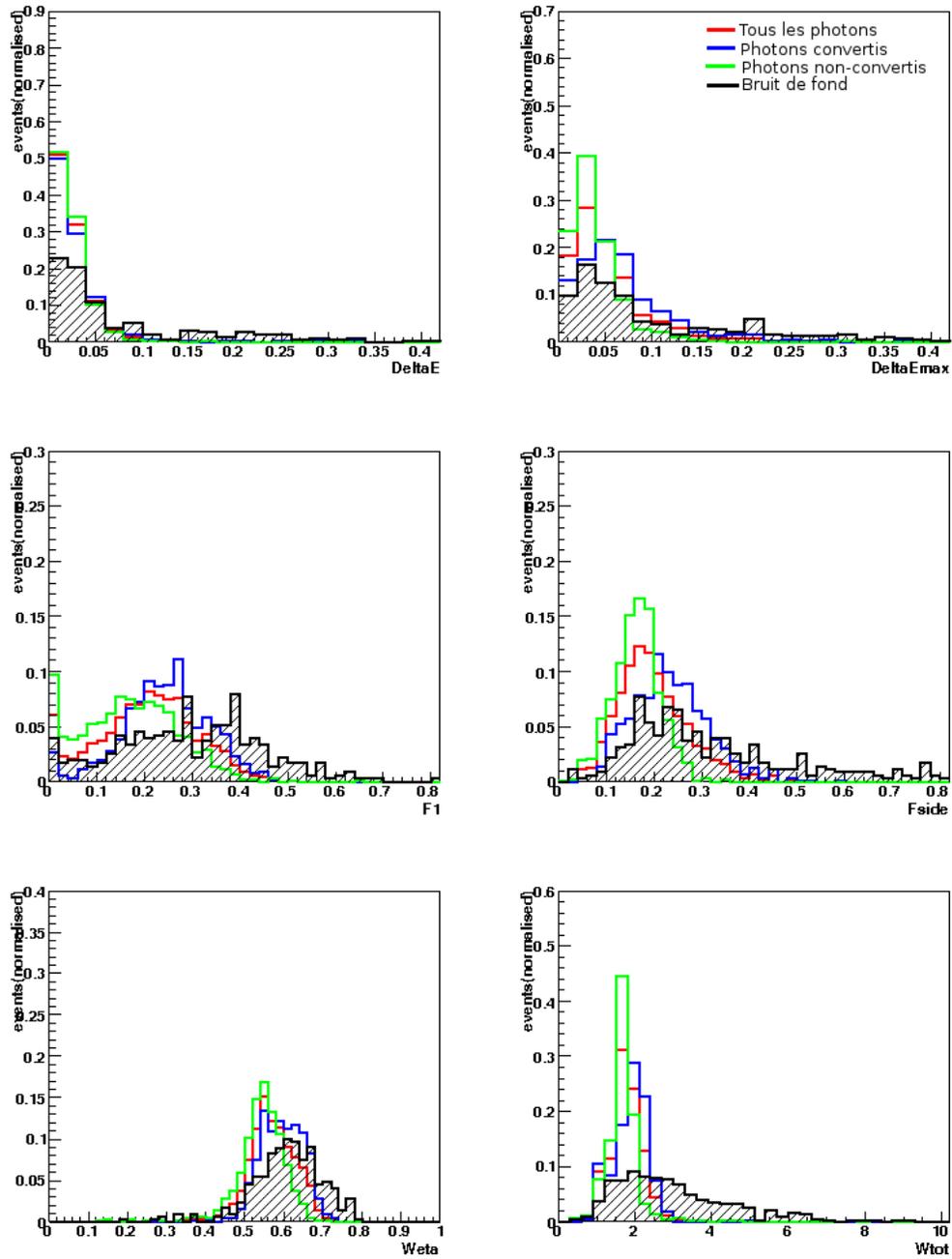


FIGURE 5 – *Distributions des variables discriminantes utilisées pour les photons issus du Higgs.*

3.2 Les sélections appliquées

Une fois ces variables définies, l'étude est faite en fonction de leurs différentes distributions selon des intervalles en énergie transverse E_T et en $|\eta|$. L'énergie est discréditée par pas de 10 GeV et $|\eta|$ en 5 zones comme montré dans l'annexe A. Pour chacune de ces distributions, des « coupures » sont définies de sorte que le maximum de signal soit préservé tout en enlevant le plus de bruit de fond possible.

3.2.1 Coupures standard

Dans le programme Atlas, des coupures dites « standards » ont déjà été définies. Ces coupures sont définies telles qu'elles ne s'appliquent qu'à tous les photons. De plus, il n'y a qu'une seule coupure par distribution, par exemple toutes les entrées au-delà de cette valeur sont supprimées.

3.2.2 Optimisation

Les coupures standard, même si elles sont efficaces, peuvent être améliorées. En faisant la distinction photons convertis/non-convertis, qui ont des distributions sensiblement différentes, les critères de sélection sont un peu plus affinés. De plus, l'introduction d'une double coupure pour chaque distribution (une à gauche et une à droite) permet d'éliminer encore plus de bruit de fond inutile pour une analyse ultérieure. Voir l'annexe A pour un exemple de sélections appliquées.

3.3 L'efficacité du signal et le taux de réjection du bruit de fond

Pour vérifier la validité de notre sélection, le calcul de l'efficacité du signal ε_{sig} et le taux de réjection du bruit de fond R_{bkg} est effectué :

$$\varepsilon_{sig} = \frac{N_{\gamma}^{after-cuts}}{N_{\gamma}^{before-cuts}} \text{ et } R_{bkg} = 1 - \frac{N_{bkg}^{after-cuts}}{N_{bkg}^{before-cuts}}$$

Les sélections appliquées sont valables si l'efficacité du signal est de l'ordre de 85% et si le taux de réjection avoisine les 96%. Les résultats sont les suivant :

	Standard-Tous les γ	Optimisées- γ Converti	Optimisée- γ Non-Converti
ε_{sig}	84,21%	84,48%	88,60%
R_{bkg}	96,81%	96,27%	96,83%

Les coupures optimisées améliorent donc l'efficacité du signal tout en conservant le taux de réjection du bruit de fond par rapport aux coupures standards. Sur la figure 6 est représentée l'efficacité du signal et du bruit de fond en fonction de $|\eta|$ selon les coupures standards et celles optimisées.

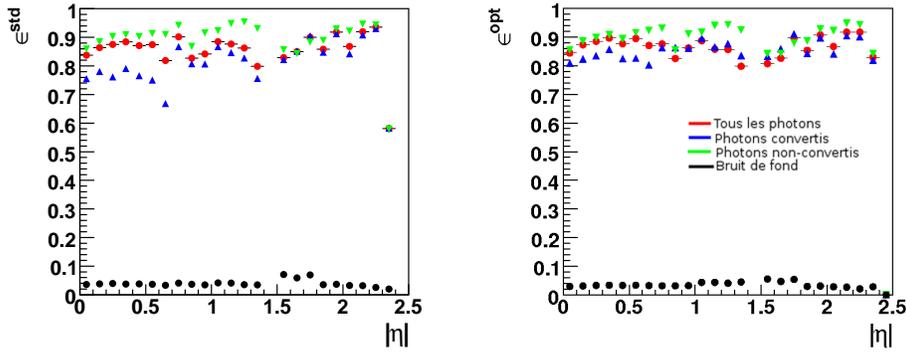


FIGURE 6 – Efficacité des coupures en fonction de $|\eta|$. A gauche : les coupures standards, à droite : les coupures optimisées.

3.4 Comparaison avec d'autres techniques de sélection du photon

La méthode des coupures n'est pas la seule à être utilisée pour tenter de découvrir le boson de Higgs. Le programme TMVA (Toolkit for MultiVariate data Analysis with ROOT), développé pour ce genre d'analyse réunit plusieurs méthodes différentes. La Figure 7 représente la comparaison entre 3 méthodes différentes (selon TMVA) : La méthode des coupures, du maximum de vraisemblance et enfin la méthode de Fisher. L'étude a été faite sur un intervalle $30\text{GeV} < E_T < 40\text{GeV}$. La croix bleue montre la valeur obtenue pendant le stage : elle correspond à l'analyse de TMVA, tout en l'améliorant.

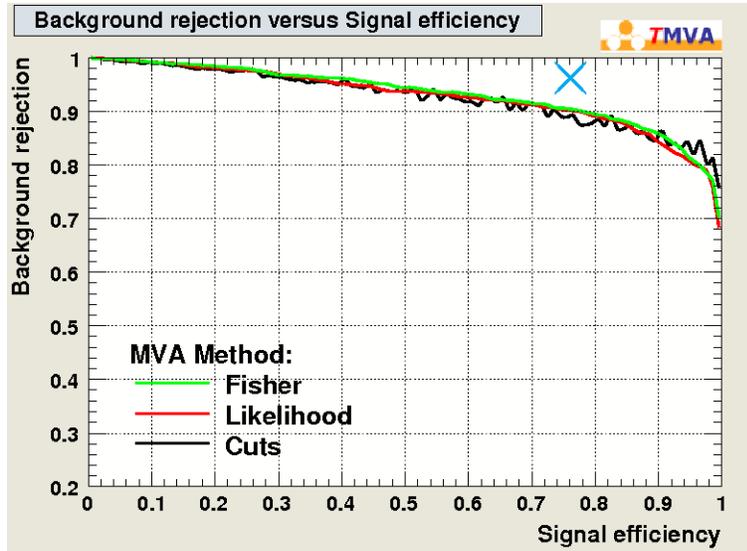


FIGURE 7 – Réjection du bruit de fond en fonction de l'efficacité du signal pour 3 méthodes différentes par le programme TMVA.

4 Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus à la main par rapport aux méthodes automatiques sont meilleurs. Cependant, l'étude pourrait être approfondie en tenant compte des données venant du 2^e et du 3^e compartiment du calorimètre électromagnétique. De plus, la discrétisation faite sur E_T et $|\eta|$ pourrait être plus restrictive. Une étude également intéressante serait une analyse pointue de l'intervalle $0 < |\eta| < 0.7$.

Il faut cependant ne pas oublier que toutes les études menées jusqu'à présent sur le boson de Higgs au LHC n'ont été réalisées que sur des simulations de données. L'analyse des vraies données, qui ne sera possible qu'à partir d'octobre 2009, et la caractérisation du bruit de fond sera un travail hautement important et permettra ensuite d'utiliser les méthodes décrites dans ce rapport.

Durant cette étude, il s'est avéré nécessaire d'utiliser des outils développés pour et par le CERN comme les logiciels ROOT, TMVA ou encore le programme d'analyse de données d'Atlas. Ces outils ne sont pas utilisés par un grand nombre de personnes dans le monde et par conséquent, en comprendre tous les rouages se révèle être un travail fastidieux et complexe. Le moindre changement d'une ligne de commande (écrite en C++) peut se transformer en un vrai casse-tête. Cette partie de l'étude a demandé une grande partie de temps de travail mais s'est révélée néanmoins très intéressante. Cela m'a permis d'avoir une vue très globale du travail typique d'un physicien des particules qui est la voie dans laquelle je souhaite poursuivre mes études.

Je tiens tout particulièrement à remercier ma maîtresse de stage, Nguyet Thi Trinh, pour le temps qu'elle a passé à m'expliquer les rudiments d'un travail de traitement de données en physique des particules. Ses précieux conseils m'ont permis de mieux comprendre le sujet et l'intérêt de l'étude.

Références

- [1] I. Koletsou, *Recherche du boson de Higgs dans le canal diphoton au LHC avec le détecteur ATLAS*, thèse de l'Université Paris XI, LAL, avril 2008.
- [2] T. Ivan Hollins, *SCT Hybrid Testing and the production of direct photons in the ATLAS experiment at the LHC*, thèse de l'Université de Birmingham, novembre 2006.
- [3] M. Escalier, *Recherche expérimentale dans la brisure spontanée de symétrie électrofaible dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ et d'une solution au problème de hiérarchie dans ATLAS. Participation à la préparation de l'électronique du calorimètre électromagnétique*, thèse de l'Université Paris XI, LPNHE, avril 2005.
- [4] *ATLAS Detector and Physics Performance, Technical Design Report, Volume I*, CERN/LHCC 99-14, 25 Mai 1999.
- [5] Sites internet sur le logiciel ROOT du CERN
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/RootBasicTutorial>
<http://root.cern.ch/drupal>
<http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/www/Computing/Offline/ROOT/info/faq.html>
- [6] Site internet pour les outils propres à ATLAS
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/AtlasComputing>
- [7] Site internet du Particle Data Group sur l'algorithme de reconstruction de Monte Carlo
<http://www.pdg.lipi.go/id/2008/reviews/montecarlorpp.pdf>

A Exemple de coupures sur la variable F_{side} pour une énergie comprise entre 30 et 40 GeV

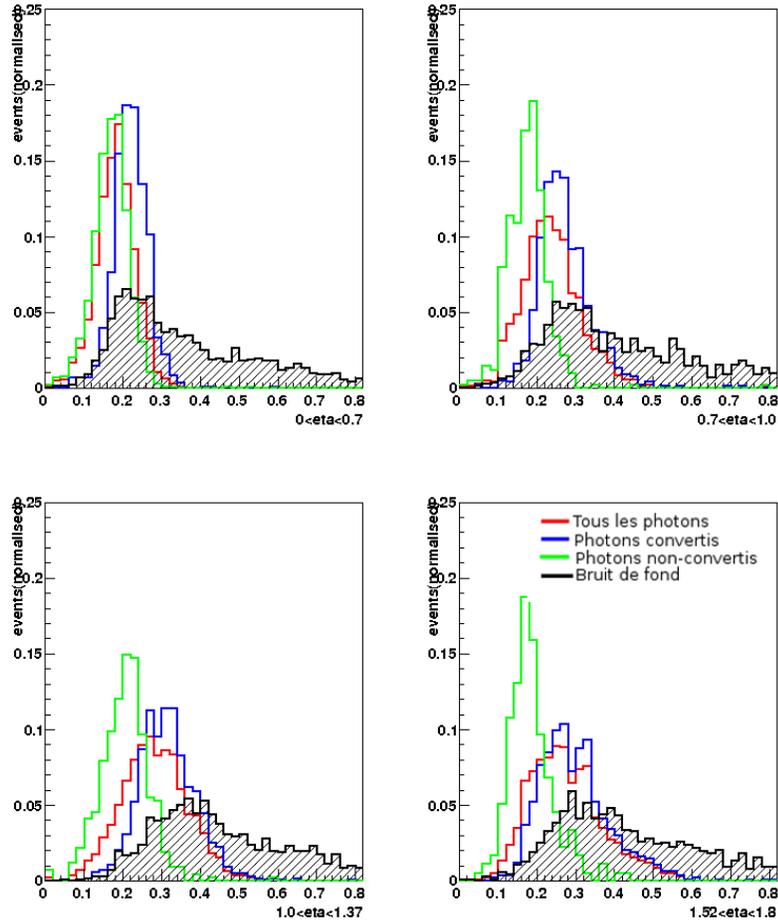


FIGURE 8 – Distribution de F_{side} pour une énergie comprise entre 30 et 40 GeV pour différents intervalles en $|\eta|$.

Intervalle de $ \eta $	$ \eta < 0.7$	$0.7 < \eta < 1.0$	$1.0 < \eta < 1.37$	$1.52 < \eta < 1.8$
Tous les photons	0.255	0.340	0.385	0.45

TABLE 2 – Coupures standard appliquées aux photons

Intervalle de $ \eta $	$ \eta < 0.7$	$0.7 < \eta < 1.0$	$1.0 < \eta < 1.37$	$1.52 < \eta < 1.8$
Convertis-gauche	0.02	0.06	0.08	0.06
Convertis-droite	0.32	0.42	0.48	0.44
Non convertis-gauche	0.0	0.0	0.0	0.0
Non convertis-droite	0.30	0.30	0.36	0.40

TABLE 3 – Nouvelles coupures appliquées aux photons convertis et non convertis