Etude de la recherche du boson de Higgs en deux photons dans l'expérience ATLAS au LHC et calibration du calorimètre à Argon liquide

Jean-François MARCHAND

Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules

Soutenance de thèse

- Le boson de Higgs dans le Modèle Standard
- Le détecteur ATLAS au LHC
- S Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS
- ${\small \odot}$ Recherche du boson de Higgs dans le canal $H\to\gamma\gamma$
 - Reconstruction des photons et impact des conversions
 - $\textbf{O} \ \ \, \text{Analyse} \ \ \, H \to \gamma \gamma \ \, \text{et potentiel de découverte}$

1. Le boson de Higgs dans le Modèle Standard

Particules élémentaires et interactions fondamentales



Le Modèle Standard

• Dans les années 1960 : Physiciens remarquent que la force faible et la force électromagnétique sont de même nature

 \Rightarrow Unification de ces deux forces : Base du Modèle Standard





Le boson de Higgs

• Brout, Englert et Higgs ont proposé une solution

- Juste après le Big Bang : Particules sans masse
- Après refroidissement de l'univers et pour $T < T_c$:
 - Formation d'un "champ de Higgs" et du boson de Higgs qui lui est associé
 - Les particules acquièrent leur masse par interaction avec ce champ



 \rightarrow Plus les particules interagissent avec le champ, plus elles sont massives

 \rightarrow Pas d'interaction avec le champ = pas de masse

MAIS

Le boson de Higgs n'a jamais été observé...

- Difficulté : *m_H* inconnue
 - \rightarrow Rechercher dans la gamme de masse dans laquelle il est censé se trouver
 - \Rightarrow Cette gamme sera explorée par le LHC

Limites expérimentales sur m_H



JF Marchand (LAPP)

2. Le détecteur ATLAS au LHC

La physique au LHC



Le LHC

- Accélérateur de protons
- Circonférence = 27km
- Construit dans le tunnel du LEP au CERN
- $E_{CM} = 14 \text{ TeV}$
- Luminosité nominale : $\mathcal{L}_0 = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Croisement de faisceaux toutes les 25ns

La physique au LHC



La plupart des interactions p-p sont des évènements sans processus "dur"

 \Rightarrow Peu d'intérêt pour les études de processus physiques tels que ${\it H} \rightarrow \gamma \gamma$

 $\sigma(\text{processus} \text{recherchés}) \ll \sigma(\text{collision p-p})$

 \Rightarrow Forte luminosité requise pour produire des évènements rares

- Nécessité du déclenchement
- Bruit d'empilement "pileup"
- → NB interactions / croisement de paquets de protons $N_{\mathcal{L}=\mathcal{L}_0} \approx 20 \ (N = \sigma \mathcal{L} \Delta T)$

• A la luminosité nominale du LHC environ $\begin{cases} 10^9 \text{ collisions p-p / s} \\ 1000 \text{ W / s} \\ 0.5 \text{ H / s} (m_H = 120 \text{ GeV}) \end{cases}$

Les expériences du LHC



4 expériences de physique profiteront des faisceaux du LHC : ALICE, LHCb, CMS et ATLAS

JF Marchand (LAPP)



JF Marchand (LAPP)







1. Description générale :

Calorimètre à échantillonnage

Constitué d'une série de couches :

- de plomb (absorbeur)
- d'argon liquide (miliéu sensible)
 d'électrodes de lecture du signal

Géométrie de type accordéon (herméticité en ϕ)







2. Performances requises :

La physique étudiée au LHC impose des contraintes sur les caractéristiques du calorimètre :

- sur la résolution en énergie : $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.3 \text{GeV}}{E} \oplus 0.7\%$ (*E* en GeV)
- sur la résolution angulaire : Pour des particules pointantes $\frac{50 60 \text{mrad}}{\sqrt{E}}$ (*E* en GeV)

3. Le signal de physique :

Ionisation de l'Ar liquide par les particules de la gerbe EM le traversant

- \rightarrow Courant récolté de forme triangulaire
- $ightarrow {\it I}_{
 m max} \propto {\it Q}_0 \quad \Rightarrow \quad {\it I}_{
 m max} \propto {\it E}_{
 m déposée}$



Pour exploiter les avantages de la calorimétrie à Ar liquide (stabilité et uniformité du signal) et ainsi profiter au mieux des performances du calorimètre :

 \Rightarrow Nécessité de bien contrôler les imperfections et les non-uniformités (au ‰) liées à l'électronique de lecture

 \Rightarrow Nécessité d'un système de calibration de l'électronique de traitement du signal

4. Electronique de traitement du signal :



4. Electronique de traitement du signal :



4. Electronique de traitement du signal :



122 cartes calibration : Injection de signaux de forme connue pour simuler le signal d'ionisation
 1524 cartes FEB : Traitement analogique et digitisation des signaux

Optimisation de la gamme dynamique en énergie



Changements de gain sur les FEB

• Gamme dynamique en énergie couverte par le calorimètre (\approx 50 MeV \rightarrow 3 TeV) nécessite encodage 16 bits : ADC 12 bits – 3 gains



Choix du gain

- Un seul gain est conservé
- Le sélecteur de gain choisi le gain optimal entre HG, MG et BG
- L'échantillon correspondant au pic est digitisé en MG



 \Rightarrow Motivation : optimiser les valeurs de changement de gain canal par canal

- Rester le plus longtemps dans le gain le plus haut = Maximum de précision
- Ne pas saturer

Détermination des seuils

• On regarde d'abord le HG :

On fait varier l'amplitude du signal d'étalonnage (DAC) autour du point de saturation \Rightarrow permet de déterminer la valeur de saturation du signal : DAC_{saturation}

Deux méthodes différentes pour obtenir DAC_{saturation} ont été développées :

- Utilisation de l'ajustement de la rampe ADC vs DAC
 - Pour chaque canal, ajustement linéaire de la rampe (ADC de l'échantillon max. vs DAC)
 - DAC_{saturation} est obtenu par extrapolation de la droite obtenue vers ADC = 4095 $(2^{12} 1)$



Utilisation du RMS

Détermination des seuils

• On regarde d'abord le HG :

On fait varier l'amplitude du signal d'étalonnage (DAC) autour du point de saturation \Rightarrow permet de déterminer la valeur de saturation du signal : DAC_{saturation}

Deux méthodes différentes pour obtenir DAC_{saturation} ont été développées :

- Utilisation de l'ajustement de la rampe ADC vs DAC
- Utilisation du RMS



Détermination des seuils

• On regarde ensuite le MG afin de déterminer la valeur d'ADC correspondant à la saturation



• Les 2 méthodes conduisent à des résultats similaires

• $ADC_{seuil} = min(ADC_{seuil}^{ajustement rampe}, ADC_{seuil}^{RMS}) - marge de sécurité$

ADC_{seuil} et importance de l'étude



• On peut modifier la valeur de changement de gain pour tous les canaux : 1200 au lieu de 1300

Choix optimal = canal par canal

Pour chaque canal : 2 seuils programmables $\rightarrow 2 \times 128 \times 1524 \approx 390\ 000$ seuils !!

Mesures des performances des cartes de calibration



Cartes de calibration

 \rightarrow Permettent l'injection de signaux de forme connue pour simuler le signal d'ionisation \rightarrow Le signal de calibration doit reproduire le signal d'ionisation





$$V(t) = \frac{R_0}{2}(1-f)I_p e^{-t/\tau_{calib}}$$
avec
$$2r_0 \qquad 2L_0$$

$$f = \frac{2r_0}{2r_0 + R_0}$$
 et $\tau_{\exp} = \frac{2r_0}{2R_0 + r_0}$

 \rightarrow Signal de calibration dépend des composants des cartes de calibration \rightarrow Nécessité de les contrôler

Mesures des performances des cartes de calibration

 \rightarrow Pendant les tests des cartes de calibration, plusieurs paramètres sont contrôlés et conservés dans des fichiers



- r₀ = résistance de l'inductance (pour chaque ligne de calibration)
- Uniformité en temps
- Temps caractéristique de décroissance du signal
- Offset de l'amplificateur opérationnel en μV

Objectif principal :

 \rightarrow Synthétiser et péréniser les caractéristiques « intrinsèques » des cartes de calibration obtenues sur banc de test





Dispersion en temps \approx 2ns sur une même carte et pour toutes les cartes

JF Marchand (LAPP)

120 140 Board number

Obtenue en traçant t_{max} en fonction du numéro de canal



Dispersion en temps \approx 2ns sur une même carte et pour toutes les cartes

JF Marchand (LAPP)

Obtenue en traçant t_{max} en fonction du numéro de canal



Dispersion en temps \approx 2ns sur une même carte et pour toutes les cartes

JF Marchand (LAPP)

Obtenue en traçant t_{max} en fonction du numéro de canal



Dispersion en temps \approx 2ns sur une même carte et pour toutes les cartes

Temps caractéristique de décroissance $\tau_{calibration}$

• $\tau_{calib} = temps$ caractéristique de décroissance exponentielle du signal de calibration



Utilisation des paramètres mesurés

- Image "directe" des cartes de calibration
- Permet de vérifier la compréhension fine de la chaîne de lecture



- Permet de suivre les éventuels effets de l'irradiation
- Seront utilisés pour le calcul des coefficients de calibration
- Il est prévu de prendre en compte la **dispersion en temps des canaux** sur une carte de calibration dans le calcul des coeff. de calibration

Paramètres des 122 cartes de calibration insérés dans la DB d'ATLAS, serviront pendant toute la durée de vie du détecteur

JF Marchand	[LAPP]
-------------	--------

4. Recherche du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow \gamma \gamma$

4.1. Reconstruction des photons et impact des conversions

4.2. Analyse $H \rightarrow \gamma \gamma$ et potentiel de découverte

Introduction à la recherche $H \rightarrow \gamma \gamma$

- L'un des objectifs du LHC et de ATLAS est la découverte du boson de Higgs
- $H \rightarrow \gamma \gamma$ est l'un des canaux de découverte les plus prometteurs pour un boson de Higgs du MS dans la région de basse masse (114 < $m_{\rm H}$ < 140 GeV)
- Ce canal a imposé ses caractéristiques au calorimètre EM (avec le canal $H \rightarrow 4e$)



Signal et bruit de fond



JF Marchand (LAPP)

Identification/isolation des photons

Identification et isolation

- Pour réduire le bruit de fond des jets en dessous du bruit de fond irréductible
- Identification utilisant des coupures (sur la forme des gerbes EM)
- \rightarrow Réjection des jets par large gerbes : compartiment milieu et calo. hadronique
- \rightarrow Séparation γ/π^0 : Segmentation fine des strips
 - Isolation (utilisant les traces)

Utilisation des conversions

- Les conversions peuvent être utilisées pour améliorer la réjection γ/π^0
- Utilisation de la variable p/E (avec p = p_{e+} + p_e)



 $(p/E)_{\gamma} pprox 1$ et $(p/E)_{\pi^0} pprox 0.5$ (si pour le π^0 , $E_{\gamma}^1 = E_{\gamma}^2$)





Reconstruction des photons



JF Marchand (LAPP)

Reconstruction des photons



JF Marchand (LAPP)

Correction de l'énergie reconstruite

 $E_{\rm reco} = A(B + W_{PS}E_{PS} + E_1 + E_2 + W_3E_3)$

- Des poids différents sont appliqués pour les photons et les électrons
- Poids des γ convertis = poids des électrons
- Pertes an amont PS pour électrons > photons
- En moyenne, perte d'énergie de 63% pour
 - un électron parcourant X₀
 - un photon parcourant $\frac{9}{7}X_0$



Taux de conversions dans $H \rightarrow \gamma \gamma$



Reconstruction des conversions

• 2 types de photons convertis sont utilisés :

• Conversions à deux traces



 \rightarrow Reconstruites par un algorithme de vertexing utilisant 2 traces de charges opposées

Conversions à une trace

 \rightarrow Une des 2 traces non reconstruite par le détecteur ou échec de vertexing

 \rightarrow Création d'un outil de récupération des conversions à une trace

Electron primaire = 1 hit Electrons de conversion = 0 hit

dans 1^{ère} couche de pixels



 ● Efficacité de reconstruction ≈ 66.4% pour conversions avec R_{conv} < 350mm

Masse invariante $m_{\gamma\gamma}$ et conversions



- Résolution dégradée de qqs % quand on ajoute du pile-up 10^{33} cm⁻²s⁻¹
- Importance des conversions à une trace !
- Décalage en masse dû aux photons convertis
- $\langle m_{\gamma\gamma} \rangle_{\text{photons non-convertis}} > \langle m_{\gamma\gamma} \rangle_{\text{conversions 1 trace}} > \langle m_{\gamma\gamma} \rangle_{\text{conversions 2 traces}}$ pourquoi?

Ouverture de la paire et cluster

Ce que l'on attend

- $\Delta \phi > 0.05$ cluster ne contient pas toute E_{γ}
- $\Delta \phi > 0.1$ cluster ne contient qu'une trace







Ouverture de la paire et cluster

Ce que l'on attend

- $\Delta \phi > 0.05$ cluster ne contient pas toute E_γ
- $\Delta \phi > 0.1$ cluster ne contient qu'une trace





Conversions à 1 ou 2 traces et asymétrie



• La particule la moins énergétique emporte % énergie suffisant pour affecter $E_{cluster}$

 $\langle m_{\gamma\gamma} \rangle_{
m conversions \ 2\ traces} < \langle m_{\gamma\gamma} \rangle_{
m conversions \ 1\ trace}$

• Principalement reconstruites comme conversions à 2 traces

Calibration des photons convertis

Comment récupérer l'énergie de la 2^{ème} trace, perdue pour les conversions asymétriques ?

- La plupart du temps, on ne peut pas retrouver de 2^{ème} objets EM correspondant à la particule la moins énergétique → dû au seuil de pre-clustering (3 GeV dans une fenêtre 5 × 5)
- On peut utiliser l'information issue de la conversion reconstruite :

$$\rightarrow$$
 Si $\Delta \phi > 0.1$: $E_{\gamma} = E_{\text{cluster}} + E_{\text{trace}}$

$$\rightarrow$$
 Sinon : $E_{\gamma} = E_{\text{cluster}}$





Conclusion et perspectives

- Importance des conversions pour $H \to \gamma \gamma$
- Onversions à une trace : ≈ 7% d'évènements reconstruits en plus

ſ						
E I						
E I						
ŀ						
ŀ						
	-	_	_	-		
Pre-	-c	lu	stę	er S d	5	$\times 5$





• Le cluster 3 × 7 utilisé pour les photons convertis ne contient pas les 2 traces pour les conversions très asymétriques

 5×5

- Ajout de l'énergie de la trace permet de corriger la perte d'énergie
- Utiliser 3 × 7+trace, 3 × 11 ? Modifier clustering ?



4. Recherche du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow \gamma \gamma$

4.1. Reconstruction des photons et impact des conversions

4.2. Analyse $H \rightarrow \gamma \gamma$ et potentiel de découverte

Analyse inclusive

- $0 < |\eta| < 1.37$, $1.52 < |\eta| < 2.37$ (motivés par l'identification des photons)
- $p_T^{\gamma_1} > 40$ GeV, $p_T^{\gamma_2} > 25$ GeV (obtenus par des études d'optimisation)



K-facteur appliqué : $K_{\gamma j} = 2.1$ et $K_{jj} = 1.3$

- Différents modes de production du Higgs $(gg \rightarrow H, VBF H, WH, ZH \text{ ou } t\bar{t}H)$
- Analyses dédiées H + 1jet, H + 2 jets , $H + E_T^{miss} + \ell$ ou $H + E_T^{miss}$

Analyse inclusive, H+1,2jets et $H + E_T^{\text{miss}}(+\ell)$ - Résumé



Ajustement du maximum de vraissemblance

Utilise informations discriminantes des propriétés cinématiques et topologiques de $H
ightarrow \gamma \gamma$

Variables de l'ajustement

- $m_{\gamma\gamma}$
- *p*_{T Higgs}
- $|\cos \theta^*|$ où θ^* est l'angle de désintegration du Higgs



Higgs Y

Ajustement du maximum de vraissemblance

Utilisation de catégories

- Séparation des données en sous-populations de propriétés différentes
- Donne une description fine des données Réduit les biais de corrélation
 - \Rightarrow Augmente la précision du modèle de likelihood





Potentiel de découverte

- Signification statistique attendue pour 10 fb⁻¹ de luminosité integrée (dans une fenêtre de masse ±1.4σ autour de m_H)
- Comparaison du comptage d'évènements et du fit combiné



m _H	Simple comptage		Eit combiné
(GeV)	Inclusive	combinée	Fit combine
120	2.6	3.3	3.6
130	2.8	3.5	4.2
140	2.5	3.0	4.0

⇒ Le fit combiné augmente la signification de \approx 40% par rapport à l'analyse inclusive

 \Rightarrow Observation à 3σ devrait être possible avec $<3~{\rm fb}^{-1}$

Incident du 19 septembre 2008

• Avant le 19 septembre 2008 : $\mathcal{O}(1 \text{ fb}^{-1})$ prévus pour la 1^{ère} année de données

• 19 septembre 2009 :

 \rightarrow défaillance causée par une connexion électrique défectueuse entre deux aimants a entraîné des dommages mécaniques et un dégagement de l'hélium en provenance des masses froides des aimants dans le tunnel

 Le 53^{ème} et dernier aimant de rechange descendu dans le tunnel de l'accélérateur le 30 avril 2009

• Redémarrage prévu automne 2009, mais énergie et luminosité limitées

Incident du 19 septembre 2008

- Avant le 19 septembre 2008 : $\mathcal{O}(1 \text{ fb}^{-1})$ prévus pour la 1^{ère} année de données
- 19 septembre 2009 :

 \rightarrow défaillance causée par une connexion électrique défectueuse entre deux aimants a entraîné des dommages mécaniques et un dégagement de l'hélium en provenance des masses froides des aimants dans le tunnel



 Le 53^{ème} et dernier aimant de rechange descendu dans le tunnel de l'accélérateur le 30 avril 2009

• Redémarrage prévu automne 2009, mais énergie et luminosité limitées

Incident du 19 septembre 2008

- Avant le 19 septembre 2008 : $\mathcal{O}(1 \text{ fb}^{-1})$ prévus pour la 1^{ère} année de données
- 19 septembre 2009 :

 \rightarrow défaillance causée par une connexion électrique défectueuse entre deux aimants a entraîné des dommages mécaniques et un dégagement de l'hélium en provenance des masses froides des aimants dans le tunnel



• Le 53^{ème} et dernier aimant de rechange descendu dans le tunnel de l'accélérateur le 30 avril 2009

• Redémarrage prévu automne 2009, mais énergie et luminosité limitées

$1^{\text{ère}}$ année de prise de données - $m_H = 120 \text{ GeV}$

- $1^{\text{ère}}$ année : Luminosité intégrée 200 pb⁻¹ et $\sqrt{s} = 10$ TeV

Signal	120 GeV $\pm 1.4\sigma$
gg fusion	12.1 fb
VBF Higgs	1.5 fb
WH, ZH	0.8 fb
tŦH	0.1 fb
Total	14.5 fb (-43%)

Bruit de fond	120 GeV $\pm 1.4\sigma$
$\gamma\gamma$ irréductible	401 fb
γj réducible	209 fb
<i>jj</i> réducible	29 fb
Total	639 fb (-32%)

• On applique les coupures de l'analyse inclusive $\left\{ \begin{array}{l} |\eta| < 1.37, \quad 1.52 < |\eta| < 2.37 \\ p_T^1 > 40 \text{ GeV and } p_T^2 > 25 \text{ GeV} \end{array} \right.$



Limites d'exclusion, $m_H = 120 \text{ GeV}$

• Méthode de comptage d'évènements basée sur une distribution de Poisson



• Exclusion à 95% C.L. de 6.7 fois le Modèle Standard avec 200pb⁻¹ et 10TeV

• 8.2fb⁻¹ nécessaires pour exclure un boson de Higgs dans le Modèle Standard

La limite observée par DØ est de 13.1 fois le Modèle Standard à 95% C.L. (note DØ)

⇒ ATLAS devrait être compétitif avec Tevatron avec les premières données

JF Marchand	(LAPP)
-------------	--------

Mon travail de thèse s'est orienté selon deux axes principaux

- Travail sur le calorimètre électromagnétique
 - Etudes des performances des cartes de calibration et pérénisation des caractéristiques
 - Optimisation de la gamme dynamique en énergie
- $\bullet\,$ Recherche du boson de Higgs avec le canal $H\to\gamma\gamma$
 - Etudes liées aux conversions de photons
 - \rightarrow Développement d'un outil de récupération des conversions à une trace
 - \rightarrow Effet sur la calibration et sur la reconstruction de $H\rightarrow\gamma\gamma$

• Analyse
$$H \rightarrow \gamma \gamma$$

$$\rightarrow$$
 Avec $\sqrt{s} = 14$ TeV et 10 fb⁻¹

 \rightarrow Et avec la 1 $^{\rm ère}$ année de données