

Synthèse

Grâce à l'interaction étroite entre les découvertes expérimentales et les avancées théoriques, le XXe siècle a vu naître un modèle qui permet de décrire les constituants de la matière et leurs interactions, appelé Modèle Standard (MS) de la physique des particules. Le MS est divisé en trois secteurs : le secteur électrofaible, qui décrit les interactions électromagnétique et faibles, le secteur de la chromodynamique quantique (QCD), qui décrit l'interaction forte et le secteur de Higgs, qui décrit la brisure de la symétrie électrofaible.

Les particules élémentaires qui composent le MS sont regroupées en deux catégories qui diffèrent par leurs spin et leurs propriétés statistiques : les bosons (spin entier) et les fermions (spin demi-entier). Les quarks et les leptons font partie de la catégorie des fermions. Les quarks sont sensibles aux trois interactions fondamentales citées précédemment, tandis que les leptons sont sensibles uniquement à l'interaction faible et, dans le cas des leptons chargés, à l'interaction électromagnétique. Ces quarks et ces leptons sont répartis en trois familles. Par ailleurs, le MS prévoit deux types de bosons : les bosons de jauge et le boson de Higgs. Les bosons de jauge sont les médiateurs des interactions tandis que le boson de Higgs est un scalaire résultant du mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible (mécanisme de Higgs). Les bosons de jauge ont été observés et confirmés expérimentalement. Le boson de Higgs est la seule particule du MS qui n'a pas encore été observée jusqu'à récemment.

Le MS repose en grande partie sur le concept de symétrie et d'invariance, notamment l'invariance de jauge qui génère les interactions. Cette invariance concerne notamment le Lagrangien du modèle, et interdit d'introduire des termes

de masse pour les bosons de jauge. Or on sait aujourd'hui que certains de ces bosons (W et le Z) ont une masse. Le défi consiste donc à générer ces termes de masse dans le Lagrangien en évitant de remettre en cause tout ce bel édifice théorique.

En 1964, François Englert et Robert Brout, Peter Higgs, et Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen et Thomas Kibble ont introduit indépendamment le mécanisme de Higgs. Dans le MS, c'est ce mécanisme qui brise l'interaction électrofaible basée sur le groupe de jauge $SU(2) \times U(1)$ en conférant une masse non nulle à plusieurs de ces bosons de jauge et plus précisément les bosons W et Z alors que le photon reste lui de masse nulle. De façon indirecte le mécanisme de Higgs est également la source de la masse non nulle de tous les fermions qui composent la matière.

Ce mécanisme est la clé de voûte du modèle. C'est pourquoi la recherche du Higgs a été le sujet principal de toutes les expériences à hautes énergies depuis des décennies notamment au LEP (Large Electron Positron collider), au Tevatron et au LHC (Large Hadron Collider). La combinaison de l'ensemble des expériences du LEP donne une limite à 95% de niveau de confiance : $m_H > 114,1 \text{ GeV}$, qui est proche de la limite cinématique qu'on peut atteindre. En effet, malgré les 27 km de circonférence du LEP, la perte de l'énergie du faisceau par rayonnement synchrotron s'élève à 3,5 GeV par tour à $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$, il fallait continuellement injecter de l'énergie dans les faisceaux pour les maintenir. C'est donc la capacité accélératrice qui limite l'énergie de collision et par conséquent la sensibilité pour la recherche du Higgs au LEP. Au Tevatron, qui a terminé ses opérations en septembre 2011 après plus de 10 ans de fonctionnement, avec une luminosité

intégrée de 10fb^{-1} et en combinant les données de CDF et D0, deux régions de masse $100\text{ GeV} < m_H < 103\text{ GeV}$ et $147\text{ GeV} < m_H < 180\text{ GeV}$ ont été exclues à 95% de niveau de confiance et un excès d'événements entre 115 GeV et 135 GeV avec une signification statistique de 3 écarts types a été observé.

Au LHC, la recherche du boson de Higgs est aussi l'objectif principal du programme de recherche. Le LHC, situé dans le même tunnel du LEP, est entré en fonctionnement depuis 2009. Les premières collisions étaient à 2,36 TeV d'énergie dans le centre de masse (\sqrt{s}). Les données de 2010 et 2011 ont été prises à 7 TeV et celles de 2012 à 8 TeV, à comparer avec l'énergie du Tevatron jusqu'à 1,96 TeV. Le LHC est donc le plus puissant accélérateur de particules au monde.

Sur l'anneau du LHC où circulent les paquets de faisceaux contenant des centaines de milliards de protons, il y a quatre expériences principales, ATLAS, CMS, ALICE et LHCb. ATLAS et CMS ont pour objectif d'identifier toutes les particules issues des interactions, et pour cela empilent des couches cylindriques de détecteurs autour de la zone d'interaction. On dit qu'elles sont généralistes. Mais dans chaque expérience, l'accent est mis sur des points différents : ATLAS, grâce à son aimant toroïdal géant, peut mesurer les trajectoires des muons avec une très grande précision; CMS, avec son calorimètre électromagnétique à cristaux, permet d'identifier et de mesurer les électrons et les photons avec une très bonne précision. Les deux autres expériences, ALICE, dédiée à la physique des ions lourds, et LHCb, consacrée à la physique du B , n'ont pas besoin de couvrir tout l'espace autour du point d'interaction.

Cette thèse intitulée "Recherche du boson de Higgs dans le canal $WW^{(*)}$ et mesure du temps de dérive du calorimètre à argon liquide dans l'expérience AT-

LAS” a démarrée en 2009 avant la prise de données de collision proton-proton. Parmi de différents modes de désintégration du Higgs, le canal $WW^{(*)}$ a une meilleure sensibilité dans un grand intervalle de masse entre 130 GeV et 240 GeV puisque son rapport d’embranchement est le plus grand dans cette région. Ensuite l’état final $l\nu l\nu$ avec deux leptons isolés et une grande énergie transverse manquante (E_T^{miss}) représente une signature propre pour supprimer beaucoup de contributions de bruit de fond provenant des processus électrofaibles du MS, et de production de multijets (QCD).

En attendant les données de collision, une mesure du temps de dérive des électrons d’ionisation a été effectuée pour contrôler l’uniformité intrinsèque du calorimètre électromagnétique d’ATLAS. Dans un premier temps, environs 3,5 millions signaux provenant du faisceau splash ont été comparés à la forme du signal prédite en utilisant la méthode FPM (pour First Principle Method). L’ajustement de la forme prédite à celle mesurée permet d’extraire le temps de dérive des électrons d’ionisation de l’argon liquide. Ensuite, 1,2 millions et 9,5 millions signaux provenant des données de collisions spéciales avec 32 échantillons en temps par pulse (par rapport à 5 échantillons en temps par pulse autour du pic dans la prise de données nominale) ont été pris en 2010 et 2011. Ces données ont été analysées de la même façon et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus avec les données du faisceau splash et les données de rayons cosmiques analysées précédemment. L’ensemble de ces données représente des configurations et des topologies complémentaires : la plupart des particules de rayons cosmiques traversent le calorimètre verticalement, les particules du faisceau splash traversent le calorimètre horizontalement et finalement les particules de collision provien-

ment du point d'interaction. Le nombre de particules par événement est aussi très différent entre ces trois lots de données. Par conséquent, des corrections différentes de diaphonie ont été nécessaires pour les différents lots de données. Un effet de "sagging" a été mis en évidence dans les régions de transition et a été attribué au poids du calorimètre. La variation relative maximale sur le temps de dérive est environ 3%, ce qui correspond à une variation de 0.7% sur la mesure d'énergie.

En parallèle, la recherche du boson de Higgs soit du MS soit d'un modèle à quatre familles (MS4) a été effectuée dans le canal $WW^{(*)}$ se désintégrant en $l\nu l\nu$ avec $l = e, \mu$ au fur et à mesure que les données de collision pp s'accumulaient. La production de Higgs dans le MS est dominée par le processus de fusion gluon-gluon. Ce dernier est dominé par un échange du quark top dans une boucle entre les gluons et le Higgs puisque dans le MS, le couplage top-Higgs, étant proportionnel à la masse du top, est le plus grand. Pour la même raison, on peut s'attendre à ce que la section efficace de la production par fusion gluon-gluon soit plus grande que celle du MS en présence d'une quatrième famille ayant des quarks lourds. Autrement dit, la sensibilité de recherche est meilleure pour un MS4 que pour le MS. En effet, avec une partie des données de 2011 (une luminosité intégrée entre $1,1 \text{ fb}^{-1}$ et $4,9 \text{ fb}^{-1}$ selon le canal), une grande plage de masse de Higgs MS4 entre 120 GeV et 600 GeV a été exclue à 95% de niveau de confiance en utilisant les prédictions sur la section efficace et les rapports d'embranchement que nous avons calculés et fournis.

Contrairement aux canaux $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, la présence des neutrinos dans l'état final du canal $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ ne permet pas une reconstruction complète de la masse de Higgs. Seule la masse transverse peut être

mesurée avec une précision limitée. Dans ces conditions, il est important que les bruits de fond des différents processus du MS soient déterminés avec précision. L'un des bruits de fond concerne la production de top. Une méthode originale a été proposée pour mesurer la contribution du bruit de fond dans le canal dominant avec zéro jet. Cette méthode a l'avantage de déterminer à partir des données, la normalisation du top et la probabilité de survie du jet veto. Cette procédure est robuste et est peu sensible aux variations de l'échelle d'énergie et la résolution des jets. Cette méthode a été la méthode de référence depuis le début pour la recherche de Higgs dans le canal $WW^{(*)}$. D'autres analyses dans ATLAS telle que la mesure de la section efficace de production des diboson WW et la recherche de particules supersymétriques ont adopté cette méthode.

Le bruit de fond Drell-Yan $pp \rightarrow Z+\text{jets}$ est une autre contribution importante à la recherche de Higgs dans le canal WW . Cette contribution est actuellement obtenue en extrapolant le nombre d'événements dans le plan $m_{ll} - E_T^{\text{miss}}$, où m_{ll} est la masse invariante de deux leptons, à partir d'une région de contrôle dans laquelle le bruit de fond $Z+\text{jets}$ est dominant. Cette méthode est simple à utiliser mais le résultat n'est pas très stable dans les différentes étapes de la sélection du signal. Le problème est principalement lié à un désaccord sur la distribution de E_T^{miss} entre les données et la simulation. Pour vérifier le résultat de cette méthode, une méthode indépendante est proposée qui utilise les événements $W+\text{jets}$ pour extraire une correction sur la distribution de E_T^{miss} , qui sera par la suite appliquée sur les événements $Z+\text{jets}$. Cette méthode a l'avantage que l'échantillon $W+\text{jets}$ est plus grand que celui de $Z+\text{jets}$. Le résultat, en accord avec celui de l'autre méthode, est plus stable et précis.

L'ensemble des données de 2011 a été analysé, qui, après avoir exigé que tous les composants du détecteur soient entièrement fonctionnels, correspond à une luminosité intégrée de $4,7 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$. Les données utilisées ont été recueillies à l'aide des déclencheurs basés sur un seul muon et un seul électron. Le déclenchement pour un seul muon demande que l'impulsion transverse du muon par rapport à l'axe du faisceau, p_T , dépasse 18 GeV , pour le déclenchement à un électron le seuil varie de 20 GeV à 22 GeV . Les seuils de déclenchement ont été augmentés tout au long pour faire face à l'augmentation de la luminosité instantanée. Pour maximiser la sensibilité de la recherche, en plus de la division en canaux de saveur leptonique (ee , $\mu\mu$ et $e\mu$), pour chaque canal les données sont subdivisées en 3 autres catégories : 0-jet, 1-jet et 2-jets (la catégorie 2-jets comprenant également des multiplicités supérieures). Les jets sont reconstruits en utilisant l'algorithme anti-kt avec le paramètre rayon $R = 0.4$. Seuls les jets avec $P_T > 25 \text{ GeV}$ et $|\eta| < 4.5$ sont retenus, où η est la pseudorapidité du jet.

L'analyse statistique des données utilise une fonction de vraisemblance $L(\mu, \theta)$, conçue comme le produit des termes de probabilité de Poisson dans chaque canal de saveur leptonique et de jet. Un paramètre μ sur l'intensité du signal est introduit pour multiplier le nombre du signal du boson de Higgs attendu dans le MS dans chaque canal. Les prédictions du signal et celles du bruit de fond dépendent des incertitudes systématiques qui sont paramétrées par les paramètres de nuisance θ , qui à leur tour sont contraints à l'aide des fonctions gaussiennes. Les nombres d'événements attendus du signal et du bruit de fond sont des fonctions de θ . La paramétrisation est choisie de telle sorte que les taux de chaque canal soient répartis en log-normale pour une distribution θ normale. Le test

statistique q_μ est alors construit en utilisant le profil de vraisemblance : $q_\mu = -2 \ln \left(\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}_\mu) / \mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta}) \right)$, où $\hat{\mu}$ et $\hat{\theta}$ sont les paramètres qui maximisent la vraisemblance (avec la contrainte $0 \leq \hat{\mu} \leq \mu$), et $\hat{\theta}_\mu$ sont les valeurs de paramètres de nuisance qui maximisent la vraisemblance pour un μ donné. Ce test statistique est utilisé pour calculer la probabilité (p_0) que l'excès obtenu soit dû à une fluctuation de bruit de fond, et les limites d'exclusion suivent la méthode fréquentiste modifiée connue sous le nom CL_s .

L'analyse des données de 2011 ne donne aucun excès significatif d'événements sur le bruit de fond attendu du MS. Une limite supérieure est placée sur la section efficace du Higgs en fonction de sa masse. Un boson de Higgs du MS de masse dans la gamme entre 133 GeV et 261 GeV est exclu à 95% de niveau de confiance, tandis que la plage d'exclusion attendue s'étend de 127 GeV à 233 GeV.

L'analyse de 2012 utilise un ensemble de données recueillies entre le début d'avril à la mi-juin 2012, qui correspond à $5,8 \text{ fb}^{-1}$ de données sur les collisions pp à $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$. La section efficace de production d'un boson de Higgs avec $m_H = 125 \text{ GeV}$ augmente d'environ 30% avec l'augmentation de l'énergie dans le centre de masse du LHC de 7 TeV à 8 TeV. La méthode d'analyse de 2011 est essentiellement inchangée, mais certains critères de sélection ont été modifiés pour faire face à la présence de multiples collisions pp par croisement de faisceau, dénommée "pile-up". Dans les données de 2011, le nombre moyen d'interactions par croisement de faisceau était d'environ 10. En 2012, la moyenne est passée à environ 20. Il en résulte un bruit de fond Drell-Yan beaucoup plus important dans les canaux où les deux leptons ont le même saveur ($ee, \mu\mu$), en raison d'une augmentation du taux de fausse énergie transverse manquante. Puisque l'état final

$e\mu$ fournit la grande majorité de la sensibilité de la recherche, cet état final a été utilisé dans l'analyse. Enfin, des critères d'isolation plus stricts sont appliqués, afin de réduire davantage le bruit de fond $W + \text{jets}$.

Motivée par les recherches de Higgs combinés en 2011, la procédure d'analyse a été modifiée pour cacher la région cinématique où un signal pouvait s'y trouver. Les événements qui passaient la sélection cinématique destinée à isoler un signal à partir d'un boson de Higgs MS avec une masse comprise entre 110 GeV et 140 GeV ont été exclus lors de l'élaboration de l'analyse 2012. Les données dans la région de signal sont examinées, une fois que l'accord entre les données et le modèle des bruits de fond dans les régions de contrôle correspondant aux bruits de fond dominants a été jugé raisonnable.

En combinant les catégories 0-jet, 1-jet et 2-jets, un excès d'événements est observé sur le bruit de fond MS prévu, qui se manifeste par une faible valeur de p_0 observée et un μ ajusté qui s'écarte de zéro. La valeur de p_0 à $m_H = 125$ GeV est de 8×10^{-4} , ce qui correspond à 3,1 écarts types. La signification dépasse trois écarts types pour un signal possible dans l'intervalle de masse de 110 GeV et 130 GeV. La p_0 attendue pour un Higgs avec $m_H = 125$ GeV est de 0,05 ou 1,6 écarts types. L'intensité du signal ajustée est de $1,9 \pm 0,7$ à $m_H = 126$ GeV, masse à laquelle la valeur minimale de p_0 se trouve en combinant avec les autres canaux de recherche d'ATLAS.

Les résultats obtenus avec les données de $5,8 \text{ fb}^{-1}$ à 8 TeV collectées en 2012 sont combinés avec ceux de $4,7 \text{ fb}^{-1}$ à 7 TeV. L'analyse de 7 TeV a donné lieu à une intensité de signal de $\mu = 0,5 \pm 0,6$ à $m_H = 126$ GeV. Les intensités de signal mesurées avec les analyses de 7 TeV et 8 TeV séparément sont compatibles à moins

de 1,5 écarts types.

Pour $m_H \lesssim 150$ GeV, un excès d'événements sur le bruit de fond MS attendu est observé, avec une valeur minimale locale p_0 de 6×10^{-4} à $m_H = 120$ GeV, soit 3,2 écarts types. Une analyse combinée des résultats des données de 2011 et 2012 donne une valeur minimale locale p_0 de 3×10^{-3} à $m_H = 125$ GeV, soit 2,8 écarts types. La meilleure valeur d'intensité de signal obtenue par le fit est de $1,3 \pm 0.5$.

En combinant avec les autres canaux, en particulier $\gamma\gamma$ et $ZZ^{(*)}$, l'excès a augmenté à presque 6 écarts type, la signification permettant la découverte d'une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs. Maintenant il faudra confirmer cette observation, en étudiant d'autres modes de désintégration et en scrutant les propriétés de cette particule. Est-elle comme prévue par le MS? Correspond-elle à une nouvelle physique? Pour établir les propriétés de cette particule, il faudra plus de statistique. Le LHC va prolonger la prise de données en collision pp jusqu'à la fin de l'année 2012. Avec la statistique accumulée jusqu'alors, on apprendra beaucoup plus sur la nature de ce boson.