

L'expérience ATLAS

F. Malek, F. Chevallier (th.), J.-Y. Hostachy, F. Ledroit, A. Lleres, A. Lucotte, J. Morel (th.), B. Trocmé.

ATLAS is a general purpose detector located on the LHC proton-proton collider built at CERN near Geneva (Switzerland). Collisions will be produced at an unprecedentedly high energy of 14 TeV in the center of mass and at a rate two orders of magnitude higher than the current TeVatron performance. First collisions are expected in spring 2007. Since 1992, the LPSC group has taken a major role in the conception and construction of the pre-sampler detector until its completion and assembling in the center calorimeter in 2001. The group has endorsed also a leading role in installation of the cryogenic system that should be completed by the end of 2006. Since 2002, the LPSC group has also been actively involved in the core software development of the description of the LAr calorimeter. Preparing for the first data, the group also carried physics analyses in the search for signs of new physics: direct search for new neutral bosons, which are predicted in numerous theories beyond the Standard Model and precision measurements of top quark production which constitute a powerful probe for new charged Higgs bosons as predicted by supersymmetric models.

◆ Introduction

ATLAS est l'une des deux expériences généralistes auprès du LHC du CERN. Le collisionneur proton-proton produira des collisions à une énergie de 14 TeV dans le centre de masse à des taux 100 fois plus élevés que ceux du TeVatron actuellement en service. Il devrait ainsi permettre de sonder un domaine d'énergie encore inexploré avec une grande précision.

Les activités techniques du groupe ATLAS du LPSC s'échelonnent sur plusieurs années et ont comporté au cours de la période 2004-2005 des implications techniques majeures en découlant. L'équipe du LPSC a ainsi eu en charge la construction et la validation de l'électronique de 48 des 64 secteurs du pré-échantillonneur d'ATLAS, qui se sont achevées durant l'été 2003. Après l'insertion dans les modules du calorimètre électromagnétique central, l'équipe du LPSC a conduit les tests de validation et de suivis. C'est dans ce cadre que s'insèrent les études réalisées sur l'élimination de courts-circuits in situ. Le groupe est également impliqué dans la cryogénie de proximité, sa construction, ses tests et son intégration dans le puits d'ATLAS. Les dernières réalisations en 2005 concernent l'installation des vases d'expansion et des boîtes à vannes, de la cryogénie de proximité pour les calorimètres bouchons et centraux ainsi que celle du système de vide et des lignes rigides. Cette activité devrait s'achever fin 2006.

Dans le domaine logiciel, depuis plus de 5 ans, le groupe de Grenoble est un acteur majeur de la construction du logiciel de l'expérience, en particulier dans celui de la description du calorimètre à argon liquide d'ATLAS. Plusieurs membres du groupe sont ainsi impliqués dans le développement et le maintien des classes de base d'identificateurs des cellules du calorimètre ainsi que celle des tours de trigger du calorimètre. Enfin, dans l'intervalle qui nous sépare des premières collisions du LHC, il est prévu un vaste programme de mesures, ayant pour objectif de se familiariser avec le fonctionnement du détecteur, de valider les procédures de contrôle et d'acquisition, d'opérer un premier étalonnage de la chaîne de lecture, etc. Le groupe du LPSC a pris part à cette campagne dès 2005.

En préparation aux prises de données, le groupe du LPSC s'est également impliqué dans l'analyse physique et a orienté sa contribution vers la recherche de signes de physique au-delà du Modèle standard, par le biais de deux approches distinctes et complémentaires.

La première concerne la recherche directe de nouvelles particules: les nouveaux bosons neutres. Les théories au-delà du MS mettent en jeu soit une extension du groupe de symétrie interne – ce sont les modèles basés sur les théories des cordes ou sur la restauration de la symétrie droite/gauche – soit une extension du groupe de symétrie externe – par le biais de modèles à dimensions supplémentaires d'espace-temps. Ces modèles ont en commun de prédire l'existence de nouveaux bosons de jauge neutres supplémentaires, appelés Z' , dont les propriétés, fixées par la structure du groupe de symétrie sous-jacent, dépendent du modèle considéré. Le groupe du LPSC se propose ainsi, au-delà de la détection d'un boson Z' , d'en identifier l'origine par le développement d'analyses discriminantes.

La seconde approche repose sur la mesure précise d'observables bien connues dans le cadre du MS, et dont toute déviation peut être interprétée comme le signe de nouvelle physique. Le groupe du LPSC s'est impliqué dans la mesure de sections efficaces de production du quark top: avec plus de 8 millions de paires de top produi-

tes par an, et plus de 2 millions de quarks top en singlet, la physique du top bénéficie d'une statistique adéquate pour les mesures précises. Ces observables sont sensibles à la présence des bosons de Higgs chargés prédits par exemple dans toute extension supersymétrique du MS. Ces mesures devraient constituer un des canaux privilégiés de découverte d'un boson de Higgs chargé.

◆ Contributions techniques

Suivi et élimination des courts-circuits du pré-échantillonneur

Ce travail a été mené conjointement par le LPSC et un certain nombre de membres du Groupement de Recherche International (GDRI) « calorimétrie électromagnétique à argon liquide d'ATLAS ». Il a eu pour but de mettre au point une technique pour éliminer d'éventuels courts-circuits dans le pré-échantillonneur central d'ATLAS. Il est à noter que la technique est encore en cours de test afin de voir si elle pourrait être adaptée et généralisée au reste du calorimètre électromagnétique.

La méthode utilisée consiste à décharger brusquement de gros condensateurs HT à travers le système haute tension des modules du pré-échantillonneur, permettant ainsi soit de détruire un morceau de piste gravé sur nos anodes (servant donc de « fusible »), soit de « brûler la poussière » à l'origine du court-circuit. Cette technique est possible malgré la présence de câbles résistifs jouant un rôle d'isolation thermique dans le cryostat et malgré la très basse température (89 K) due à la présence de l'argon liquide servant de milieu actif dans le détecteur. La figure 1 représente le dispositif expérimental utilisé pour le test d'un prototype. Cette technique a déjà été testée avec succès sur un secteur du pré-échantillonneur installé dans le cryostat du test combiné au CERN ainsi que sur un secteur du pré-échantillonneur du futur détecteur ATLAS. Elle devrait être appliquée si cela s'avère nécessaire dès le début de l'année 2006, après le remplissage du tonneau électromagnétique par de l'argon liquide et pouvoir ainsi assurer un volume de détection correspondant à presque la quasi totalité du pré-échantillonneur. Ce travail a fait l'objet d'une note ATLAS [1].

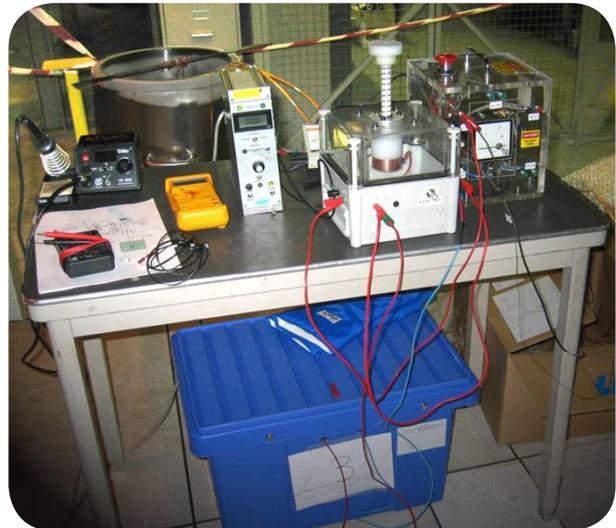


Figure 1 : Dispositif expérimental pour l'élimination d'éventuels courts-circuits dans le pré-échantillonneur d'ATLAS. Le dewar rempli d'argon liquide derrière la table contient un module du pré-échantillonneur. Par mesure de sécurité, les condensateurs HT ont été placés dans la boîte isolante bleue.

Commissioning du calorimètre d'ATLAS

Après plusieurs mois de tests en surface, le tonneau du calorimètre électromagnétique d'Atlas, composé du calorimètre lui-même et du pré-échantillonneur, a été déplacé vers le hall expérimental souterrain à l'automne 2004. Au printemps 2005, a commencé l'installation des différentes cartes d'acquisition et de contrôle, situées aussi bien dans le voisinage proche du détecteur que dans les salles de comptage ; cette phase d'installation – et de test – devrait s'achever au printemps 2006, autorisant ainsi la première prise de données dans une configuration très proche de la configuration finale. Dans l'intervalle qui nous sépare des premières collisions du LHC, il est prévu un vaste programme de mesures, ayant pour objectif de se familiariser avec le fonctionnement du détecteur, de valider les procédures de contrôle et d'acquisition, d'opérer une première calibration de la chaîne de lecture, de procéder un alignement grossier en temps des différents canaux...

Pour atteindre cet objectif, il est notamment prévu d'utiliser les muons issus de rayons cosmiques qui parviennent jusqu'au détecteur ; étant donné leur très faible dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique, un déclenchement spécifique basé sur le signal déposé dans le calorimètre à tuiles scintillantes a dû être mis en place ; un tel système a été validé au cours d'une première campagne de mesures impliquant le seul calorimètre à tuiles au cours de l'été 2005. L'analyse de ces données, à laquelle nous avons participé, a permis de vérifier l'intérêt d'une telle configuration ; il a notamment été mesuré un taux de déclenchements suffisamment élevé (de l'ordre de quelques hertz) pour nos objectifs, un taux de déclenchements fortuits sous contrôle, une résolution en temps de l'ordre de la nanoseconde... Tous ces éléments nous confortent dans le grand intérêt d'exploiter au maximum les prises de données cosmiques. Cela passe notamment par un effort important dans

la mise en place des procédures de contrôle en temps réel de la qualité des données, tâche dans laquelle nous sommes également impliqués.

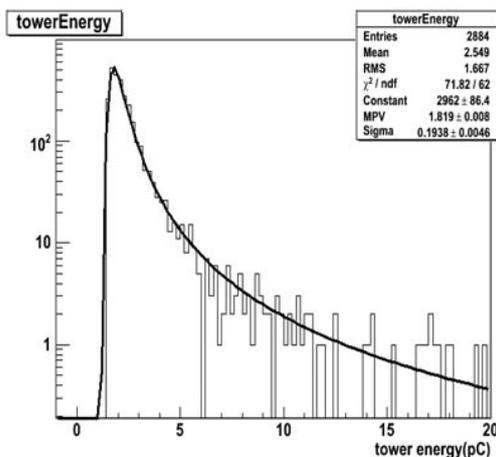


Figure 2 : Distribution de l'énergie déposée par un muon dans le calorimètre à tuiles.

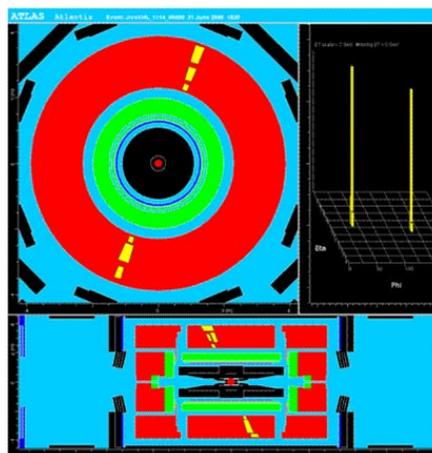


Figure 3 : Muon cosmique traversant les tuiles du calorimètre d'ATLAS.

Développement du logiciel d'analyse

Le groupe du LPSC est impliqué dans la programmation du logiciel du calorimètre à argon liquide d'ATLAS. Cette activité a reçu le renfort d'un nouveau membre en 2004.

Le groupe assure le développement et le maintien des identificateurs des cellules du calorimètre. Cette classe de base assure l'accès à la description géométrique des cellules individuelles du détecteur définie en termes d'échantillonnage, de localisation (η, ϕ)..., ainsi qu'à leur description « hardware » définie en termes de numéro de canal de lecture, de carte électronique, de câblage, etc. Elle permet d'assurer la navigation d'une description à l'autre. Le groupe a également endossé la responsabilité du codage des informations concernant les hautes tensions alimentant les cellules, en rattachant cette description aux deux précédemment évoquées. Il est à noter que ces descriptions ont été abondamment utilisées au cours de la période de faisceau-tests des calorimètres centraux et bouchon, et validées à partir des données enregistrées à cette occasion. Elles ont permis, notamment dans le calorimètre central, d'établir les cartes de corrections dues aux variations de tension d'alimentation influant sur la réponse des cellules individuelles.

Le groupe a également endossé la responsabilité de la simulation des tours de déclenchement de premier niveau. À ce stade, les signaux des cellules individuelles sont en effet regroupés en « tours » qui contiennent la somme analogique des signaux individuels sommés par étage (échantillonnage) et sommés sur toute la profondeur du calorimètre. Le bruit électronique a été simulé, et les termes d'échantillonnage ont été déterminés à l'aide de simulations.

♦ Activités d'analyse physique

Recherche de nouveaux bosons de jauge neutres

De nombreux modèles au-delà du Modèle Standard (MS) prédisent l'existence de nouveaux bosons de jauge, ou de nouveaux états de bosons de jauge connus. Nous nous intéressons au cas des bosons neutres, dans le cadre de deux grandes familles de modèles : ceux dans lesquels le groupe de jauge $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ du MS est étendu, et ceux qui proposent d'incorporer un nombre de dimensions d'espace-temps supérieur à quatre, qu'on appelle modèles avec des dimensions supplémentaires. On appelle Z' l'état propre de masse du plus léger nouveau boson neutre dans les premiers modèles, et le premier état des excitations dites de Kaluza-Klein (KK) des bosons neutres du MS dans les seconds. Aucun Z' n'ayant encore été observé, ni directement ni indirectement, nous avons des limites inférieures sur leur masse, qui sont de l'ordre de 600 à 800 GeV dans le cas des modèles avec groupe de jauge étendu, et environ 4 TeV dans le cas des dimensions supplémentaires. Avec ses 14 TeV d'énergie disponibles dans le centre de masse, le LHC ouvrira largement la fenêtre de découverte de ces bosons.

Le groupe de Grenoble est impliqué dans la préparation de cette analyse depuis fin 2003. Nous avons tout d'abord étudié différents modèles avec une première étudiante préparant un Diplom Arbeit : plusieurs configurations résultant de la brisure du groupe E6 en un $SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)'$ effectif, un modèle symétrique droite-gauche, et un

modèle à une dimension supplémentaire petite, de type ADD. Nous avons choisi le canal $Z' \rightarrow e+e-$ (Figure 4) qui sera le mieux mesuré avec ATLAS. Des études antérieures [2] ayant déjà montré la capacité de découverte de

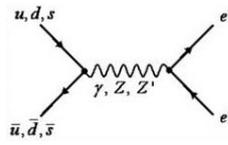


Figure 4: Graphe de production d'un boson Z' dans le cadre de modélisations aux symétries de jauge étendue (voir texte). Seul l'état final en électron-positron est ici considéré.

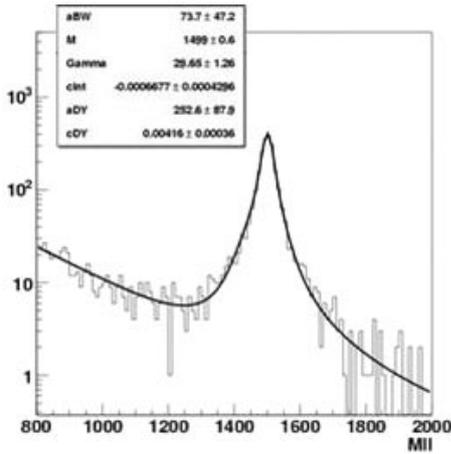


Figure 5: Masse invariante $M(ll)$ et ajustement de la largeur, de la masse et du fond.

ce canal jusqu'à une masse d'au moins 5 TeV, nous avons supposé la découverte d'un Z' et nous nous sommes intéressés à la détermination du modèle sous-jacent. A cette fin, plusieurs variables discriminantes ont été proposées telles que la largeur totale du Z' , sa section efficace, et surtout son asymétrie avant-arrière. L'ajustement de la résonance (Figure 5) et la détermination de la largeur et de la section efficace ont été mis au point en 2004 et validés en simulation complète pour deux valeurs de la masse du Z' : 1,5 et 4 TeV.

En 2005, notre activité s'est intensifiée grâce à l'arrivée d'un second chercheur permanent et d'un étudiant de Master. Nous avons mis au point la détermination de l'asymétrie avant-arrière et publié une note ATLAS sur l'ensemble de nos résultats en simulation complète [3]. Ces travaux ont également donné lieu à une présentation à la conférence EPS 2005 [4]. Nous avons ensuite ajouté l'ajustement d'une observable supplémentaire, la rapidité du Z' , à la liste des outils permettant la discrimination des modèles.

Sa robustesse vis-à-vis de l'incertitude entachant les fonctions de structure du proton est actuellement en cours d'étude. Nous avons également introduit une nouvelle paramétrisation, dite CDDT du nom de ses auteurs [5], des modèles de Z' résultant de modèles à groupe de jauge étendu. Ceci permet la généralisation des limites en masse qui sont extraites des analyses du TeVatron et des prédictions de découverte au LHC. Enfin, suite à une collaboration initiée au sein du GDR-SUSY, nous avons commencé à simuler un second modèle de dimensions supplémentaires, de type RS, qui nous permet également d'avoir une vue un peu moins restrictive des possibilités des modèles avec excitations de KK [6][7].

Mesure de sections efficaces de production du quark top

Depuis la découverte du quark top à Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF une campagne de mesure s'est ouverte afin de déterminer ses propriétés : sa masse, sa largeur, son spin, sa charge électrique, ou encore son couplage aux fermions et bosons du modèle font l'objet de nombreuses recherches auprès du TeVatron. Cependant, en raison de sa masse élevée, la production d'événements comprenant un ou plusieurs quark(s) top est de faible probabilité, limitant la précision de la plupart de ces mesures. Avec plus de 8 millions de paires de quarks top et plus de 2 millions de quarks top en singlet produits au cours d'une année à basse luminosité, le LHC ouvre une nouvelle ère de mesures de précision. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC depuis 2004, avec la contribution de deux chercheurs permanents et d'un étudiant en thèse, partagé avec le groupe DØ du LPSC.

La mesure de la section efficace de la production de quark top en singlet constitue un test précis du modèle des interactions électrofaibles : dépendant du couplage du quark top aux particules connues, la mesure du taux d'événements et sa comparaison aux prédictions permet de confirmer la validité du modèle utilisé.

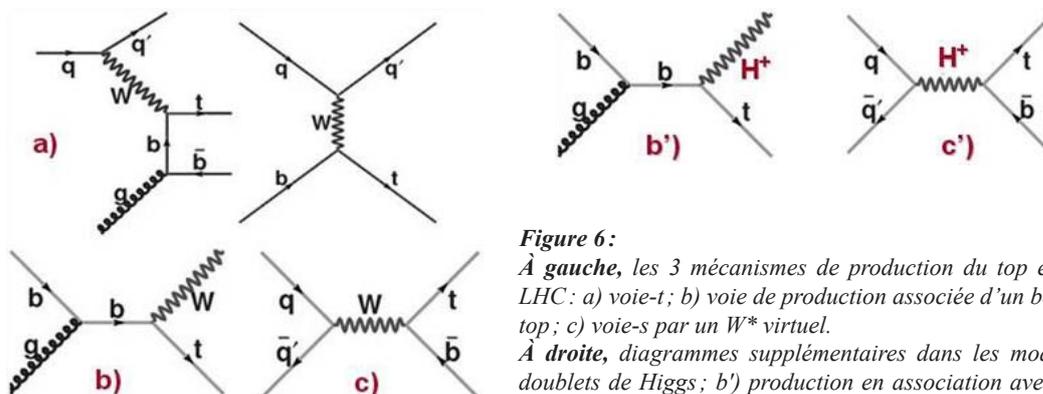


Figure 6:

À gauche, les 3 mécanismes de production du top en singlet au LHC: a) voie-t; b) voie de production associée d'un boson W et du top; c) voie-s par un W^* virtuel.

À droite, diagrammes supplémentaires dans les modèles à deux doublets de Higgs; b') production en association avec un top; c') production par voie-s.

Dans le Modèle Standard, il existe ainsi 3 mécanismes de production du top en singlet, représentés par les diagrammes de la figure 6 (à gauche). Le nombre d'évènements attendus dans les canaux décelables, avec une désintégration en muon ou électron du W, est typiquement de 500 000 dans la voie-t, 180 000 dans la voie W+t et 20 000 dans la voie-s pour une année à basse luminosité i.e. : 10 fb^{-1} . Tout écart dans le taux d'évènements détectés avec les valeurs prédites peut être interprété comme le signe de couplages anormaux du quark top avec les particules en lesquelles il se désintègre, ou comme le signe de présence de nouveaux mécanismes de production. Ainsi, dans le cadre super-symétrique de modèles à deux doublets de Higgs (2HDM) auxquels le groupe du LPSC s'est intéressé, le boson chargé H^\pm ajoute une nouvelle source de production de quark top, représentée figure 6 (à droite).

Les trois mécanismes de production du quark top en singlet, d'états finaux très différents, ont été étudiés à l'aide d'analyses spécifiques développées au LPSC. Ces études ont abouti à la détermination de la sensibilité statistique attendue au cours des 3 premières années du LHC pour une luminosité de 30 fb^{-1} . Celle-ci est de l'ordre de 1,5% pour la voie-t, 4% pour la voie W+t et environ 10% pour la voie-s, performance se traduisant par une détermination de $|V_{tb}|$ au niveau de quelques pour cents. Ces études ont également montré que toutes ces mesures seront dominées par les incertitudes systématiques affectant la procédure de sélection : expérimentalement, les principaux biais proviennent de la méconnaissance de l'échelle d'énergie des jets, de l'efficacité d'étiquetage des jets de b et du taux de mauvaise identification des jets de quarks légers, ainsi que du paramétrage des effets de radiations de gluons des partons initiaux ou finaux, pour un total de 8-10%. L'estimation des fonds est particulièrement complexe et repose sur l'usage de simulations dont les prédictions théoriques sont aujourd'hui non fermement établies, induisant une incertitude de 5% à 10% selon les processus en jeu.

Parmi les trois canaux traités au LPSC, nous nous sommes par la suite concentrés sur la détermination de la voie-s, qui est une des plus sensibles à l'existence de nouveaux bosons chargés. L'analyse développée pour la sélection des évènements contenant un quark top a alors été appliquée sur des échantillons simulant la production du même état final par le biais d'un Higgs chargé. Le nombre d'évènements sélectionnés permet alors de déterminer l'excès attendu par rapport au taux prédit dans le cadre sans Higgs, et d'interpréter les mesures dans le cadre d'un modèle 2HDM.

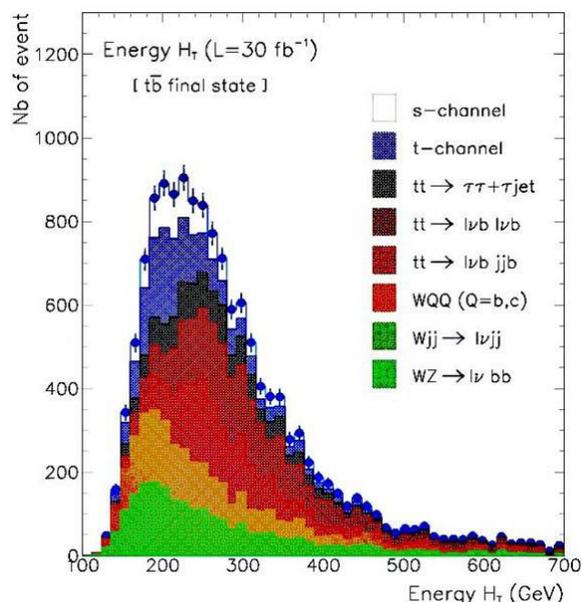


Figure 7: Distribution de l'énergie totale attendue, en nombre d'évènements, pour le signal (voie-s) et les principaux fonds pour une luminosité intégrée de 30 fb^{-1} .

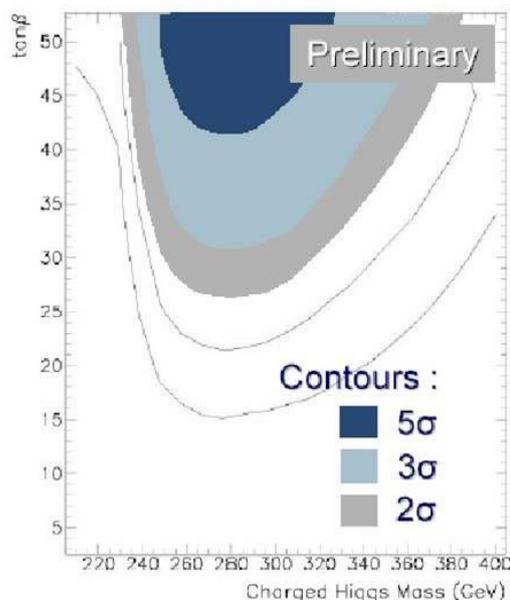


Figure 8: Contours de découverte, de mise en évidence (à 3σ) ou d'exclusion (à 95%) dans le plan $(m_{H^\pm}, \tan\beta)$ pour une luminosité de 30 fb^{-1} .

Cette étude a donné lieu à un rapport de soutenance de MASTER 2 et à la publication de deux notes internes ATLAS [8]. Elle se poursuit aujourd'hui par le développement d'une méthode de vraisemblance dont le but est de purifier le lot final afin de réduire l'importance des incertitudes systématiques. Par ailleurs, le groupe du LPSC est responsable de la production officielle ATLAS des échantillons générés, simulés et reconstruits des évènements de quarks top produits en singlet.

Après une étude détaillée des contributions des fonds au signal, montrés sur la figure 7 et des erreurs systématiques, l'interprétation des mesures a été faite en termes de présence d'un boson de Higgs chargé, prédits par

les modèles 2HDM de type II. Les résultats en termes de sensibilité statistiques sont indiqués sur la figure 8. Ils concluent à la possibilité de démontrer l'existence d'un boson de Higgs H^\pm dans une gamme de masse 200-300 GeV/c² et pour des valeurs élevées de $\tan\beta$, où $\tan\beta$ est le rapport des valeurs moyennes attendues dans le vide des deux champs de Higgs du modèle.

Ces études ont fait l'objet de présentations régulières au cours des réunions du groupe Top d'ATLAS, d'une présentation au workshop ATLAS général de juin 2005, ainsi que de deux présentations au sein de l'atelier international TEV4LHC [9], qui réunit les physiciens des collaborations du Tevatron (DØ et CDF) et du LHC (ATLAS, DØ) travaillant sur les sujets voisins. Ces travaux doivent aboutir à la rédaction d'un rapport général dont le groupe sera responsable pour la section « production de quark top en singlet au LHC ». Enfin, ces travaux ont conduit à une présentation au nom d'ATLAS sur les perspectives de physique du quark top à la conférence *Hadron Collider Physics 2005* [10].

◆ Conclusion

La phase de construction du détecteur ATLAS est maintenant achevée et la phase d'installation et de validation des ensembles de détection comme de la chaîne d'acquisition et de lecture se met en place. Après avoir joué un rôle majeur dans la conception, la construction et l'installation du pré-échantillonneur et de son électronique de lecture, l'équipe du LPSC en assure encore un suivi très actif. Les implications du laboratoire dans l'installation de la cryogénie de proximité devraient s'achever fin 2006. A l'approche des premières collisions, le groupe du LPSC a orienté ses implications techniques vers une participation aux tests de validation dans le cadre du commissioning du calorimètre et de sa chaîne de lecture. Le groupe continue à accroître son implication dans la programmation et le suivi du logiciel du calorimètre au cours de cette période de validation de l'ensemble du détecteur.

Dans le cadre de la préparation aux analyses physiques, deux thématiques ont été définies et ont permis de coordonner les forces du groupe. Ces deux approches visent la mise en évidence de la nouvelle physique à partir d'approches complémentaires : la recherche de résonances correspondant à la désintégration de bosons neutres lourds, qui devraient faire l'objet des premières analyses ; la mesure précise de production de quarks top, qui pourrait constituer un moyen de mettre en évidence un boson de Higgs chargé dès les premières années de fonctionnement.

[1] J.-Y. Hostachy, B. Belhorma, B. Lund-Jensen, M. Yamouni, ATL-LARG-INT-2005-001.

[2] ATLAS Detector and Physics Performance TDR, CERN/LHCC/99-15.

[3] M. Schäfer, F. Ledroit et B. Trocmé, ATL-PHYS-PUB-2005-010.

[4] B. Trocmé, European Physics Society 2005, Lisbonne 21-27 Juillet (Portugal).

[5] M. Carena, A. Daleo, B. Dobrescu et T. Tait, Phys. Rev. D70 (2004) 093009.

[6] G. Moreau et J. Silva-Marcos, hep-ph/0507145.

[7] F. Ledroit, B. Trocmé, auteurs de la section *Recherche de Z'*, rapport *TeV4LHC*, en cours de publication.

[8] A. Lucotte, ATL-PHYS-CONF-2006-002, F. Chevallier et A. Lucotte, ATL-PHYS-COM-2006-003.

[9] A. Lucotte, TEV4LHC, CERN 28-30 avril 2005 (Suisse). F. Chevallier, TEV4LHC, Fermilab, 20-22 octobre 2005 (USA). Rapport TEV4LHC en cours de publication.

[10] Conférence *Hadron Collider Physics 2005, Top Physics Prospects*, A. Lucotte, 4-9 juillet 2005, Les Diablerets (Suisse).