

L'expérience ATLAS

J. Collot, M.-L. Gallin-Martel, F. Guillon-Ledroit, J.-Y. Hostachy, P. Martin, F. Ohlsson-Malek, S. Saboumazrag, S. Viret, M. Wielers

ATLAS is one of the four LHC experiments, built to make precise measurement of the Standard Model parameters and discover, if any, the Higgs particle. It is also devoted to discover the bunch of exotic particles as predicted by the models beyond the Standard one, for example the SUSY particles. This experiment is actually under assembly as many of the sub-detectors are ready or approaching the end of the construction. The LPSC has participated in the construction, assembly and tests of the pre-sampler, one element of the electromagnetic calorimeter. This element is composed of 64 sectors and about 2/3 of them were built in the laboratory. Among the other activities of the group are the important involvement in the design and development of the offline software system, the preparation of the Data-challenge and the Data-Grid, the involvement in the Test Beam analyses and the physics studies, for example the radiative B decays and the CP violation.

Introduction

ATLAS est l'une des deux expériences généralistes du LHC, le plus grand futur collisionneur hadronique p-p. L'énergie dans le centre de masse des 2 protons en collision sera de 14 TeV ouvrant ainsi un domaine d'énergie encore inexploré. ATLAS ainsi que CMS (la seconde expérience généraliste) espèrent découvrir et mesurer le boson du Higgs. Hormis la recherche du Higgs, ATLAS va sonder le Modèle Standard, explorer les potentialités des modèles au delà du Modèle Standard (super-symétrie, dimensions supplémentaires, ...) et faire des mesures de précision dans le secteur du B, du Top et de la QCD. ATLAS démarra avec une luminosité dite « basse » ($L = 2 \cdot 10^{33} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) où le taux d'empilement est de 4,6 événements « minimum bias » par croisement de faisceau. Dans ces conditions, la physique du B peut se faire de manière « raisonnable » car la pollution est minimale. Étudier la physique du B implique la possibilité de comprendre, entre autres, la violation CP et les désintégrations rares.

Hormis l'étude des canaux en or tels que $B_d \rightarrow J/\Psi K_s$ et $B_s \rightarrow J/\Psi \emptyset$, étude très compétitive avec celle de LHCb par exemple où des mesures de l'angle β du triangle d'unitarité et des temps de vie des mésons B_s et leurs oscillations peuvent être obtenus avec une grande précision, ATLAS peut aussi explorer d'autres canaux comme ceux que nous avons étudiés : $B_{(s,d)} \rightarrow J/\Psi \eta(\gamma\gamma)$ et $B_d \rightarrow J/\Psi K^{*0}(K_s \pi^0)$. Nous nous sommes intéressés à ces canaux parce que les désintégrations en particules neutres (γ, π^0) font intervenir nos travaux concernant la calorimétrie électromagnétique et les études des performances de ce sous-détecteur.

Les désintégrations radiatives font intervenir des diagrammes du type $b \rightarrow \gamma s$, ce qui induit un changement de saveur par courant neutre, interdit par le Modèle Standard. Ce type de désintégration est toutefois possible dans le cadre du Modèle Standard avec des diagrammes d'ordre supérieur : les diagrammes « pingouins ». Ces désintégrations rares étant aux frontières du Modèle Standard, leur observation prend une importance toute particulière. Elles constituent en effet un test des processus QCD et de la violation de CP très sensible à une nouvelle physique. Il paraît donc intéressant de tester le potentiel d'ATLAS dans ce secteur de la physique du B. Nous avons, en particulier, étudié les canaux très prometteurs tels que $B_d \rightarrow K^{*0} \gamma$ et $B_s \rightarrow \emptyset \gamma$. De même, ces canaux ont été choisis parce qu'ils contribuent à mettre en valeur nos travaux dans le domaine de la calorimétrie.

L'équipe ATLAS du LPSC a eu en charge la construction et les tests électroniques d'environ 2/3 des secteurs du pré-échantillonneur. Un banc de tests a été construit localement au laboratoire à cet effet. Certains de ces secteurs partent au CERN pour être testés sur

faisceau en commun avec un des modules du calorimètre électromagnétique. La construction en série des secteurs a débuté en fin d'année 2000 et s'est poursuivie jusqu'à l'achèvement de la construction c'est-à-dire fin 2003. Ces sous-détecteurs ont été insérés dans les modules du calorimètre électromagnétique et les tests de cet ensemble ont démarré. L'assemblage des détecteurs dans la caverne ATLAS va débiter cette année et se poursuivra jusqu'à mi-2006.

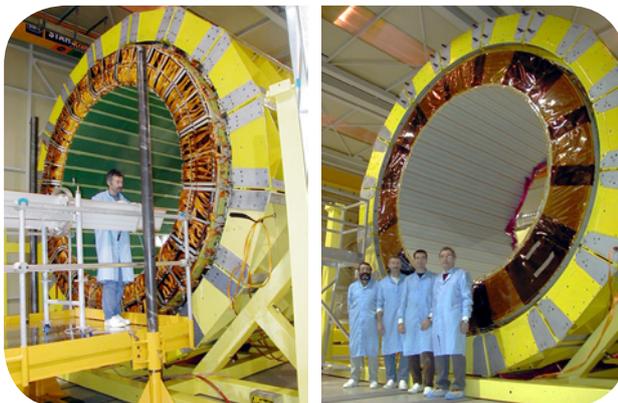
Afin d'accueillir les premières données du LHC dans des conditions acceptables, toutes les expériences du LHC développent un programme Data-Challenge (simulation d'un travail temps réel). ATLAS est l'une des expériences les plus avancées dans ce programme. Un groupe de travail (task force DC) s'est formé et a entrepris de tester le software avec différents canaux de physiques attendus. Le groupe ATLAS du LPSC a participé à cet effort sur plusieurs plans. D'abord en participant à la production des données simulées, puis en les reconstruisant avec le software écrit à cet effet. Puis, par le développement, localement, d'un logiciel de gestion des données, appelé « BookKeeping » qui a vite vu sa popularité accroître avec son utilisation. Ce logiciel, développé par 2 ingénieurs informaticiens du laboratoire, a subi plusieurs améliorations qui font de lui le seul « BookKeeping » utilisable de l'expérience ATLAS. Il servira de même pour les prochaines étapes de Data-Challenge qui vont démarrer en 2004.

D'autre part, les physiciens du groupe ATLAS du LPSC participent à l'effort d'écriture du logiciel du calorimètre à argon liquide. Leurs responsabilités concernent deux domaines assez différents et d'importances inégales : l'un est très technique et nécessite beaucoup de maintenance (différentes classes sont créées et maintenues pour manipuler les identificateurs : les créer, les décoder, procurer des itérateurs, etc.), l'autre est plus physique et concerne un projet plus limité (simulation du premier niveau du système de déclenchement dans le calorimètre à argon liquide).

► Fin de construction et insertion du pré-échantillonneur central d'ATLAS

Le pré-échantillonneur central d'ATLAS est un détecteur qui est placé sur la face interne du calorimètre électromagnétique à argon liquide dans le même cryostat. Son rôle est de préserver la résolution en énergie du calorimètre en mesurant la charge d'ionisation créée en début de gerbes dans un volume actif de faible extension : 11 mm d'argon liquide. Cette charge permet ensuite de remonter à l'énergie perdue par la particule primaire en amont du calorimètre. Le pré-échantillonneur est constitué de 32 x 2 secteurs, chacun ayant une longueur de 3,1 m, une largeur d'environ 28 cm et une épaisseur de quelques centimètres. Trois pays ont été impliqués dans sa construction : la France (LPSC-Grenoble, maître d'œuvre), la Suède (KTH-Stockholm) et le Maroc (Universités : Hassan II Aïn Chock-Casablanca et Mohamed V-Rabat, et CNESTEN-Rabat). La conception du pré-échantillonneur a débuté au LPSC-Grenoble il y a environ 11 ans et sa construction en série a commencé en fin d'année 2000. Quarante et un secteurs ont été assemblés et validés au LPSC, 25 au KTH de Stockholm.

Figures 1 et 2 : Insertion du pré-échantillonneur central dans la première roue du calorimètre électromagnétique à argon liquide d'ATLAS au CERN. (Les secteurs du pré-échantillonneur couvrent la surface interne de la roue).



En novembre 2002, la moitié du détecteur (c'est-à-dire 32 secteurs) a été installée sur la face interne de la première roue du calorimètre électromagnétique à argon liquide au CERN (voir figures 1 et 2). Chacun des 32 secteurs a systématiquement été testé après son insertion dans le calorimètre.

L'insertion et les mêmes tests dans la deuxième et dernière roue au CERN a été réalisée en juillet 2003 en collaboration avec des physiciens et des techniciens du KTH et du Maroc.

Les deux roues ont été ensuite insérées dans leur cryostat commun et ont fait l'objet de campagnes de tests intensifs à température ambiante. Toutes les cellules du pré-échantillonneur sont électriquement connectées et répondent correctement aux signaux tests d'étalonnage. Ces mêmes tests seront répétés à froid, c'est-à-dire dans l'argon liquide (89 K), au printemps 2004.

Enfin la réalisation de deux secteurs supplémentaires en septembre 2003 contribuera à l'étude des performances (tests combinés) d'une tranche azimutale presque complète du futur détecteur ATLAS, à partir de différents faisceaux de particules au CERN, en 2004.

► Étude du facteur de rejet γ/π^0

Un module du calorimètre électromagnétique à argon liquide d'ATLAS avec deux secteurs de pré-échantillonneur ont été testés au CERN pendant l'année 2000 avec un faisceau de photons produit par rayonnement de freinage d'électrons dans une cible de production en plomb de $0,1 X_0$ d'épaisseur. Les données « photons » ont été analysées en 2002 et 2003 afin d'en déduire le facteur de rejet γ/π^0 . Il sera en effet indispensable de rejeter les événements π^0 qui pourront être confondus avec un photon provenant de la désintégration du boson de Higgs dans le mode $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Il est à noter que les derniers résultats du LEP tendent à octroyer au boson de Higgs une masse de 115 GeV. Enfin dans le domaine de masse compris entre 95 et 150 GeV le mode $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ est le plus indiqué, voire le seul accessible expérimentalement, mais aussi, en raison du bruit, le plus difficile à observer.

Les événements π^0 ont été reconstruits en remplaçant les 2 photons simulés par leur « homologues » photons réellement détectés et en respectant les caractéristiques de la cinématique de la désintégration. Il a été pris $P_T(\pi^0) = 50 \text{ GeV}/c$. On trouve un facteur moyen de rejet de 2,5 (3,23) pour une efficacité de détection des γ de 90 % (83 %) et qui est à comparer aux résultats de simulation, soit 2,75 (3,39). Le facteur de rejet γ/π^0 a aussi été calculé en fonction de l'angle entre l'axe longitudinal du détecteur et le plan contenant les 2 photons de désintégration du pion (angle α). Un facteur moyen de rejet supérieur à 3 est facilement atteint lorsque α dépasse 40 degrés pour une efficacité de détection des photons de 90 %. Cette technique permettra de sélectionner un jeu plus propre d'événements favorisant ainsi un meilleur rapport signal/bruit, toutefois au détriment de la statistique.

► Analyse des tests sous faisceau avec GEANT4

Contexte

GEANT4 est le programme de simulation Monte-Carlo avec lequel seront, à terme, modélisés tous les détecteurs du LHC (qui utilisent, pour peu de temps encore, GEANT3). GEANT4 prendra également en charge le processus de simulation des événements. C'est pour ces raisons que nous avons choisi ce programme pour effectuer nos analyses. Celles-ci concernent les données photons enregistrées au cours des tests sous faisceau du calorimètre électromagnétique en août 2000. Cet intérêt pour les photons s'explique principalement à cause de notre étude des désintégrations radiatives, étude qui repose en grande partie sur une bonne compréhension des gerbes de photons.

Stratégie et résultats

Le principe de l'analyse est simple : collecter et trier les données photons pour en tirer des informations intéressantes sur la structure des gerbes, puis comparer ces informations à celles obtenues à partir d'une simulation GEANT4 reproduisant les conditions expérimentales de ces prises de données particulières.

Nous avons donc commencé par développer cette simulation, en partant de celle existante pour un faisceau classique (données électron). Afin de rendre la simulation la plus réaliste possible, les défauts du détecteur (diaphonie, bruit électronique), ainsi que les imperfections du faisceau ont été pris en compte et inclus dans le programme de base.

Une fois ce modèle mis au point, un protocole de sélection des données a été élaboré, protocole permettant de mesurer les paramètres de structures des gerbes pour différentes énergies de photon (contrairement au cas des tests électron, l'énergie des photons arrivant dans le détecteur n'est pas connue a priori). Des paramètres tels que la profondeur ou la largeur de gerbe, ou les variables permettant de séparer photons et pions, ont été ainsi déterminés.

Les résultats obtenus (les figures 3 et 4 montrent par exemple une comparaison des largeurs de gerbes en fonction de l'énergie du photon, largeurs calculées sur 21 et 3 strips) ont montré dans l'ensemble un très bon accord entre la simulation et les données, et ce quelle que soit l'énergie du photon. Ils ont fait l'objet d'une présentation au cours d'une réunion consacrée à la validation de GEANT4, réunion regroupant l'ensemble des expériences du LHC. Les quelques désaccords observés l'ont été également avec GEANT3, et semblent principalement dus à des problèmes de modélisation du détecteur, mais également à une compréhension encore incomplète de la réponse du calorimètre (le problème de la diaphonie et son influence sur l'étalonnage sont encore mal compris).

Figure 3 :
Largeur de la
gerbe sur 3 strips,
en fonction de
l'énergie du photon
(Données en rouge,
GEANT4 en noir).

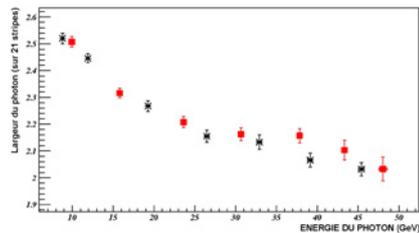
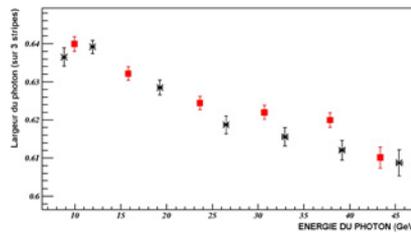


Figure 4 :
Largeur de la
gerbe sur 21 strips,
en fonction de
l'énergie du photon
(Données en rouge,
GEANT4 en noir).



Perspectives

Ce travail d'analyse a été rendu complexe par de nombreux facteurs, en particulier le manque de statistiques (une seule campagne de prise de données). Cela a quelque peu limité notre étude, qui pourra être très largement approfondie si la campagne de tests combinés, à laquelle le groupe participe, comporte une série de prises de données photon. Le point positif est que la simulation GEANT4 du calorimètre n'a pas été prise en défaut (nous avons vu précédemment que les petits écarts observés ne lui sont pas imputables) au cours de cette analyse. C'est de bonne augure pour ce programme qui fera bientôt partie intégrante du software d'ATLAS.

► Développement du logiciel d'analyse

Les physiciens du groupe ATLAS du LPSC participent à l'effort d'écriture du logiciel du calorimètre à argon liquide. Leurs responsabilités concernent deux domaines assez différents et d'importances inégales : l'un technique et très demandant, l'autre physique et plus limité.

Il s'agit premièrement de l'identification de toutes les composantes du détecteur : les cellules, bien sûr, mais aussi les parties inactives, la matière morte, les canaux non connectés, les voies hautes tensions, etc., ainsi que les « tours de trigger », communes aux calorimètres à argon liquide et « à tuiles » (partie tonneau du calorimètre hadronique d'ATLAS). Différentes classes sont créées et maintenues pour manipuler les identificateurs : les créer, les décoder, procurer des itérateurs, etc. Un soin particulier doit être apporté à la recherche de performance : comme il y a plus de 180 000 cellules au total, les méthodes appelées pour toutes les cellules doivent être extrêmement rapides.

Ce travail s'effectue en collaboration avec une équipe du groupe ATLAS du LAL, qui a la responsabilité des classes de base.

D'autre part, il s'agit de la simulation du premier niveau du système de déclenchement dans le calorimètre à argon liquide. En effet, pour le déclenchement, les cellules du calorimètre ne sont pas considérées individuellement mais sont regroupées dans des « tours » qui contiennent la somme (analogique) des signaux de plusieurs cellules, à la fois à une même profondeur d'échantillonnage et sur toutes les profondeurs. Il faut tenir compte du bruit électronique, qui possède une composante commune à la chaîne d'acquisition standard et une composante spécifique. Il faut aussi collecter et utiliser des formes de signaux spécifiques, provenant de simulations dédiées et de mesures. Enfin, il est nécessaire de déterminer les facteurs d'étalonnage par simulation.

Par ailleurs, les informaticiens du groupe ATLAS du LPSC contribuent au logiciel commun (non spécifique au calorimètre à argon liquide).

► Data-Challenges et Data-Grid

Beaucoup de notre énergie s'est concentrée sur la préparation du «commissionning» et du calcul pour tester notre capacité à accueillir les premières données du LHC dans des conditions acceptables. ATLAS a développé un programme « Data-Challenge (DC) » (simulation d'un travail temps réel d'analyse de données et a constitué un groupe de travail (task force DC) pour tester le « software » avec différents canaux de physiques attendus en 2007. Le groupe de Grenoble a participé à une partie de ce travail en coordonnant les « Data-Challenges » au niveau français. Le travail consistait à contribuer à la chaîne « génération-simulation(GEANT3)-validation-reconstruction » des données sur différents canaux de physique, en particulier les « di-jets » pour aider à la préparation du TDR du HLT (High Level Trigger ou déclenchement de Haut Niveau). Cette étape fut appelée DC1 et a fait consommer 71 000 CPU-jour (en unités PIII/500 Hz) et a occupé près de 60 Tbytes de données pour 10^7 événements initialement générés. La prochaine étape du programme DC, DC2, sera, entre autres, de tester la simulation sous GEANT4. Ont participé à ce programme, 18 pays et 39 institutions.

Le projet Data-Grid, projet Européen initié par le CERN, concerne la mise en œuvre d'une grille de calcul pour des projets mettant en œuvre une grande quantité de données. Cela concerne fortement les expériences au LHC et par conséquent ATLAS. Pour nous, le travail consistait à tester une application de simulation/reconstruction et d'analyse des données, type DC1, sur le « cluster » EDG (sites européens de la Data-Grid). Les applications ATLAS sont donc éclatées sur plusieurs sites EDG et en particulier au CCin2p3 au CERN. Elles font partie du WP8 (Work Package 8) qui vise à mettre en place des cas d'utilisation. Les premiers tests DC1 sur la EDG ont été effectués en décembre 2002 avec succès. De nouveaux tests plus complets et plus avancés ont été effectués en 2003 et nous espérons pouvoir appliquer complètement le programme DC (DC2, DC3, ...) sur la Data-Grid, programme actuellement en commun entre l'Europe et les Etats-Unis au sein du LHC, appelé LCG. Les tâches Data-Challenge et Data-Grid sont ingrates car très techniques et très pointues. Cependant, elles sont indispensables pour préparer un avenir « positif » pour notre expérience.

► Physique du B

Études des désintégrations radiatives : Objectifs et stratégie

Les désintégrations radiatives du type $b \rightarrow (s,d) \gamma$ contiennent tous les arguments qui font de la physique du B un domaine d'étude extrêmement riche. On peut en effet, en analysant ces processus rares, aborder des domaines très différents : violation de CP et violation d'isospin avec $B_d \rightarrow \rho^0 \gamma$ et $B^+ \rightarrow \rho^+ \gamma$, mesure des paramètres de la matrice CKM avec $B_d \rightarrow \rho^0 \gamma$ et $B_d \rightarrow K^{*0} \gamma$, découverte de nouveaux phénomènes avec $B_s \rightarrow \emptyset \gamma$, sans oublier, pour tous ces canaux, l'opportunité de contraindre des paramètres que la théorie a

du mal à évaluer précisément (les facteurs de forme, qui sont déterminés par des méthodes de QCD non-perturbative, en sont un exemple typique).

Notre démarche est simple : en premier lieu, démontrer la faisabilité d'une telle étude dans ATLAS. Cela passe par la transition $B_d \rightarrow K^{*0} \gamma$, qui est la plus courante des désintégrations rares. Elle fut mise en évidence pour la première fois par l'expérience CLEO en 1993 [1], et a été observée depuis par les usines à B que sont BABAR et BELLE.

En cas de résultat concluant pour cette première étape, notre objectif est de s'orienter vers un domaine inaccessible aux usines à B, le secteur du B_s , en étudiant le canal $B_s \rightarrow \emptyset \gamma$. Les résultats expérimentaux concernant les mésons B_s sont rares, ceux concernant les désintégrations radiatives du B_s sont inexistantes ! Les prédictions théoriques montrent pourtant que ces désintégrations ne sont pas beaucoup plus rares que celles du B_d (environ 4 à 5 fois moins). Elles seront donc de toute évidence découvertes aux LHC. Autant de raisons qui justifient pleinement notre étude.

Analyse et résultats

Un programme de génération spécial, basé sur Pythia6.2, a été mis au point afin de produire des événements possédant la bonne cinématique (les distributions angulaires des produits de désintégration ne sont pas toutes uniformes), et un échantillon de 30 000 événements de signal (pour 50 000 événements de bruit de fond physique) a été produit.

L'utilisation conjointe de coupures sur le paramètre d'impact et sur les distributions angulaires a permis d'obtenir une reconstruction du K^{*0} tout à fait correcte (voir figure 5), pour une efficacité de 21 % et une pureté de 50 %. Contrairement à ce que l'on pourrait penser a priori compte-tenu de la forte multiplicité des traces dans le détecteur interne, c'est surtout la reconstruction du photon dans le calorimètre qui diminue l'efficacité. Elle est en effet fortement perturbée par le bruit électronique (qui a été pris en compte au cours de l'analyse).

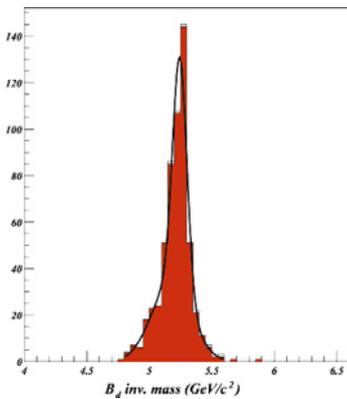


Figure 5 : Masse invariante du K^{*0} (En rouge sont représentés les événements qui sont de vrais K^{*0}).

La distribution finalement obtenue pour le B_d est présentée sur la figure 6. On obtient une efficacité finale de 3 % pour une pureté de signal de 99 %. Cela correspond à environ 10 000 événements pour un an de fonctionnement à basse luminosité. Concernant le bruit de fond, le nombre d'événements utilisés s'est avéré trop faible pour disposer d'un résultat statistiquement réaliste, ce qui est plutôt encourageant pour les coupures retenues. Il sera toutefois nécessaire, pour confirmer la faisabilité de l'analyse, de disposer d'un échantillon 10 à 20 fois supérieur de bruit de fond. Celui-ci est en effet très important (tous les événements $b\bar{b}$ qui passent le premier niveau du trigger).

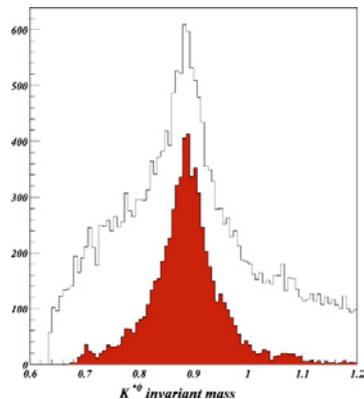


Figure 6 : Masse invariante du B_d (En rouge sont représentés les événements qui sont de vrais B_d).

Perspectives

Le groupe est maintenant pleinement engagé dans l'étude des désintégrations radiatives des mésons B. Ce travail de prospective devrait aboutir au cours de l'année 2004.

L'étude de $B_d \rightarrow K^{*0} \gamma$ est encourageante, il paraît donc intéressant de produire également des événements $B_s \rightarrow \emptyset \gamma$, d'autant plus que l'efficacité de reconstruction sera certainement meilleure (\emptyset est une résonance moins large que K^{*0}).

[1] R. Ammar et al. [CLEO Collaboration] - "Evidence for penguins: first observation of $B_d \rightarrow K^{*0} \gamma$ " - *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 674.