

# Quarks et Leptons

○ ATLAS

○ DØ

## Les particules de matière

Nous savons aujourd'hui que la matière est composée de particules élémentaires dont les quarks et les leptons (voir figure 1). Par exemple l'électron gravitant autour du noyau d'un atome est un représentant des leptons. Quant au noyau, il est formé de protons et de neutrons, deux particules elles-mêmes constituées chacune de 3 quarks. Quarks et leptons sont donc des particules fondamentales de la matière. Elles sont dotées d'un spin demi-entier et donc obéissent au principe d'exclusion de Pauli : elles ne peuvent occuper le même état quantique. Disons d'une manière plus imagée qu'elles constituent les « briques » de la matière, elles « s'entassent ». Quarks et leptons chargés sont massifs ce qui semble naturel pour des particules dites de matière. À chaque particule de matière on peut associer une anti-particule caractérisée par des charges de signe opposé.

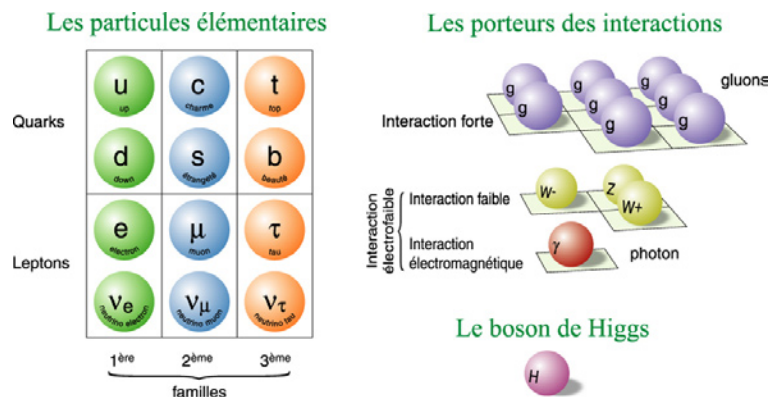


Figure 1 : Tableau des particules élémentaires et des particules liées aux interactions selon le modèle standard.

## Les particules d'interaction

Ces particules sont échangées lors de processus d'interaction. Elles permettent l'échange d'énergie ou de la quantité de mouvement ainsi que d'autres caractéristiques en fonction du type d'interaction. On montre que leur spin est entier et on peut les condenser dans leur état fondamental (condensation de Bose-Einstein). Ces particules constituent le « ciment de la matière ». Il existe 4 types d'interactions fondamentales :

1. l'interaction électromagnétique, elle est transmise par l'échange de photons ;
2. l'interaction faible, elle est par exemple responsable de la radioactivité  $\beta$ . Les interactions électromagnétique et faible ont été unifiées en 1967 par Weinberg et Salam qui ont suggéré qu'en plus du photon il existait 3 autres particules de spin 1, les bosons vectoriels  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ . Ces bosons ont été mis en évidence au CERN en 1983 et sont donc les médiateurs de l'interaction faible ;
3. l'interaction forte, elle est responsable du confinement des quarks à l'intérieur des hadrons et assure donc leur cohésion. Les gluons sont les médiateurs de cette interaction.
4. l'interaction gravitationnelle. Elle est supposée être véhiculée par un boson de spin 2 appelé graviton qui n'a pas encore été mis en évidence.

## Le modèle standard

Le modèle standard décrit les interactions entre toutes les particules actuellement connues. Il met en jeu des symétries abstraites dites de « jauge locale » qui imposent l'existence de champs d'interaction et de leurs bosons associés. En fait ces symétries ne sont réalisées

qu'à très hautes énergies. Les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  sont alors de masse nulle. Lorsque l'on descend en énergie, certaines symétries se brisent spontanément et permettent aux bosons intermédiaires ainsi qu'à toutes les particules de l'univers d'acquérir leur masse. Ce processus permet aussi de conserver le caractère prédictif du modèle, assuré à l'origine par les symétries abstraites. La brisure est en fait provoquée par l'existence d'un doublet de champs scalaires complexes, appelé champs de Higgs qui « structure » le vide. Après la brisure il subsiste un champ scalaire auquel est associé une particule : le boson de Higgs qui est en quelque sorte la « preuve » du mécanisme responsable du phénomène en question. L'observation du boson de Higgs est donc l'un des principaux objectifs de la physique des particules, nous verrons qu'elle fait l'objet d'intenses travaux ou projets de recherche.

### Le concept de masse

L'équation d'Einstein  $E = mc^2$  traduit le fait qu'énergie et matière sont les 2 faces d'une même entité. La matière étant en quelque sorte une forme « cristallisée » de l'énergie. Toutefois à l'époque d'Einstein, les masses des particules étaient encore interprétées comme des constantes universelles de la nature et donc comme des entités intrinsèques sans aucune justification de leur origine. Ce n'est que depuis l'apparition du modèle standard que la préoccupation du processus physique à l'origine des masses des particules élémentaires s'est réellement fait ressentir. Pourtant la notion de masse effective, largement utilisée par exemple en physique nucléaire, ouvrait une voie à certaines interprétations. Le milieu « d'écrantage » serait dans le cas des particules élémentaires le vide lui-même ou plus exactement le champ de Higgs contenu dans le vide.

### Au-delà du modèle standard : modèle standard super-symétrique minimal

La super-symétrie est une nouvelle symétrie qui permet de transformer les bosons (particules d'interaction) en fermions (particules de matière) et vice versa. Elle entraîne l'existence de nombreux partenaires classés en super-multiplets contenant donc à la fois des bosons et des fermions. Cette nouvelle symétrie présente de gros avantages :

1. elle permet l'unification de toutes les interactions, y compris la gravitation ;
2. elle ne contient plus de terme de masse au carré négatif (contrairement au modèle standard) ;
3. elle prévoit l'existence du neutralino en tant que particule stable et massive et donc peut résoudre le problème de la masse cachée de l'univers ;
4. elle ne conduit pas à un désaccord avec certains résultats expérimentaux : valeur de l'angle de Weinberg, durée de vie du proton, convergence en un point unique des constantes d'interaction forte, électromagnétique et faible à haute énergie ;
5. les boucles entre fermions et bosons sont de signes opposés et remédient naturellement aux corrections aux ordres supérieurs qui autrement auraient pour effet de déstabiliser la hiérarchie de jauge, c'est-à-dire la masse des bosons intermédiaires et du Higgs.

L'introduction la plus simple (minimale) de la super-symétrie dans le modèle standard requiert 2 doublets de champs scalaires complexes de Higgs. Après brisure de symétrie elle conduit à l'existence de 5 bosons de Higgs : 2 chargés électriquement et 3 neutres. Néanmoins, à ce jour, aucune particule super-symétrique n'a pu être mise en évidence, sans doute en raison de leur masse élevée ?

### Les expériences

La réponse à l'existence du (ou des) boson(s) de Higgs ou des particules super-symétriques ne peut être apportée que par l'expérience. A cette fin il faut disposer d'un accélérateur à haute énergie équipé de détecteurs performants. D'intenses travaux ont été menés au

LEP (collisionneur  $e^+e^-$  au CERN) conduisant à une présomption sur l'existence du Higgs avec une masse d'environ 115 GeV, mais ce résultat n'était toutefois pas suffisamment convaincant. Le LEP a été démantelé en 2001 afin de laisser place à un collisionneur proton-proton : le LHC avec 14 TeV d'énergie disponible dans le centre de masse et qui peut donc permettre la matérialisation de nouvelles particules de grande masse. Le domaine d'énergie qui sera sondé est donc encore inexploré et pourra conduire à l'observation du Higgs ou des particules super-symétriques, voire à des découvertes insoupçonnées. ATLAS est l'un des détecteurs de physique des particules qui équiperont le LHC, son démarrage est prévu en 2007. Enfin les États-Unis disposent d'un collisionneur proton anti-proton, le TEVATRON, moins performant que le LHC. Grâce au détecteur DØ qui équipe ce dernier collisionneur, la chasse au Higgs et aux particules super-symétriques est déjà lancée de manière intensive.

# 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 démarraera 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. Etudier 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  $\beta$  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 ( $\gamma, \pi^0$ ) 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.

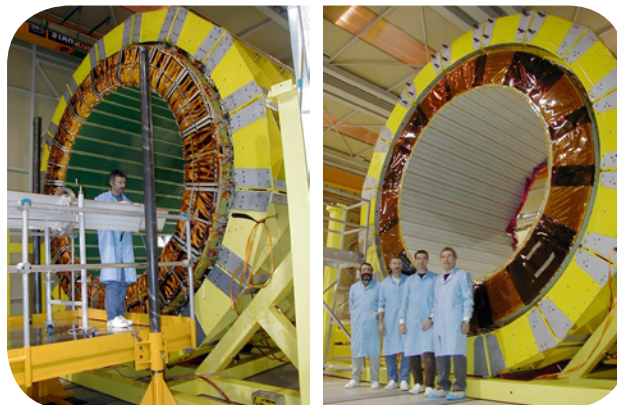
Afin d'accueillir les premières données du LHC dans des conditions acceptables, toutes les expériences du LHC développent un programme Data-Challenge (simulation d'un travail temps réel). ATLAS est l'une des expériences les plus avancées dans ce programme. Un groupe de travail (task force DC) s'est formé 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.

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.



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).

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 $\gamma/\pi^0$

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  $\gamma/\pi^0$ . Il sera en effet indispensable de rejeter les événements  $\pi^0$  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  $\pi^0$  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  $\gamma$  de 90 % (83 %) et qui est à comparer aux résultats de simulation, soit 2,75 (3,39). Le facteur de rejet  $\gamma/\pi^0$  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  $\alpha$ ). Un facteur moyen de rejet supérieur à 3 est facilement atteint lorsque  $\alpha$  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).

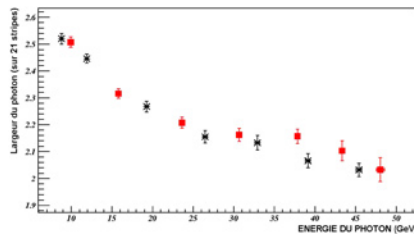
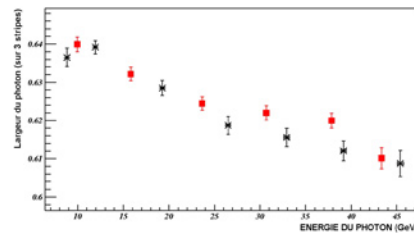


Figure 4 :  
Largeur de la gerbe sur 21 strips, en fonction de l'énergie du photon (Données en rouge, GEANT4 en noir).



## 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 inexistants ! 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).

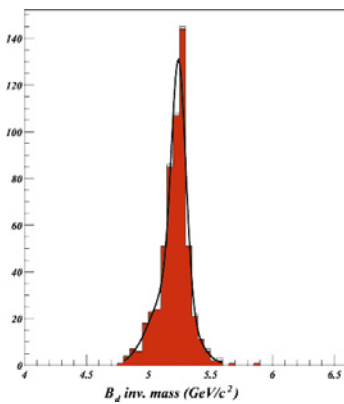


Figure 5 : Masse invariante du  $K^{*0}$  (En rouge sont représentés les événements qui sont de vrais  $K^{*0}$ ).

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).

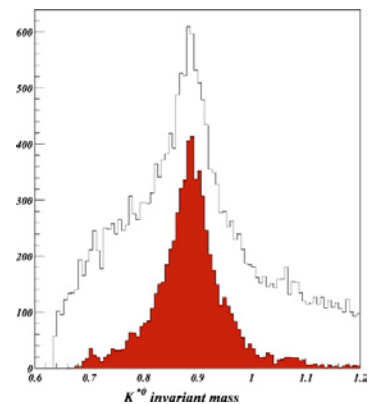


Figure 6 : Masse invariante du  $B_d$  (En rouge sont représentés les événements qui sont de vrais  $B_d$ ).

### 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.

# L'expérience DØ

Y. Arnoud, S. Crépé-Renaudin, A.-M. Magnan, G. Sajot, J. Stark.

*The DØ experiment is with CDF installed at the Tevatron (proton-antiproton collider with a center of mass energy of 1960 GeV) located at Fermi National Accelerator Laboratory near Chicago (US). The DØ Grenoble group is involved in software tasks (electron reconstruction and identification, b-tagging, L3 trigger studies) and in data analysis (search for supersymmetric particles in the frame of R-parity violation and recently, top cross section). Since March 2001, DØ has collected around  $250 \text{ pb}^{-1}$  of data, twice the Run I statistic.*



Figure 1 : Vue latérale du détecteur DØ lors de sa mise en place dans le hall expérimental. Le détecteur mesure environ 10 m de hauteur.

DØ est avec CDF, l'une des deux expériences installées auprès du collisionneur proton-antiproton, le Tevatron, du FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) situé près de Chicago aux États-Unis. De 1995 à 2000, le Tevatron et les deux détecteurs CDF et DØ (Figure 1) ont bénéficié de profondes améliorations. L'énergie du Tevatron a été portée à 1960 GeV et la luminosité instantanée augmentée (actuellement d'un facteur 3). DØ a complètement changé ses détecteurs de trace, s'est doté d'un solénoïde supraconducteur, a amélioré ses détecteurs de muons, le système de déclenchement et changé une grande partie de son électronique. Les logiciels de reconstruction et de simulation ont été totalement remplacés par de nouveaux codes écrits en C++. Les premières collisions de la nouvelle période de données, appelée Run II, ont été enregistrées début avril 2001.

Depuis cette date DØ a collecté une luminosité intégrée d'environ  $250 \text{ pb}^{-1}$ , doublant ainsi celle accumulée au cours du Run I (1992-1995).

La Collaboration DØ regroupe actuellement 650 physiciens venant de plus de 80 Instituts répartis dans le monde. Le groupe DØ Grenoble est impliqué dans le développement de logiciels essentiellement orientés vers la reconstruction et l'identification des électrons et à leur utilisation dans les analyses de physique. Le groupe a également contribué à l'adaptation à l'environnement informatique de DØ du générateur SUSYGEN. Celui-ci est utilisé dans la recherche de particules supersymétriques effectuée par le groupe. La reconstruction d'électrons non isolés permet au groupe de contribuer à l'étude de la section efficace de production de paires du quark top.

## ► Contributions aux logiciels de reconstruction de l'électron

Depuis son arrivée dans la Collaboration DØ, le groupe a contribué au développement des programmes de reconstruction de l'électron. Il a actuellement la responsabilité de la maintenance de cet ensemble de programmes (« emreco ») : intégration des différentes améliorations et des corrections. Un des membres du groupe est co-responsable du groupe « CALGO electron-id » et participe à la « Calorimeter Algorithms Task Force » qui est chargée d'optimiser les algorithmes de reconstruction des données du calorimètre pour les futures mesures de précision. Dans ce cadre de la « Task Force », des développements et des tests de nouveaux algorithmes de suppression de bruit de

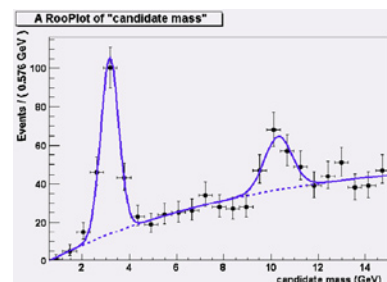


Figure 2 : Spectre de masse invariante de paires  $e^+ e^-$  de bas  $p_T$  identifiées par la méthode de la « route ».

fond dans le calorimètre sont effectués. Ils contribuent à l'amélioration de la précision de la reconstruction de l'énergie des objets électromagnétiques et des jets.

Depuis octobre 2002, le groupe est responsable de l'amélioration d'un nouvel algorithme de reconstruction des électrons de basse quantité de mouvement transverse ( $p_T$ ) près des jets. Cet algorithme associe à une trace une « route » dans le calorimètre et collecte l'énergie déposée dans ce domaine. Des critères sur la répartition de cette énergie permettent de séparer hadrons et électrons. Cet algorithme a été intégré au niveau 3 du déclenchement de  $D0$ . De nouveaux critères de déclenchement sur les électrons de bas  $p_T$  sont étudiés en collaboration avec le groupe travaillant sur le « Central Track Trigger » (déclenchement de niveau 1). A titre d'illustration, la figure 2 présente la masse invariante de paires  $e^+ e^-$  de bas  $p_T$  obtenue sur une petite fraction des données de  $D0$ .

### ► Corrections « géométriques » de l'énergie des électrons

Les calorimètres de  $D0$  sont à échantillonnage avec de l'argon liquide pour milieu actif. L'absorbeur est soit de l'uranium pour la partie électromagnétique (et la partie dite « fine hadronic ») ou du cuivre et de l'acier pour la partie dite « coarse hadronic ». Ils sont constitués d'un calorimètre central couvrant le domaine de pseudo rapidité  $|\eta| < 1$  et d'une paire de calorimètres avant qui étendent le domaine d'acceptance jusqu'à  $|\eta| < 4$  ainsi que le solénoïde supraconducteur. De plus dans la région centrale le calorimètre est segmenté en 32 modules dans le plan transverse. Il y a donc deux raisons pour lesquelles l'énergie d'un électron n'est pas totalement reconstruite dans les calorimètres :

1. avant d'atteindre la région du calorimètre, il doit traverser les matériaux dont sont constitués les trajectomètres, le solénoïde et les cryostats ;
2. l'électron atteint une région où le calorimètre est moins précis : les limites de leur domaine en  $\eta$  (en particulier entre les calorimètres central et avant) ou entre deux des 32 modules dans le plan transverse du calorimètre central.

Des corrections dites « géométriques » sont déterminées par simulation du détecteur pour corriger les données de ces effets. Elles sont définies pour des énergies de l'électron supérieures à 5 GeV. À l'heure actuelle ces corrections sont paramétrées par un polynôme de degré deux en  $\eta$  dont les coefficients sont eux-mêmes paramétrés en fonction de l'énergie. Des tests sont faits sur le  $Z$  se désintégrant en 2 électrons pour vérifier et estimer l'effet de ces corrections.

### ► Étude de la résolution du calorimètre électromagnétique

Les profondes modifications au sein du détecteur  $D0$  se sont traduites par une augmentation de la quantité de matière en amont du calorimètre électromagnétique. Le passage du temps de croisement des paquets de protons et d'antiprotons à 396 ns a nécessité la mise en place d'une nouvelle électronique de lecture. Ces changements modifient la résolution du calorimètre électromagnétique qu'il n'a pas été possible de mesurer en faisceau test.

Afin de déterminer les nouvelles valeurs des coefficients qui caractérisent la résolution électromagnétique (bruit électronique, terme d'échantillonnage et terme constant), une méthode originale basée sur l'étude des largeurs des résonances  $J/\psi$ , Upsilon et  $Z$  est en cours de développement. Il s'agit de déterminer par simulation la contribution du calorimètre à la largeur expérimentale de ces trois résonances, reconstruites dans le mode  $e^+e^-$ .

La masse invariante de la paire  $e^+e^-$  est calculée dans les données réelles à partir des informations du trajectomètre (angle entre les leptons) et du calorimètre (énergie). La largeur expérimentale de la distribution des trois pics de masse invariante dépend ainsi de trois contributions : la largeur naturelle de la résonance (environ 2,5 GeV pour le  $Z$ , négligeable pour les deux autres), la résolution du trajectomètre et la résolution du calorimètre que l'on cherche à déterminer.

La première étape consiste à générer des paires de leptons produites par la désintégration des trois résonances à l'aide du générateur Pythia, en incluant les effets des ISR (Initial State Radiation) et des FSR (Final State Radiation).

La contribution du trajectomètre est ensuite paramétrée en effectuant une dégradation des données générées afin de reproduire les largeurs expérimentales du  $J/\psi$  ( $ee$ ) et de l'upsilon  $1S$  ( $ee$ ), mesurées uniquement à partir des informations du trajectomètre. Celui-ci est en effet performant pour des électrons de quantité de mouvement inférieure à une quinzaine de  $GeV/c$ .

La contribution du calorimètre est ensuite ajoutée en effectuant une deuxième dégradation des données générées, afin de reproduire la largeur totale mesurée dans les données réelles. Cette contribution dépend cependant de façon ambiguë de chacun des trois termes, chacun pouvant contribuer à l'élargissement des pics de masse.

Une étude de la résolution de l'électronique du calorimètre a été effectuée par R. Zitoun, conduisant à la détermination du terme de bruit électronique. Les deux autres termes (échantillonnage et terme constant) seront obtenus en comparant les domaines de validité conduisant aux largeurs totales observées. En utilisant les trois résonances, on trouve un recouvrement à 2,5 sigmas, qui indique une dégradation du terme d'échantillonnage qui passe de 15 % à plus de 20 %.

La précision de la mesure est pour le moment limitée par la mauvaise compréhension des performances du trajectomètre dans la reconstruction de l'upsilon  $1S$ , mais devrait fournir dans un proche avenir des valeurs précises pour le terme d'échantillonnage et le terme constant.

### ► Interfaçage de SUSYGEN avec les codes de simulation

SUSYGEN a d'abord été un générateur pour les collisionneurs  $e^+e^-$  et a été largement utilisé au LEP. Il est exclusivement dédié à la supersymétrie et aux dimensions supplémentaires. Récemment E. Perez du DAPNIA Saclay l'a développé pour les collisionneurs hadroniques. SUSYGEN intègre tous les éléments nécessaires à l'étude des processus R-parité violée (production résonante, désintégration directe et indirecte des particules supersymétriques et rapports de branchement). Il est interfacé avec le programme SUSPECT (développé par le groupe théorie de Montpellier) qui calcule les R.G.E (Renormalisation Group Equation). Le groupe a adapté les codes de masse des particules au nouveau standard StdHep, a rendu SUSYGEN compatible avec PYTHIA 6.00, a contribué aux tests de ce générateur et a effectué des comparaisons systématiques avec d'autres générateurs.

### ► Recherche de particules SUSY avec R-parité violée

La supersymétrie est une théorie dans laquelle on définit une symétrie entre les bosons (particules de spin entier : par exemple le photon) et les fermions (particules de spin demi-entier : par exemple l'électron). Cette théorie englobe celle du modèle standard de la physique des particules, et a été introduite afin de pallier certains défauts de ce dernier. Dans cette théorie, trois des quatre forces fondamentales (interaction électromagnétique, interaction faible, et interaction forte) sont unifiées à grande énergie (environ  $10^{16}$  GeV).

Chaque fermion (boson) du modèle standard aura donc un partenaire boson (fermion) supersymétrique. On peut ainsi définir un nombre quantique multiplicatif, que l'on appellera la R-parité, et qui permet de distinguer les particules du modèle standard ( $R_p = +1$ ) des particules supersymétriques ( $R_p = -1$ ). On considère généralement que ce nombre est conservé : à partir de particules du modèle standard, on ne peut donc produire que des paires de particules supersymétriques. La particule supersymétrique la plus légère (ou LSP : Lightest Supersymmetric Particle) sera stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire de l'univers, d'où l'intérêt de conserver cette nouvelle symétrie.

Cependant, dans la théorie sous sa forme actuelle, rien ne justifie cette hypothèse de conservation. On peut donc envisager de violer la R-parité, ce qui conduira à la désintégration de la LSP en particules du modèle standard. On définit trois couplages différents ( $\lambda$ ,  $\lambda'$  et  $\lambda''$ ) entre les particules supersymétriques et les particules du modèle standard.

L'analyse en cours porte sur le couplage  $\lambda$ , ce qui implique une désintégration de la particule supersymétrique la plus légère en deux leptons chargés et un neutrino. On se place dans l'hypothèse d'une production de particules supersymétriques conservant la R-parité et d'une désintégration, après cascade, de la LSP en particules standard. Dans le cas du couplage  $\lambda$ , l'état final sera composé d'au moins quatre leptons chargés et de deux neutrinos qui se manifesteront par de l'énergie manquante. Dans le modèle standard, peu de processus conduisent à la formation de trois leptons chargés de grand  $p_T$ . La perte d'un lepton dans le détecteur est donc acceptée, et on recherchera finalement au moins trois leptons chargés dans l'état final.

Pour des raisons d'antisymétrie, il existe seulement neuf couplages  $\lambda$ , notés  $\lambda_{ijk}$ . Les indices  $i, j$  et  $k$  valent entre 1 et 3 et se rapportent aux leptons du modèle standard : 1 pour l'électron, 2 pour le muon, et 3 pour le tau.

Dans un premier temps, seul le couplage  $\lambda_{121}$ , conduisant à une désintégration avec au moins deux électrons a été considéré par le groupe. Les simulations sont réalisées avec SUSYGEN dans le cadre du modèle mSUGRA. Dans ce modèle, on définit cinq paramètres indépendants :  $m_0$  est la masse commune des sfermions (partenaires supersymétriques des fermions) à l'échelle de grande unification,  $m_{1/2}$  est la masse commune des jauginos également à cette même l'échelle,  $\tan \beta$  est le rapport des valeurs moyennes dans le vide des 2 doublets de Higgs,  $\text{signe}(\mu)$  est le signe du paramètre de mélange des Higgsinos (partenaires supersymétriques des bosons de Higgs), et enfin  $A_0$  est le couplage tri-linéaire commun aux trois forces fondamentales (hors gravité) à l'échelle de grande unification.

Les données accumulées entre septembre 2002 et juin 2003 correspondent à une luminosité intégrée de  $117 \text{ pb}^{-1}$ . Avec cette luminosité, les données sont en accord avec les prédictions du modèle standard (Figure 3). En effet, après application des critères de sélection des événements, 3 événements « données réelles » sont retenus pour  $3,0 \pm 1,5$  événements du modèle standard attendus (principalement  $Z\gamma \rightarrow ee\gamma$  et  $Z \rightarrow ee$ ). Cette étude préliminaire, menée dans le cadre du modèle mSUGRA, a permis de mettre des limites supérieures sur les sections efficaces de production de paires de jauginos (partenaires supersymétriques des bosons de jauge) :  $\sigma > 1,3 \text{ pb}$  pour  $\mu < 0$  et  $\sigma > 1,4 \text{ pb}$  pour  $\mu > 0$  (pour  $A_0 = 0$ ,  $\tan \beta = 5$ ,  $m_{1/2} = 150$  et  $m_0 > 500$ ). Compte tenu de la statistique disponible, ces limites sont encore moins contraignantes que celles obtenues par DØ au Run I, mais devraient les dépasser par analyse des données complètes de 2002-2003 actuellement en cours. Les analyses précédentes du groupe, qui ont donné lieu à deux thèses, portaient sur un échantillon de données beaucoup plus réduit et concernaient les couplages  $\lambda_{121}$  et  $\lambda'_{122}$ . Elles ont jeté les bases de l'analyse actuelle.

Au début du printemps 2004, la Collaboration DØ aura accumulé plus de  $250 \text{ pb}^{-1}$  de données. Actuellement nous explorons déjà un plus grand domaine de l'espace des paramètres  $m_0$  et  $m_{1/2}$ , et considérons tous les couplages  $\lambda_{ijk}$  possibles conduisant à des topologies d'événements  $eee$  et  $ee\mu$ . Cette étude est réalisée en partenariat avec le groupe DØ d'Aix-la-Chapelle qui étudie les événements avec au moins deux muons. Nous pourrions donc probablement mettre rapidement une limite supérieure à celle définie par le LEP, ou faire peut-être une découverte !

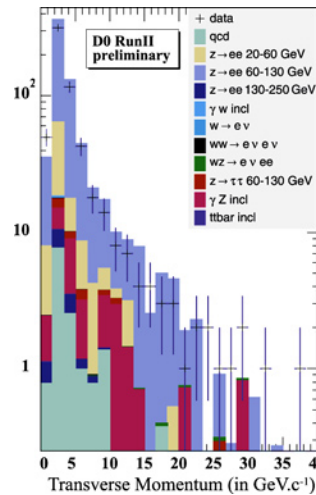


Figure 3 : Analyse Supersymétrique R-parité violée sur les données DØ prises entre septembre 2002 et mi-juin 2003 (environ  $120 \text{ pb}^{-1}$ ) : spectre en  $p_T$  du 3<sup>e</sup> candidat électron dans la sélection di-électron. Les données sont figurées par des croix et les fonds provenant du modèle standard par des histogrammes.