

Expérience Atlas au LHC

Participation du LAPP

Expérimentateurs : B. Aubert, J. Colas, L. Di Ciaccio, M. El-Kacimi, O. Gaumer, P. Ghez, M. Gouanère, R. Lafaye, C. Le Maner, L. Neukermans, P. Perrodo, L. Poggioli, H. Przysiezniak, **G. Sauvage**, I. Wingerter-Seez, R. Zitoun, Y. Zolnierowski

Equipe technique : J. Ballansat, J-P. Baud, P. Baudin, A. Bazan, Y. Beeldens, C. Billat, J. Boniface, H. Bonnefon, T. Bouedo, M. Cailles, G. Daguin, P. Delebecque, N. Dumont-Dayot, C. Girard, G. Ionescu, A. Jeremie, L. Journet, T. Le Flour, J. Lesueur, S. Lieunard, N. Massol, M. Moynot, J-L. Panazol, G. Perrot, J. Prast, J. Tassan, J. Thion

Stagiaires : A-F. Cotte, S. Geffroy, J. Ducret, N. Picault

Collaboration

La Collaboration ATLAS est une collaboration mondiale comprenant plus de 140 instituts des cinq continents dont 7 laboratoires français : LAPP Ancey, LPC Clermont-Ferrand, ISN Grenoble, CPPM Marseille, LAL Orsay, LPNHE Université Paris VI-VII, CEA-DAPNIA Saclay.

Dates Clés

1990-2000 : Phase de R&D et construction des modules de présérie

2000-2002 : Construction du calorimètre électromagnétique

mi-2006 : Premières collisions et première prise de données

Abstract

ATLAS is one of the two general purpose detectors accepted to study proton-proton collisions at 14 TeV at the large hadron collider to be built in the LEP tunnel at CERN. One main feature of this detector is a very fine grain liquid argon electromagnetic calorimeter specially suited for the search of the Higgs boson decays. Our laboratory, which has a great expertise in electromagnetic calorimetry, is deeply involved in building this calorimeter as well as its readout electronics.

Le détecteur ATLAS

Le principe de base de la physique expérimentale au LHC est l'identification et la mesure des paramètres cinématiques des électrons, photons, muons, jets et énergie transverse manquante dans un environnement hadronique très dense. La collaboration ATLAS a ainsi conçu son détecteur autour de deux choix vitaux pour la physique : un grand aimant à champ toroïdal pour reconstruire avec précision l'impulsion des muons et un calorimètre électromagnétique à argon liquide pour identifier et reconstruire les paramètres cinématiques des photons et des électrons. Ces appareillages sont complétés par un détecteur de traces qui utilise des technologies adaptées à l'environnement du LHC et un calorimètre hadronique, sandwich de fer et de scintillateurs, pour mesurer l'énergie des hadrons et filtrer les muons.

La plupart des laboratoires français se sont regroupés dans ATLAS sur la construction du calorimètre électromagnétique à argon liquide. Les avantages de cette technique de calorimétrie sont aujourd'hui bien connus : possibilité de construire un détecteur uniforme, stable dans le temps, minimisant les zones mortes, qui s'étalonne facilement et qui possède une grande résistance aux radiations. Cela s'est concrétisé dans la collaboration ATLAS par le choix d'une géométrie accordéon et d'une électronique de lecture qui permet de lire rapidement les signaux et de conserver un niveau de bruit électronique acceptable pour la physique.

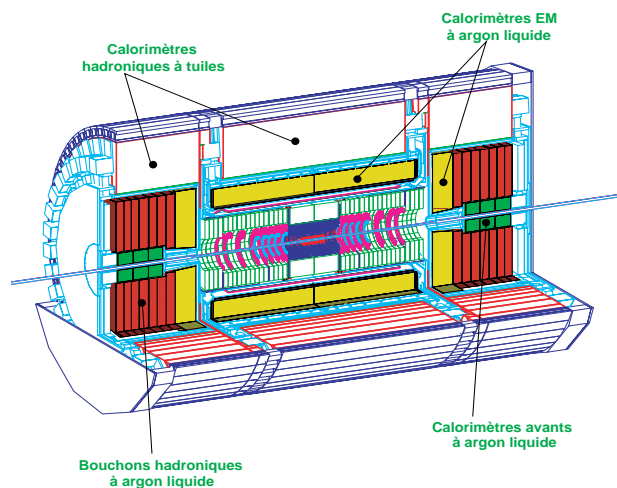


Figure 1 : Le calorimètre ATLAS

Participation du LAPP à ATLAS

Le LAPP s'est largement impliqué dans la partie tonneau du calorimètre électromagnétique (Figure 1) ainsi que dans l'électronique de lecture de l'ensemble du calorimètre.

La période 2000-2001 a vu le passage de la construction d'un prototype de module (le module M00) à la construction de modules de série. 8 sur les 32 à réaliser ont été construits dans les

3 sites d'assemblage. Le laboratoire a assemblé 2 modules, en a câblé 3 et testé au froid 2 dans la station cryogénique du laboratoire. Les activités du groupe sont réparties dans les domaines suivants :

I) Préparation du détecteur

1) Mécanique, assemblage, câblage et tests du calorimètre central

Le calorimètre électromagnétique central à argon liquide se compose de 2 demi-calorimètres cylindriques de 60 tonnes chacun. Chaque demi-calorimètre est supporté par 7 anneaux extérieurs en inox posés sur 2 rails fixés au cryostat contenant le calorimètre. Un demi-calorimètre se compose de 16 modules identiques couvrant chacun un secteur angulaire azimutal de 22,5 degrés. Un module est constitué de 64 absorbeurs en forme d'accordéon et de 64 électrodes. Chaque anneau support est donc divisé en 16 arceaux. Les arceaux d'un module (en fait 6 sur 7) sont fixés sur un support (backbone) permettant ensuite l'assemblage de 16 modules en un cylindre. Pour garantir la forme géométrique d'un module, les absorbeurs sont aussi fixés à petit rayon sur des arceaux en fibre composite (fibre de verre-époxy). La construction des arceaux extérieurs et intérieurs était à la charge du laboratoire et sont maintenant réalisés.

a) Pliage des électrodes

Au cours de ces 2 années, le laboratoire a plié environ 1600 électrodes, soit environ 40% du total nécessaire pour le calorimètre central. Celles-ci sont actuellement utilisées dans l'assemblage des modules. Un certain nombre de difficultés ont été rencontrées lors de ce pliage et nous ont amenés à modifier le cycle de la plieuse automatique de façon à réduire au minimum le nombre de résistances sérigraphiées endommagées lors du pliage. Pour améliorer la forme géométrique des plis une opération de roulettage des plis des électrodes a également été mise au point. Le rythme de pliage obtenu est de 40 électrodes par semaine et un outillage a été construit pour passer à 80 électrodes par semaine pour pouvoir terminer la production dans les délais prévus.

b) Assemblage des modules

Après avoir empilé le module prototype, nous avons maintenant empilé 2 modules de la série (Figure 2). Compte tenu des problèmes de tenue haute tension des espaceurs en nid d'abeille, nous avons dû construire un banc de nettoyage et un banc de test haute tension des espaceurs. Les dimensions géométriques des modules sont contrôlées pendant l'empilage (épaisseur à petit et grand rayon, gonflement des absorbeurs) de façon à obtenir une cote finale avec une très bonne tolérance. Les propriétés électriques : tenue haute tension, intégrité des circuits électriques, sont aussi contrôlées en permanence pendant l'empilage du module. Nous mesurons aussi les capacités entre électrode et absorbeur, pour contrôler l'uniformité du gap (Figure 3 : pour le module M12 la non-uniformité du gap contribue pour 0,27% au terme constant de la résolution en énergie, tout à fait dans les valeurs spécifiées).

c) Câblage et tests à chaud et à froid des modules

Après assemblage, les modules sont transportés dans le hall de test pour être câblés et subir une série de tests de qualification. La procédure de câblage, installation de cartes sommatriques, de cartes mères et de câbles de liaison des patch panels, a été définie avec le module prototype et nous avons câblé 3 modules en 2001. Les tests de qualification avec un banc de test développé en partie au LAPP comprennent une vérification de l'intégrité des connexions électriques (un module comprend plus de 3.000 voies), une calibration de toutes les voies et un test en haute tension. Ces tests sont ensuite répétés à froid dans le cryostat installé dans ce hall pour la qualification finale des modules non étalonnés avec un faisceau d'électrons. Le test à froid comprend un essai à la tension nominale (2.000 V) de longue durée dans l'argon liquide (Figure 4). Le développement des logiciels pour le banc de test a été fait au laboratoire et leur maintenance est assurée par le laboratoire.

2) Electronique

a) Carte électronique d'étalonnage

L'injection d'impulsions électriques d'étalonnage très bien connues, le plus près possible de chaque cellule (étalonnage froid), constitue un point clé pour atteindre les performances calorimétriques requises pour la physique (une précision de 1/1.000 est recherchée). Après avoir participé, en collaboration avec le LAL Orsay, à la réalisation de 13 cartes prototypes d'étalonnage, utilisées lors des campagnes de tests en faisceau, le travail est entré à présent dans la phase de conception des cartes finales, munies d'un nouveau système numérique et capables de fonctionner dans un environnement avec des



Figure 2 : Le module M8 en cours d'empilage

radiations. Un circuit ASIC prototype de cette nouvelle logique a été conçu et fondu. Il a été testé électroniquement et aux radiations et donne satisfaction. Parallèlement les circuits de distribution des signaux de déclenchement (ITC) ont été étudiés, ainsi que des lignes à retards qui permettent d'ajuster finement en temps les impulsions. Enfin un prototype grandeur nature de la partie logique de la carte finale a été réalisé et testé. L'ensemble se comporte comme attendu. Deux cartes prototypes complètes (avec les circuits logiques) sont

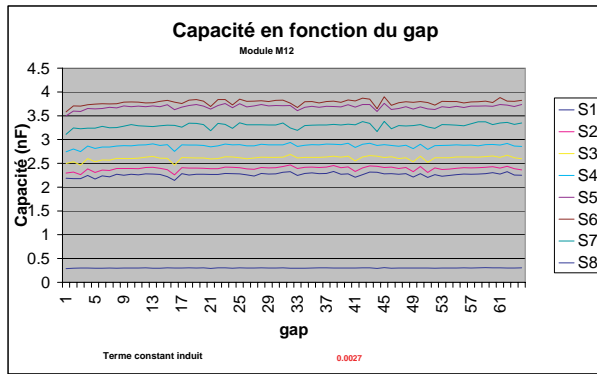


Figure 3 : Valeurs des capacités des 8 secteurs de chacune des 64 électrodes du module M12

prévues pour le printemps 2002 pour études extensives, avant de lancer la production des quelques 120 cartes nécessaires au sous-détecteur à argon liquide.

b) Electronique de traitement du signal

La physique au LHC conduit à des conditions contraignantes pour l'électronique de lecture : fréquence des croisements de faisceaux de 40 MHz, empilement d'événements hadroniques de biais minimal (23 par croisement), un taux de déclenchement de premier niveau de 75 kHz et une dynamique de 50.000. Fortement impliqué dans l'électronique de lecture du calorimètre, le groupe a continué à maintenir les cartes miniROD pour le faisceau test. En parallèle, il a participé à l'élaboration de la première carte de lecture ROD (Read Out Driver), permettant le traitement en ligne des données à l'aide de DSP (Digital Signal Processor). Pour ce faire, le groupe a

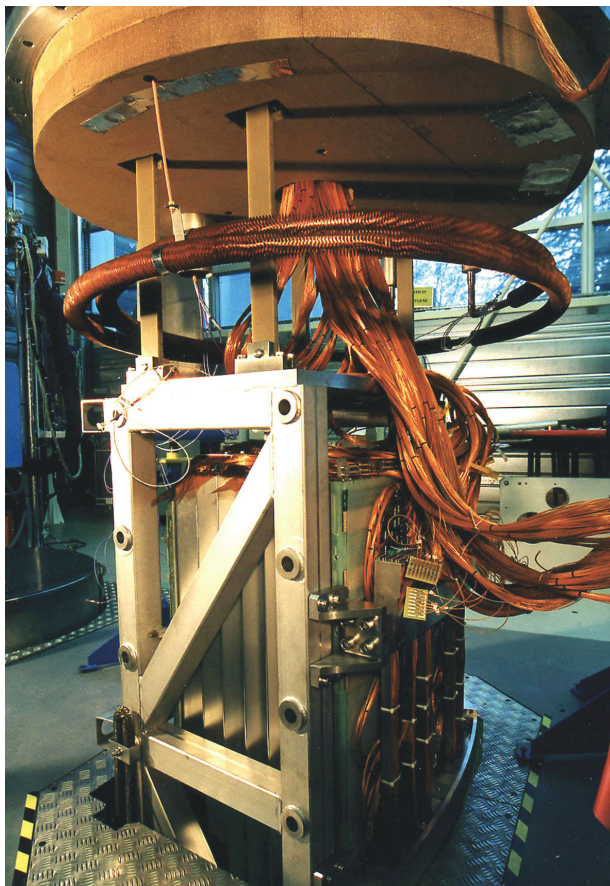


Figure 4 : Le module est accroché sous le couvercle du cryostat

développé des cartes filles s'insérant sur une carte mère (Figure 5).

Pour simuler les données provenant du calorimètre, le groupe a également développé une carte injecteur (figure 6), qui est un outil essentiel pour la validation des cartes ROD finales pour ATLAS.

Les cartes ROD et injecteur ont été testées avec succès dans l'environnement ATLAS. Le groupe s'est maintenant vu confié, en collaboration avec un laboratoire américain, la réalisation des cartes filles finales ainsi que l'élaboration d'un banc de test de ces cartes ROD. L'équipe «online» du groupe travaille aux aspects informatiques de ce banc de test, ainsi qu'à l'intégration des cartes développées, dans le cadre de l'acquisition de données d'ATLAS, pour les procédures d'étalonnage et de prises de données de physique.

II) Participation aux campagnes de tests en faisceau

Plusieurs campagnes de tests en faisceau ont eu lieu au CERN en 2000 et 2001 pour étudier et valider le fonctionnement des premiers modules finaux.

Comme dans les campagnes de test des modules prototypes, le groupe a été responsable de la mise au point du système de déclenchement, de l'installation des cartes miniROD, de leur programme d'acquisition ainsi que des programmes de contrôle et d'initialisation de l'ensemble des cartes électroniques. En outre, le groupe a pris en charge entièrement l'écriture du programme de contrôle en ligne (monitoring) des données acquises. Ces responsabilités sont assurées aussi bien pour le dispositif de test des modules tonneaux que des modules bouchons.

Le groupe a mis au point une méthode originale de calcul des coefficients de filtrage optimal basée sur un modèle électrique et qui assure une bonne reconstruction de l'amplitude du signal de physique conformément aux spécifications du détecteur.

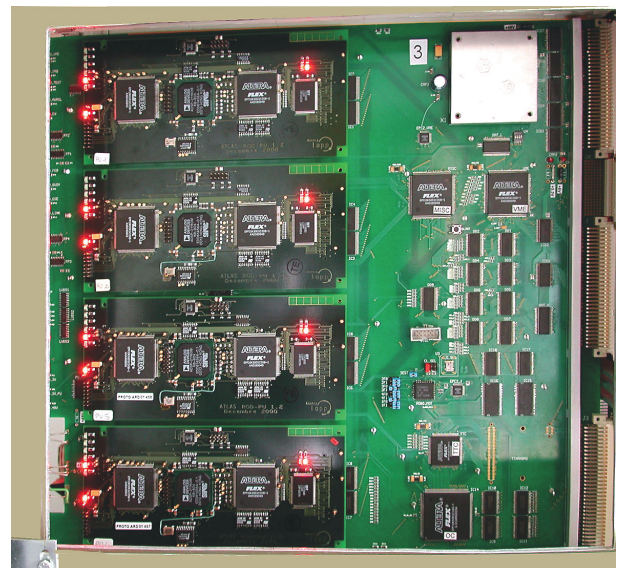


Figure 5 : La carte ROD

Le groupe est chargé du développement et de la maintenance du programme d'analyse «offline» des données et est seul responsable du calcul des coefficients de gain (qui convertissent les coups d'ADC en GeV) et des coefficients de filtrage optimal. Les coefficients de gain et de filtrage optimal permettent de mesurer l'énergie des électrons et des photons. Les membres du groupe ont participé de façon importante aux prises de données et sont fortement engagés dans l'analyse des données des modules tonneaux. Un des aspects étudiés est l'uniformité spatiale et la stabilité temporelle de la réponse des modules. Cette étude est très importante car la possibilité de détecter et mesurer des événements difficiles à reconstruire précisément comme $H \rightarrow \gamma$ dans ATLAS dépend entièrement de la valeur du terme constant de la résolution en énergie du calorimètre électromagnétique et donc de l'uniformité de sa réponse. La Figure 6a montre l'énergie, normalisée à l'énergie

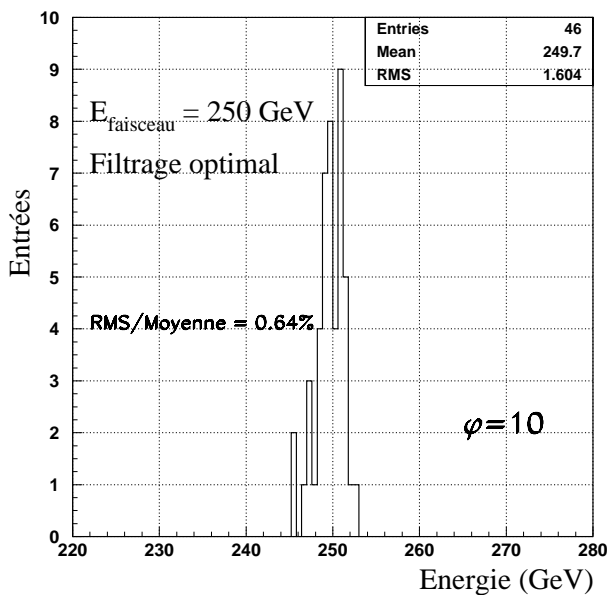


Figure 6a : Distribution de l'énergie des électrons incidents dans 46 des 48 cellules montrées dans la figure précédente (les 2 cellules éliminées ont des gains instables)

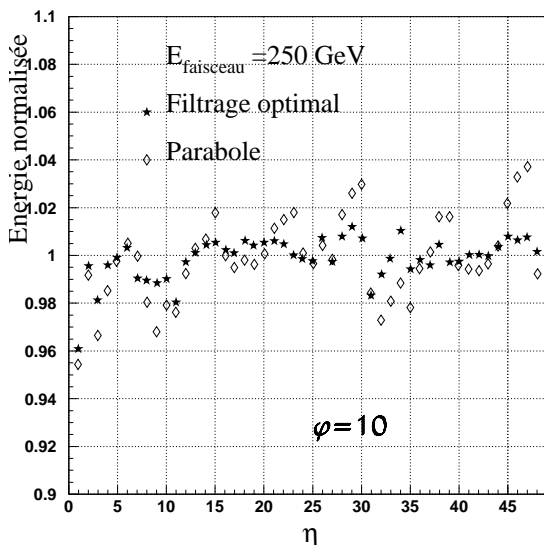


Figure 6b : Énergie des électrons de 250 GeV, normalisée à l'énergie du faisceau, en fonction de la position d'impact, η (exprimée en unité de cellule de calorimètre) sur le calorimètre. Chaque cellule correspond à une région de dimensions $\delta\eta = 0.025$ et $\delta\phi = 0.025$ rad

du faisceau, en fonction de la position d'impact, η , des électrons sur le calorimètre. La méthode des coefficients de filtrage optimal donne une meilleure uniformité: pour des électrons de 250 GeV, sur une région de dimensions $0 < \eta < 1.2$ et $0 < \phi < 0.025$ rad, l'uniformité est de 0.6% (figure 6b).

L'analyse des résultats relatifs au premier module tonneau final est dans la phase de finalisation et sera présentée dans une publication à la rédaction de laquelle participent plusieurs membres du groupe.

III) Préparation de l'analyse

1) Simulation de processus physiques

Un travail en cours étudie le potentiel du détecteur ATLAS de découverte du boson de Higgs dans ses désintégrations en particules invisibles dans le cas où le Higgs est produit par fusion de bosons vecteurs. Une sensibilité à des rapports de branchement $BR(H \rightarrow \text{Invisible})$ supérieurs à 30% est attendue ce qui permet de contraindre les paramètres du MSSM dans le cas de désintégration en neutralinos. Cette étude étant une expérience de comptage, une attention particulière est portée aux méthodes de mesure des bruits de fond.

Les rencontres des Houches en juin 2001 (Physics at TeV Colliders) ont permis d'étendre l'étude de la production de paires de bosons de Higgs au LHC, dans le Modèle SuperSymétrique Minimal, à l'ensemble des paires hh, HH, hH, AA, Ah, AH . Après avoir inclus dans PYTHIA les processus correspondants, nous nous sommes intéressés aux désintégrations d'une paire de Higgs en 4 quarks b . Ces canaux offrent un mode de découverte du Higgs supplémentaire avec une signature supersymétrique claire dans le scénario de mélange typique ($\mu = -1\text{TeV}$, $A_U = A_D = 1\text{TeV}$). Le modèle de mélange maximum, référence habituelle pour les études sur la recherche du Higgs dans ATLAS mais moins favorable pour ces canaux, est actuellement en cours d'étude.

Ces dernières années, les théories aux dimensions supplémentaires ont reçu beaucoup d'attention. Une des plus intéressantes, formulée par Randall et Sundrum (RS), propose un Univers avec une seule dimension supplémentaire, formé de 2 surfaces (branes) à 4 dimensions délimitant une tranche d'espace-temps en 5-d. Les champs du Modèle Standard se situent sur un des branes (celui au TeV), alors que la gravité vit partout ailleurs. Le champ scalaire associé aux fluctuations des positions des 2 branes, le radion (f), joue un rôle important dans la détermination de la phénoménologie de la solution de RS au problème de la hiérarchie. On s'attend à ce que la masse du radion soit de l'ordre de l'échelle électrofaible, et que ses couplages aux champs du Modèle Standard soient de l'ordre du TeV^{-1} . La possibilité d'observer un radion avec le détecteur ATLAS est actuellement étudiée dans le cadre du collisionneur LHC. Ce travail a été entamé pour la rencontre des Houches 2001 et continue maintenant. Ces 3 études vont faire l'objet d'une note ATLAS.

2) Développements des logiciels d'analyse des données d'ATLAS

Depuis le début 2000, une nouvelle activité logicielle a démarré au LAPP ; dans le même temps une remise à zéro complète de tous les logiciels «orienté objet» (OO) d'Atlas a eu lieu. Un nouvel environnement «OO», intitulé ATHENA a été mis en place dans la collaboration à partir de Mai 2000. Depuis cette date et dans ce nouvel environnement, les développements suivants ont été poursuivis au laboratoire:

- Intégration des programmes de lecture et d'analyse des données de faisceau test des modules du tonneau.
 - réalisations: convertisseur des données brutes, lien à une base de données contenant les informations du cahier de bord (logbook informatique), accès interactif aux données brutes.

- en cours: stockage des données brutes dans une base de donnée OO, lien avec la base de données de description du détecteur.

- Création et développement d'une activité «Dictionnaire de Données» (5 personnes dont 3 ingénieurs du LAPP).

- réalisations: choix du langage de description des données (nommé «ADL»), générateur automatique de code incluant l'accès au service actuel de stockage sur une base de donnée OO et à la manipulation interactive des objets,

- en cours: intégration définitive du service «DD» à ATHENA, études sur l'introspection.

Par ailleurs, une refonte de la documentation sur le Web a été effectuée. Plusieurs sites ont été refaits ou refondus : logiciels pour argon liquide, ATHENA, détecteur argon liquide.