

# La préparation des expériences au LHC

*Le LHC (Large Hadron Collider) est le futur accélérateur que le CERN construira dans le tunnel du LEP et qui entrera en fonctionnement en 2005. Il s'agit d'un collisionneur protons-protons dont l'énergie, 14 TeV dans le centre de masse, en fera l'accélérateur le plus puissant au monde et auprès duquel on s'attend à récolter une grande variété de résultats.*

*Le nouveau domaine d'énergie ainsi ouvert doit permettre de trouver les particules «manquantes», si elles existent, du modèle standard actuel de la physique des particules. Dans ce modèle qui unifie les interactions forte, faible et électromagnétique, ont été introduits le ou les bosons de Higgs pour donner une masse à toutes les particules fondamentales (les 6 quarks, les 6 leptons et les bosons W et Z), les photons et les gluons restant sans masse. Le modèle standard contient à très haute énergie des difficultés théoriques qui peuvent être résolues par l'introduction de la supersymétrie qui associe à chaque particule de spin entier (resp. demi-entier) une particule de spin demi-entier (resp. entier). Le grand domaine d'énergie couvert par le LHC devrait permettre de mettre en évidence certaines de ces particules.*

*Les conditions expérimentales auprès du LHC sont difficiles. La petitesse des sections efficaces des processus que l'on veut étudier exige une grande luminosité. Les paquets de protons se croiseront toutes les 25 ns. Les détecteurs devront être très rapides. A chaque croisement se produisent environ une vingtaine d'interactions, appelées événements de biais minimal, inséparables des processus de physique recherchés. Ces mêmes détecteurs devront être aussi granulaires pour éviter d'empiler ces événements dans une même cellule de détection. Ils comporteront un grand nombre de voies. Ils devront être capables d'avoir un déclenchement très sélectif. Enfin ils devront être résistants aux radiations, car le taux très élevé de collision des paquets génère de très nombreuses particules qui traversent les détecteurs causant une forte irradiation de ceux-ci. Deux détecteurs, ATLAS et CMS, seront installés sur l'accélérateur LHC. Il s'agit de deux détecteurs complets conçus pour faire face à un large éventail de découvertes possibles.*



# Expérience Atlas au LHC

## Participation du LAPP

**Physiciens :** J. Colas, B. Aubert, L. Di Ciaccio, M. Gouanère, S. Jézéquel, R. Lafaye, P. Perrodo, G. Sauvage, R. Zitoun, Y. Zolnierowski

**Ingénieurs, Techniciens :** J. Ballansat, J. P. Baud, P. Baudin, B. Beaugiraud, C. Billat, J. Boniface, H. Bonnefon, M. Cailles, F. Chollet, G. Dromby, N. Dumont-Dayot, C. Girard, A. Jérémie, J. Lesueur, A. Masserot, M. Moynot, G. Perrot, J. Prast, X. Riccadonna, O. Taïbi, J. Thion

**Visiteurs :** H. Kambara, M. El-Kacimi, A. Kaczmarska, H. Przysiezniak

**Doctorants :** G. Eynard, N. Massol, L. Neukermans

**Stagiaires :** K. Chalabi, D. Jourdain, S. Monso, L. Neukermans, A. Patin, P. Taluy

## Collaboration

Collaboration internationale regroupant 140 instituts dont 7 laboratoires français: LAPP Annecy, LPC Clermont-Ferrand, ISN Grenoble, CPPM Marseille, LAL Orsay, LPNHE Université Paris 6 et 7, CEA-DAPNIA Saclay.

## Dates clés

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

2000-2002 : Construction du calorimètre électromagnétique

mi-2005 : Premières collisions et premières prises 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 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.

## 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. Un premier module prototype représentant 1/16 d'un demi-tonneau ou module 0 a été construit et testé en faisceau d'électrons ceci afin de valider les choix techniques et de pouvoir démarrer la construction de l'ensemble. Le LAPP a participé aussi à des études de simulation de processus de physique qui ont servi à optimiser le détecteur.

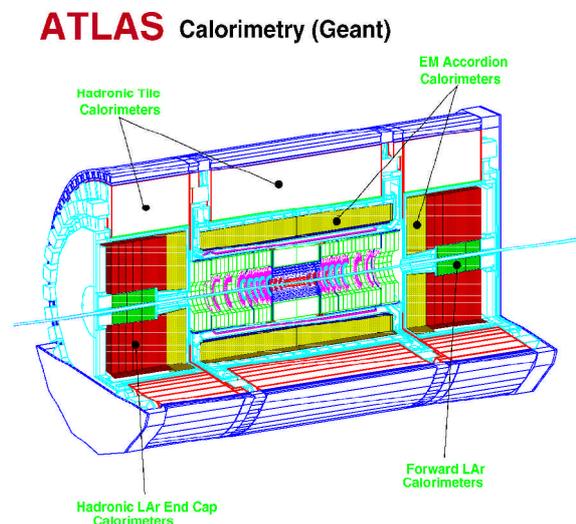


Fig. 1: Le calorimètre ATLAS

Les activités du groupe sont réparties dans les domaines suivants :

## 1. Simulation de processus physiques

La potentialité d'observation du boson de Higgs et de la mesure de sa masse dans la région 80-120 GeV/c<sup>2</sup> avec la production associée  $pp \rightarrow t\bar{t}H, WH, ZH$  où  $H \rightarrow \gamma\gamma$  a fait l'objet de la thèse de G.Eynard. La présence d'un lepton (électron ou muon) de grand moment transverse provenant de la (des) particule(s) produite(s) avec le boson de Higgs détermine la position précise du vertex de l'interaction, réduisant ainsi la contribution angulaire dans l'incertitude sur la mesure de la masse. Une vingtaine d'événements est attendue par année de prises de données en régime de haute luminosité de l'accélérateur, pour une masse du boson de Higgs de 100 GeV/c<sup>2</sup>. Les nombreux bruits de fond ( $pp \rightarrow \gamma\gamma, pp \rightarrow W\gamma\gamma, pp \rightarrow Z\gamma\gamma, pp \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$  ou d'une manière générale tout processus menant à l'état final  $\gamma\gamma + \text{lepton} + X$ ) donnent une faible contribution, compte tenu des pouvoirs de réjection des jets prévus pour le détecteur.

Suite aux rencontres des Houches du mois de juin 1999 sur la physique auprès des futurs collectionneurs au TeV entre expérimentateurs et théoriciens, le groupe ATLAS a choisi de s'intéresser à l'étude de la production de paires de bosons de Higgs au LHC. En plus de fournir un canal supplémentaire pour la découverte du boson de Higgs dans le cadre du modèle supersymétrique minimal, la production de paires de bosons de Higgs permet d'étudier les auto-couplages tri-linéaires du Higgs afin de mieux cerner le mécanisme de Higgs. Pour cette étude, les processus principaux de création de paire de Higgs au LHC ont été implémentés dans PYTHIA à partir des éléments de matrice, et une étude détaillée a commencé à partir de ce générateur.

## 2. Conception et pliage des électrodes

Le laboratoire s'est engagé dans la réalisation des grandes électrodes pliées en accordéon. La difficulté principale a résidé dans le choix de matériaux capables d'être mis en œuvre de façon homogène sur de grandes dimensions. Pour cela nous avons conçu et réalisé une machine pneumatique complètement automatisée. L'intérêt de celle-ci est multiple, elle minimise les manipulations pouvant endommager les électrodes et elle permet de plier différents matériaux aux propriétés variables. Après pliage, un cycle thermique permet de relâcher les contraintes mécaniques. Un four programmable a été acquis à cet effet. Cet ensemble permet de traiter 8 demi-électrodes par jour, ce qui est adapté aux cadences de production, de test et d'assemblage. Plus de 200 électrodes pour la mise au point et le module 0 ont été pliées à ce jour. Le projet global concerne les 4096 demi-électrodes du calorimètre central. Les contrôles électriques des électrodes pliées se feront au LPNHE à Paris et à Milan.

## 3. 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.

### a) Anneaux extérieurs et intérieurs

Les anneaux extérieurs sont réalisés en plusieurs étapes : pré-usinage des rayons intérieur et extérieur à 2 mm de la cote finale, mesure de la déformation à 1,5 fois la charge nominale, usinage des rayons finals avec une précision de 0,1 mm et enfin perçage des trous pour fixer les absorbeurs du calorimètre sur les arceaux. Les 14 anneaux ont été pré-usinés, les mesures de déformation sous charge avec un bâti d'essai réalisé au laboratoire ont donné les résultats escomptés. L'usinage final des rayons pour la première série a été effectué et le perçage des trous est en cours.

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). Plusieurs prototypes d'arceaux internes ont été réalisés. Un banc de traction de cet arceau, réalisé par nos collègues du CERN, a été utilisé pour valider les prototypes. Les dilatations différentielles des arceaux extérieurs, des absorbeurs et des arceaux internes font qu'à froid (température de l'argon liquide) les arceaux intérieurs subissent une traction d'environ 2 tonnes. Le prototype final a été testé avec succès à une tension de plus de 3 tonnes. Le marché de l'ensemble des arceaux internes vient d'être lancé. Un gabarit de contrôle des dimensions des arceaux internes est en cours de réalisation.

### b) Assemblage des modules

Pour réaliser l'empilage des 64 absorbeurs et 64 électrodes d'un module, un ensemble backbone - arceaux extérieurs est placé sur un bâti-retourneur (figure 2) étudié au laboratoire et réalisé dans l'industrie. Des gabarits permettent de positionner avec précision l'ensemble backbone - arceaux extérieurs sur le bâti-retourneur ainsi que de vérifier le positionnement des absorbeurs sur les arceaux extérieurs et intérieurs pendant l'opération d'empilage. Des espaceurs en nid d'abeille sont placés entre les absorbeurs et les électrodes pour assurer la constance de l'espace absorbeur - électrode.

Le module 0, module de présérie, a été assemblé 2 fois : la première fois avec un petit nombre d'électrodes (été 1998) et la deuxième fois avec plus de la moitié des électrodes (printemps 1999). Un certain nombre d'outillages complémentaires (outillage de manutention et de stockage des absorbeurs, faux arceaux intérieurs, outillage de maintien des électrodes pendant le montage,...) ont été réalisés pour faciliter le montage. Après empilage de chaque électrode, une série de tests permet de vérifier l'intégrité électrique des circuits, la tenue en haute tension de l'électrode montée, et de contrôler la distance entre absorbeurs au moyen d'une mesure de capacité.

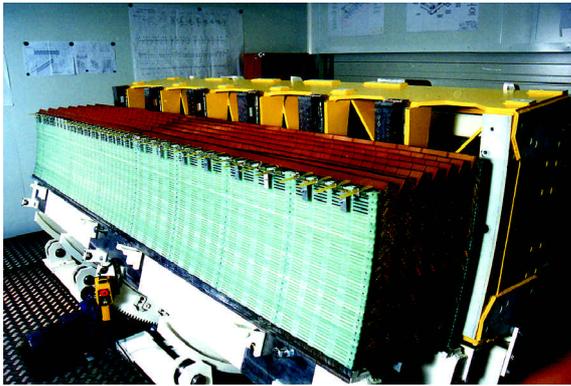


Fig. 2 : Le module 0 en cours d'empilage

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

Le module de présérie a été câblé à deux reprises ce qui a permis de valider les solutions préconisées pour la fixation des câbles (patch panel) et leur protection. Le module, une fois câblé, est connecté à un banc de tests pour mesurer plusieurs paramètres tels que la réponse à une impulsion de calibration ou les capacités de couplage entre cellules. Un essai de tenue en tension est réalisé avec le câblage définitif.

Le laboratoire a participé à l'étude et à la réalisation d'une fraction importante de l'électronique utilisée pour les tests durant le montage et après câblage et a développé les programmes d'exploitation. L'ensemble des circuits, pour les différents sites d'assemblage, ont été produits et réceptionnés. Ces mesures ont été faites à chaud et seront répétées ultérieurement, le module plongé dans un bain d'argon liquide. Ce module a été ensuite transporté au CERN, introduit dans le cryostat de test et exposé à un faisceau d'électrons (Fig. 3).

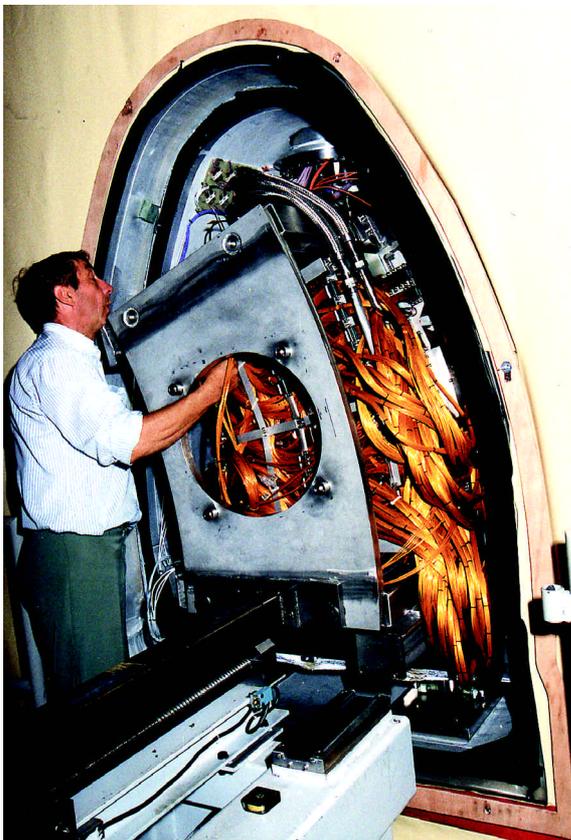


Fig. 3 : Module 0 en cours d'introduction dans le cryostat du faisceau test au CERN

### d) Aménagement du hall de test

Après assemblage, les futurs modules seront transportés dans le hall de test pour être câblés et subir la série de tests de qualification. Ce hall a été réaménagé pour permettre simultanément le câblage d'un module et le test au froid d'un autre module. Pour cette dernière série de tests une station cryogénique comprenant un cryostat de 5 m<sup>3</sup> pouvant recevoir le module et deux réservoirs de stockage de fluides cryogéniques, un d'argon et un d'azote, a été assemblée avec le support technique du CEA Saclay. La vaporisation de l'azote liquide dans un échangeur permet de refroidir le module et de stabiliser la température du bain d'argon liquide. Les principales étapes du test cryogénique qui dure environ trois semaines sont les suivantes:

- Le module est refroidi à la vitesse de 2 degrés par heure puis l'argon liquide est transféré du réservoir vers le cryostat.
- Durant une semaine le module est maintenu dans le bain d'argon liquide pour refaire les tests précédemment décrits. La pureté de l'argon est contrôlée pour détecter toute pollution venant du module.
- Les tests terminés, l'argon est renvoyé dans le réservoir et le module est réchauffé à la vitesse de 2 degrés par heure. Il est extrait du cryostat et préparé pour son transport vers le CERN. Le module assemblé au cours de l'année 1999 devrait être mis en froid à la fin de l'année pour un test de longue durée.

## 4. Electronique

### a) Carte électronique d'étalonnage

L'injection d'impulsions électriques d'étalonnage exponentielles décroissantes 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 1/1000 est recherchée). Le laboratoire a participé avec le LAL à la réalisation de deux cartes prototypes comportant 128 canaux chacune, en concevant entièrement la partie numérique qui pilote les circuits analogiques. Onze cartes supplémentaires ont ensuite été produites sur ce modèle, qui servent dans les laboratoires et lors des campagnes de tests en faisceau. Ce travail entre à présent dans la phase de conception d'une carte finale, munie d'un nouveau système numérique et résistante aux radiations. Un prototype de cette nouvelle logique est en cours de fabrication pour étude et validation. Il sera ensuite transféré en technologie DMILL, avant de commencer la production des 120 cartes définitives nécessaires à l'étalonnage du détecteur à argon liquide.

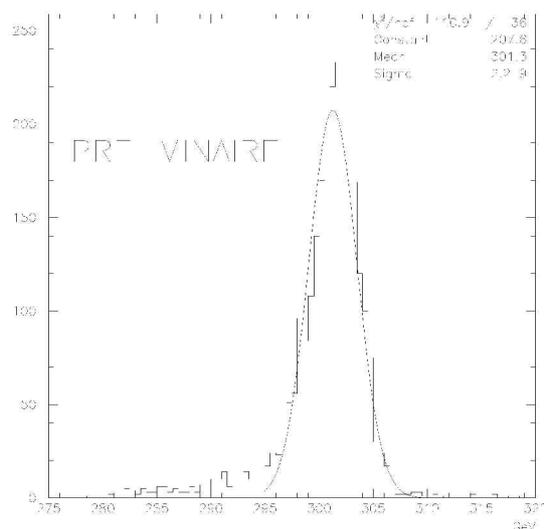
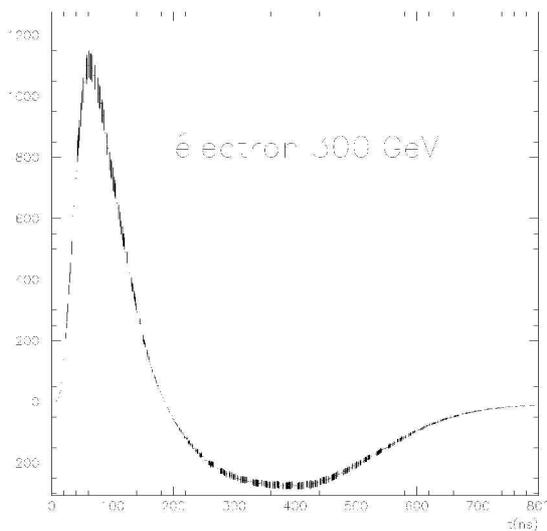
### b) Electronique de traitement du signal

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 (estimés à 23 par croisement), un taux de déclenchement de premier niveau de 75 kHz et une dynamique voisine de 50000.

Le groupe travaille depuis longtemps sur la conception de l'électronique de lecture (mise en forme rapide, choix des gains), les méthodes de traitement du signal (filtrage optimal)

permettant la reconstruction de l'énergie déposée dans le calorimètre ainsi que la réalisation de cartes électroniques réalisant ces traitements. Ces études ont débouché sur l'idée de fabriquer une carte ROD (ReadOut Driver) pour réaliser ces tâches de calcul rapide dans l'expérience ATLAS.

En parallèle une carte appelée miniROD, munie de mémoires rapides, permettant de lire les données numérisées provenant des nouvelles cartes «front end» (FEB), a été conçue et réalisée au laboratoire, en collaboration avec le CPPM. Cette carte a été produite à 51 exemplaires. Elles sont utilisées lors des tests de qualification en faisceau au CERN des modules des calorimètres à argon liquide (électromagnétique central et bouchon, hadronique). Le groupe a en outre pris en charge la maintenance de ces cartes.



Figs 4 et 5 : Forme de l'impulsion et résolution en énergie obtenue en ligne

Maintenant, le groupe participe à la réalisation de la carte ROD définitive. Une carte démonstratrice a été élaborée pour permettre la comparaison de plusieurs DSP (Digital Signal Processor) et le choix d'une architecture appropriée aux besoins de calcul nécessaires pour une bonne reconstruction des signaux calorimétriques. L'étude de cette carte nécessite un injecteur de données, simulant celles provenant des FEBs. Une telle carte est en cours de réalisation au laboratoire.

## 5) Participation aux campagnes de tests en faisceau

Deux versions successives du module prototype ont été assemblées au LAPP et testées en faisceau au CERN, en novembre 1998 et en août 1999 (figure 3).

Le groupe a pris entièrement en charge la mise au point du système de déclenchement, l'installation des miniRODs, leur programme d'acquisition ainsi que les programmes de chargement de l'ensemble des cartes électroniques. Ces responsabilités sont assumées aussi bien pour le dispositif de test en faisceau du tonneau que du bouchon. La participation intense aux périodes de prise de données et à leur analyse a déjà permis de mieux comprendre divers aspects techniques des modules prototypes ainsi que leurs performances calorimétriques, afin de parfaire la réalisation de la série à partir de l'an prochain. Les figures 4 et 5 illustrent les premiers résultats obtenus : forme de l'impulsion électrique recueillie après mise en forme et courbe de résolution en énergie pour des électrons de 300 GeV.

## RAPPORTS

- ATLAS Detector and Physics performance TDR CERN/LHCC 99-14 99-15 Volume I et II, 25 mai 1999.
- Results from a new combined test of an electromagnetic liquid argon calorimeter with a hadronic scintillating-tile calorimeter, CERN-PPE/99-xx.

## STAGES

- P. Taluy : Assemblage et tests électriques du calorimètre électromagnétique du détecteur ATLAS.
- A. Patin et D. Jourdain : Carte MUX-CAPA GBF.
- S. Manso : Study of the ATLAS electromagnetic calorimeter module 0.
- L. Neukermans : Etude du module prototype de la partie tonneau du calorimètre à argon liquide du détecteur ATLAS : étude du positionnement et du signal des muons.

Voir aussi liste des publications et communications à des conférences en fin de rapport.