



**Analyse des premiers signaux de calibration  
du calorimètre électromagnétique d'ATLAS**

Expérience ATLAS au LHC (Cern)  
pour la détection du boson de Higgs

Julien Baglio  
Stage L3 PhyTEM sous la direction de Caroline Collard  
équipe ATLAS du LAL

3 juillet 2006

## Table des matières

<b>1 Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 Le laboratoire LAL . . . . .	2
1.2 L'expérience ATLAS . . . . .	2
1.3 Description du détecteur ATLAS et de son calorimètre électromagnétique . . . . .	4
<b>2 Travail effectué : calibration du calorimètre EM</b>	<b>7</b>
2.1 Étude des données de calibration . . . . .	7
2.2 Modélisation électrique du calorimètre . . . . .	7
2.2.1 Modèle électrique : introduction . . . . .	7
2.2.2 Le travail de modélisation . . . . .	8
<b>3 Conclusion</b>	<b>10</b>
<b>A Photos du détecteur ATLAS</b>	<b>11</b>
<b>B Graphes d'étude des données de calibration</b>	<b>12</b>
<b>C Graphes de la modélisation électrique</b>	<b>14</b>

## 1 Introduction

Ce stage en laboratoire a été effectué au LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire), unité CNRS-IN2P3 implantée à Orsay (Bâtiment 200). A la date de soutenance de stage, ce dernier n'est pas terminé car j'ai pris la décision de le continuer au-delà de la durée des 5 semaines, par passion pour le travail effectué.

Avant d'aborder le contenu du stage proprement dit, je me propose de présenter mon laboratoire d'accueil et de brosser une courte introduction sur l'expérience ATLAS.

### 1.1 Le laboratoire LAL

Le LAL est un laboratoire né il y a 50 ans. Son domaine de recherche historique est la physique des particules, et depuis sa création il a été étendu à l'étude des astroparticules et de la cosmologie. Le laboratoire mène aussi un programme de recherches et développements dans le domaine des accélérateurs de particules.

Il compte 311 personnes au 1<sup>er</sup> janvier 2005 : 65 chercheurs et enseignant-chercheurs permanents, 19 chercheurs non-permanents, 12 doctorants, 214 ingénieurs, techniciens et administratifs permanents dont 7 en CDD.

Historiquement, le laboratoire abrita un accélérateur linéaire dans les années 1950, à des énergies de l'ordre de la centaine de MeV. Par la suite, un collisionneur en anneau fut créé, et le laboratoire s'impliqua de plus en plus dans des expériences du CERN. Notamment, sous l'impulsion d'André Lagarrigue, le LAL fut un des acteurs de la découverte au CERN des courants neutres dans les années 70 grâce au détecteur Gargamelle. Plus récemment, il participa à la construction des détecteurs DELPHI et ALEPH auprès du LEP.

De nos jours, le laboratoire n'a plus d'accélérateur sur place. Il s'investit dans plusieurs collaborations internationales, autant en physique des particules qu'en astrophysique et cosmologie. Citons, entre autres, les participations au détecteur Pierre Auger (qui s'intéresse à l'étude des rayons cosmiques), à BaBar (étude de la violation CP au SLAC), ATLAS (qui est le sujet du stage), NEMO (étude des neutrinos et de la désintégration double  $\beta$ ).

L'équipe d'accueil du stage est l'équipe ATLAS du LAL, composée de 17 physiciens permanents. Les recherches au LAL sont centrées sur le calorimètre électromagnétique (EM) d'ATLAS, aussi bien en ce qui concerne sa construction que pour les simulations, et l'équipe s'investira dans la prise de données dès le démarrage du LHC en 2007. Le calorimètre sera décrit plus précisément dans la suite du rapport.

### 1.2 L'expérience ATLAS

L'expérience ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) est une collaboration internationale de 1700 physiciens environ, dont les objectifs sont nombreux et cruciaux (Higgs, supersymétrie entre autres). C'est une des deux expériences généralistes qui se dérouleront après du LHC, le grand collisionneur de protons, qui fonctionnera de manière opérationnelle à partir de 2007.

Un de ses objectifs principaux est la détection du boson de Higgs. Pour bien cerner les enjeux de cette détection, je me propose de faire un bref rappel théorique sur le Modèle Standard.

Le Modèle Standard des particules est actuellement la théorie qui décrit les constituants élémentaires, et les interactions entre ces constituants. La construction théorique du modèle est achevée à peu près vers 1973, les expériences effectuées afin de valider ce modèle étant encore en cours. Citons comme dernière découverte expérimentale de poids, la découverte du quark top en 1995, dernier élément de la famille des 6 quarks.

Mathématiquement parlant, le Modèle Standard repose sur la notion de symétrie, notamment de symétrie de jauge, et sur la théorie de représentation de groupes de Lie. Les interactions sont décrites par le groupe  $SU(3) \otimes (SU(2)_L \otimes U(1)_Y)$ .  $SU(3)$  représente le groupe de l'interaction forte qui lie les quarks constitutifs des neutrons et protons,  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  représente le groupe de l'interaction électrofaible, unification de l'interaction faible responsable des désintégrations radioactives et de l'interaction électromagnétique.

Or il se trouve que pour des raisons de cohérence interne, il faut que les particules du Modèle Standard soient sans masse. Pourtant, les bosons de jauge de l'interaction faible (les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$ ) sont des bosons massifs (respectivement 80 et 91 GeV en unités naturelles). Le mécanisme de Higgs permet de résoudre ce problème de brisure de symétrie électrofaible : ces bosons se couplent à un nouveau champ scalaire dit de Higgs et acquièrent ainsi une masse ; le photon est à masse nulle. Ce nouveau champ requiert une nouvelle particule : le boson de Higgs, qu'il reste à découvrir et qui est l'objectif principal de l'expérience ATLAS.

Cette particule est préjugée très massive, puisque l'on n'a pu l'observer jusque ici. Les expériences au LEP la placent à plus de 114 GeV, et dans le cadre du Modèle Standard sa masse est inférieure à 1 TeV. Elle connaît plusieurs modes de désintégration dont l'un d'eux, pour ce qui est de la région de la centaine de GeV (voir figure 1), est particulièrement étudié au sein d'ATLAS : la désintégration  $H \rightarrow \gamma\gamma$  après production par fusion gluon-gluon  $gg \rightarrow H$ .

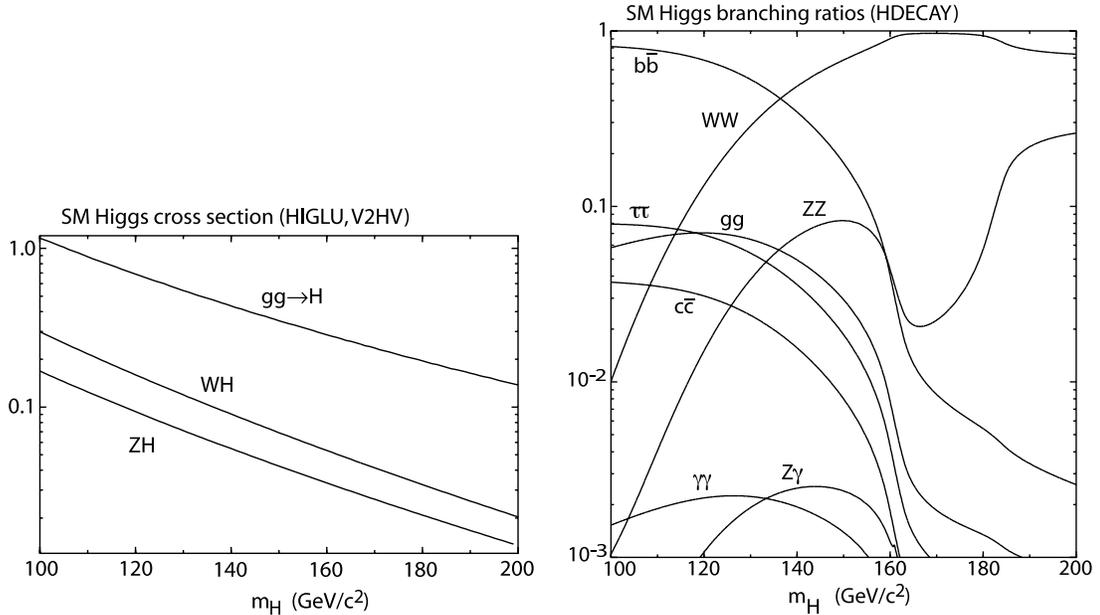


FIG. 1 – Section efficace de production du Higgs (à gauche), Taux de branchement en désintégration (à droite)

Afin de pouvoir détecter de tels événements, le détecteur ATLAS est construit et installé dans l'anneau de collisions du LHC. Je me propose donc de décrire et d'étudier le fonctionnement de ce détecteur.

### 1.3 Description du détecteur ATLAS et de son calorimètre électromagnétique

Le détecteur ATLAS (voir figure 2) est constitué d'un détecteur de trace qui mesure l'impulsion des particules chargées, d'un calorimètre électromagnétique pour la mesure de l'énergie des électrons et des photons, d'un calorimètre hadronique qui mesure l'énergie des particules hadroniques et enfin d'un spectromètre à muons. Haut de 25 m, il est installé sur l'anneau de collisions du LHC.

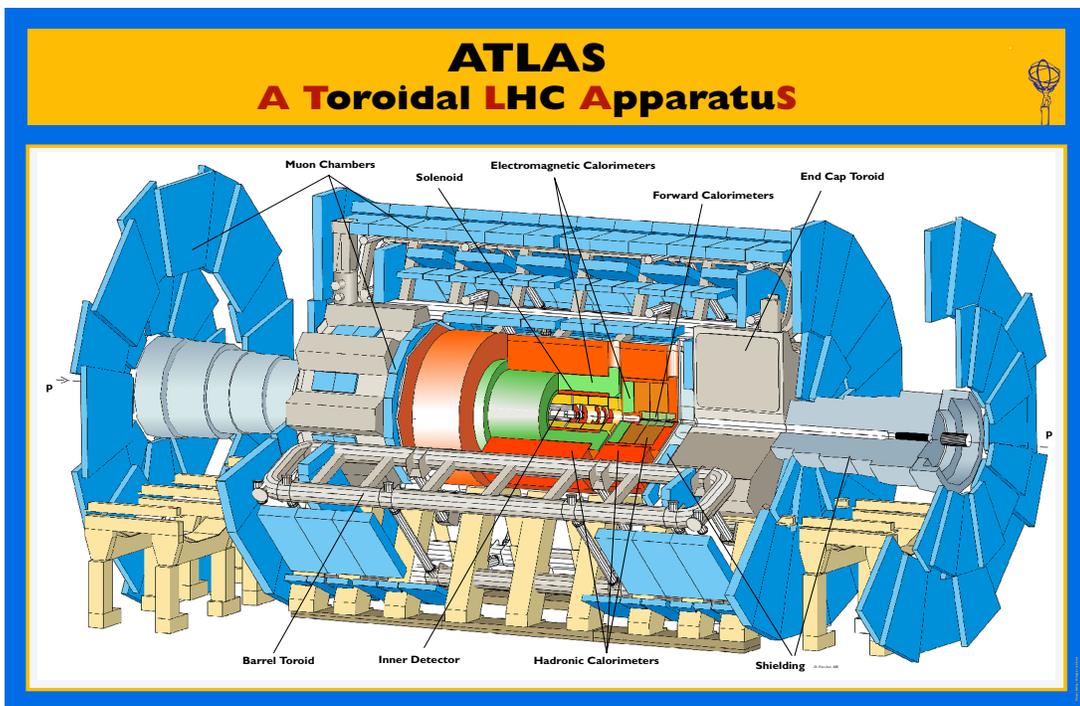


FIG. 2 – Schéma du détecteur ATLAS

L'équipe ATLAS du LAL a participé à la construction du calorimètre électromagnétique et aux tests en faisceau ; elle participe maintenant à la phase de préparation du détecteur, aux simulations détaillées d'événements et à l'étude des signaux de calibration du calorimètre électromagnétique, ce qui est le sujet de stage. Lorsque les données physiques seront là, le laboratoire s'impliquera dans leur analyse.

La détection d'événements  $H \rightarrow \gamma\gamma$  se fait, en terme d'énergie, par le calorimètre électromagnétique. C'est un canal difficile car il y a beaucoup de bruit de fond dû aux événements diphotons, ou lorsque il apparaît des jets de particules qui peuvent se faire passer pour des photons (voir figure 3). Ainsi, il est nécessaire de bien comprendre la forme du signal que l'on doit obtenir. C'est pourquoi un effort important est fourni sur l'étude des signaux de calibration.

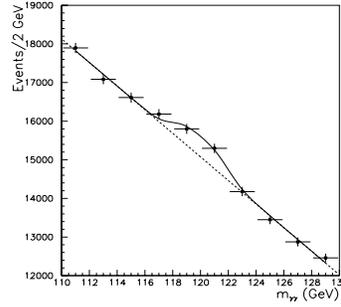


FIG. 3 – Résonance en nombre d'événements dans la région du boson de Higgs en énergie, luminosité intégrée de  $100 \text{ fb}^{-1}$

Le calorimètre électromagnétique est un calorimètre à argon liquide. Son but est de mesurer l'énergie des électrons et des photons par absorption de cette énergie par le milieu détecteur. Pour les électrons, la perte d'énergie se fait par rayonnement dit Bremsstrahlung, et on définit une longueur  $X_0$  typique de radiation telle  $X_0$  est la longueur du matériau traversée pour laquelle l'énergie est réduite d'un facteur  $1/e$  pour l'électron. Pour la détection des photons, celle-ci se fait par création de paire électrons/positrons, ce qui donne naissance à une gerbe électromagnétique au sein du milieu. Ces deux phénomènes induisent un signal électrique que l'on achemine ensuite par câbles (dont les longueurs sont différentes afin d'avoir un temps d'arrivée identique) vers la carte d'acquisition électronique.

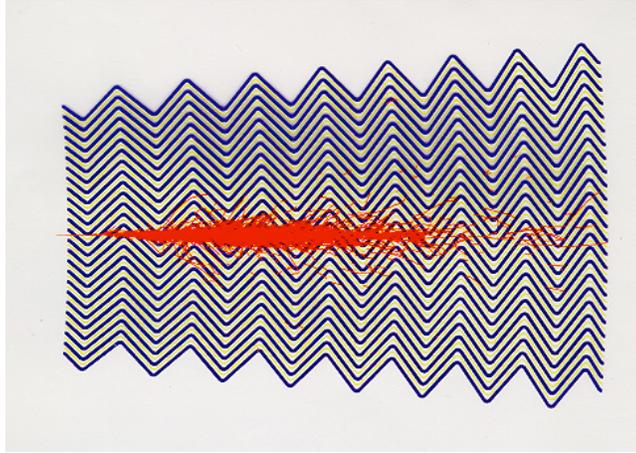


FIG. 4 – Développement d'une gerbe au sein du calorimètre

Une géométrie en accordéon a été choisie pour la réalisation des cellules du calorimètre (développement dû à Daniel Fournier, responsable de l'équipe ATLAS du LAL), afin de réduire le bruit et d'avoir une plus grande rapidité de réponse. On définit une variable appelée pseudo-rapidité,  $\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$ . Ceci permet de distinguer les orientations (utile pour dénombrer les événements) pour une même ouverture angulaire. La région couverte par la partie centrale du calorimètre est  $|\eta| \leq 1.4$ .

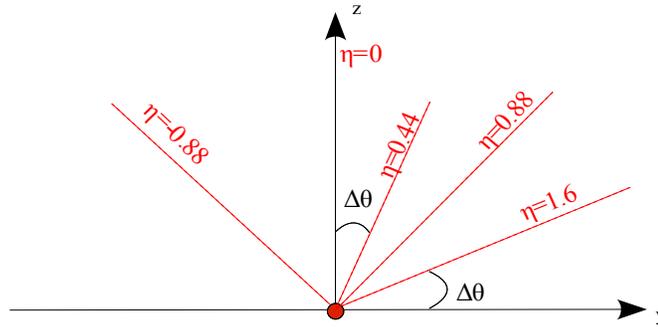


FIG. 5 – Schéma explicatif sur  $\eta$  : à un même  $\Delta\theta$  correspond des  $\eta$  différents selon l'orientation

Le calorimètre est divisé en trois compartiments (plus le presampler qui donne des infos proportionnelles l'énergie déposée avant le calorimètre) : l'avant (front), le milieu (middle) et l'arrière (back). Chacun de ces compartiments sont divisés en plusieurs régions (slots) qui comprennent chacune 128 canaux (channels). Afin de faire la transition entre le milieu ambiant et le calorimètre à très basse température pour l'argon liquide, les câbles passent à travers ce qu'on appelle le feed-through (FT).

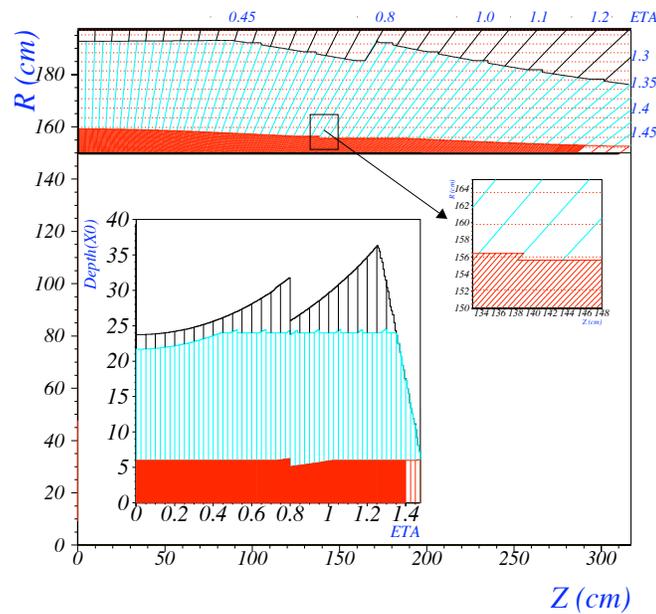


FIG. 6 – Schéma du calorimètre EM (R rayon à partir de l'axe de la collision, Z direction du faisceau) - en rouge le front, en bleu turquoise le middle et en noir le back

La figure 6 représente la division du calorimètre en slots et channels ; elle représente un seul FT (3 % du calorimètre) et c'est pourquoi le dernier slot du middle n'a que 64 canaux connectés, les 64 autres étant reliés à un autre FT. Les deux slots du back sont les slots 9 et 10, séparés à  $\eta = 0.8$ . Chacun d'eux sont au-dessus respectivement des slots 11,12 et 13,14 du middle, puis

ces derniers sont au-dessus des slots 2,3 ; 4,5 ; 6,7 et enfin 8 pour ce qui concerne les slots du front.

Le travail qui va suivre concerne principalement les slots du middle.

## 2 Travail effectué : calibration du calorimètre EM

### 2.1 Étude des données de calibration

Le travail réalisé au cours du stage concerne les signaux de calibration du calorimètre électromagnétique. Les données de travail ont été accumulées en février 2006 (données Expert-Week.root). Dans un premier temps, le travail a consisté à manipuler les données à l'aide du logiciel ROOT et en programmant en C/C++ : étude de l'amplitude du signal, distinction des différents slots et des différents compartiments : back, middle, front.

Ce premier travail permet de comprendre la forme des signaux, et de détecter les canaux défectueux, lorsque il y a déviation par rapport au reste des canaux. Ce fut l'occasion de faire mes premiers pas en C++ à travers le logiciel ROOT, lorsque il faut par exemple recentrer tous les signaux - qui ne partent pas nécessairement au même moment - et les accorder, car il y a un piedestal qui n'est pas nécessairement le même pour tous les signaux et qui n'a pas de signification pour le signal de physique car il est dû au bruit électronique.

Ainsi, la comparaison des maxima sur les divers slots du middle permet de distinguer les slots 11,12 des slots 13,14. Le tracé des amplitudes permet de voir que les channels 91 à 95 étaient déviants au sein du slot 13 (figures 10,11 et 12 de l'annexe B).

Ce premier travail a duré les deux premières semaines. Il fut le prélude nécessaire de la deuxième partie du travail, qui concerne la modélisation électrique du calorimètre, afin de prédire la forme du signal et d'ajuster au mieux les paramètres libres du calorimètre.

### 2.2 Modélisation électrique du calorimètre

Avant de débiter l'ajustement proprement dit, il est nécessaire de décrire la modélisation choisie pour le calorimètre. Deux effets principalement ont été pris en compte :

- les effets de peaux ;
- les réflexions simple et double au sein des câbles.

#### 2.2.1 Modèle électrique : introduction

On utilise le schéma de travail de la figure 7 pour modéliser le calorimètre.

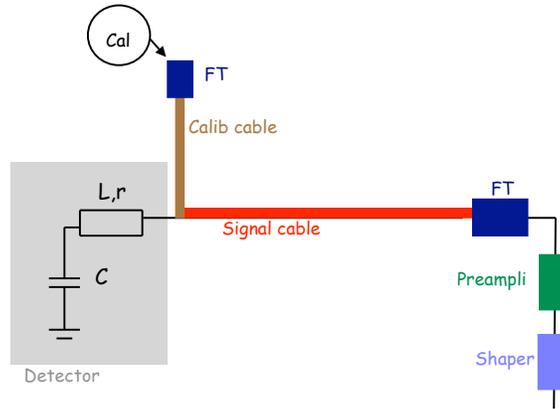


FIG. 7 – Modèle électrique du calorimètre

Avec des mesures, on accède aux paramètres suivants :

- $L, r$  et  $C$  (respectivement l'induction, la résistance et la capacité du détecteur), paramètres du détecteur
- pour le signal de calibration :  $T_{\text{cali}}$  et  $F_{\text{step}}$
- pour les divers câbles et le FT :  $Z$  (impédance),  $L$  (pour la longueur) et  $K$  (pour l'effet de peau)
- pour le préampli :  $Z_{pA} = 25 \Omega$  environ, cela dépend de la fréquence

Le shaper sert à mettre en temps le signal afin que ce dernier soit exploitable, puisqu'il y a une collision toute les 25 ns. Il y a deux paramètres libres :

- $T_{\text{shaper}}$  qui vaut cependant dans les 15 ns et qui est le temps de mise en forme du shaper
- $Z_{\text{line},s}$  qui a une dispersion sur sa valeur :  $23 \leq Z_s \leq 28 \Omega$ .  
C'est l'impédance du câble de signal (en rouge sur la figure 7)

On a tenu compte des simples et double réflexions, dûes à la différence d'impédance des câbles traversés ainsi qu'au retour sur le détecteur. Le code C++ a été fourni et le travail principal a été l'étude des fonctions de transfert ainsi que de l'optimisation de l'ajustement, comme vu dans la suite du rapport.

### 2.2.2 Le travail de modélisation

Après avoir effectué un travail préliminaire sur les fonctions de transfert directes et de réflexions afin de déterminer quelles fréquences garder dans la transformée de Fourier, j'ai décidé de couper à 50 MHz.

L'étude de l'influence des paramètres libres montre que  $T_{\text{shaper}}$  influence la largeur du signal ainsi que le temps de montée,  $Z_{\text{line},s}$  influence la largeur et le temps de descente. Après cette étude et quelques tracés au jûgé, un test de moindres carrés a été mis en oeuvre afin de déterminer

aux mieux ces deux paramètres. Ainsi j'ai minimisé

$$\chi^2 = \frac{1}{Max_{data}} \left[ \frac{\sum (Ampl_{data} - Ampl_{mod})^2}{N_{data}} \right]^{1/2}$$

Ici  $Ampl_{data}$  est l'amplitude des données de calibration,  $Ampl_{mod}$  est l'amplitude modélisée,  $Max_{data}$  désigne le maximum de la courbe de calibration et  $N_{data} = 728$  ns est le temps d'étude du signal.

Les résultats sont concluants, se référer à l'annexe C, figure 14. Globalement, il apparaît que l'évolution de  $Z_{line,s}$  est une gaussienne. Pour les 64 premiers channels du slot 12, la moyenne est de  $26.1 \Omega$  et l'écart-type est  $\sigma = 0.7 \Omega$  (annexe C, figure 15).

### 3 Conclusion

Ce stage, que j'ai décidé de prolonger jusqu'au 13 juillet, a été riche d'enseignements et de découvertes.

Il m'a permis d'apprendre à manier ROOT, un logiciel très répandu dans le domaine de la physique des particules pour l'exploitation des données expérimentales. Par la même occasion, j'ai appris le langage C/C++. J'ai ainsi pu mettre en pratique les connaissances acquises au cours de l'année pendant le cours de physique numérique.

J'ai aussi pu me familiariser avec la physique des détecteurs de particules au travers du détecteur ATLAS, et surtout aux techniques de calorimétrie pour la mesure de l'énergie des particules produites lors d'une collision. Nul doute que ces nouvelles connaissances acquises au travers de ce stage me seront très profitables pour la suite de mon cursus, étant donné ma volonté de m'orienter dans ce domaine de la physique.

Il me reste encore du travail pour la fin de ce stage. Notamment, le code actuel est assez long à tourner. Afin d'améliorer cela, une méthode auto-cohérente sera mise en oeuvre, par la prédiction préalable d'une valeur pour  $T_{\text{shaper}}$  en faisant de petits calculs sur des moyennes de temps de montée.

Enfin, quelles sont les perspectives pour ATLAS ? A partir de septembre, une nouvelle phase de test va débuter en utilisant les rayons cosmiques. La construction du détecteur sera achevée à l'été 2007, et les premiers faisceaux devraient débuter à l'automne 2007.

Je voudrais remercier ici toute l'équipe ATLAS du LAL pour son accueil formidable durant ce mois de juin. Ils m'ont beaucoup aidé et j'ai énormément appris auprès d'eux. Je pense notamment à Caroline, ma tutrice de stage, mais aussi à Daniel, Louis, Lydia, Luc, Dirk, Marumi et à tous les autres.

A Photos du détecteur ATLAS

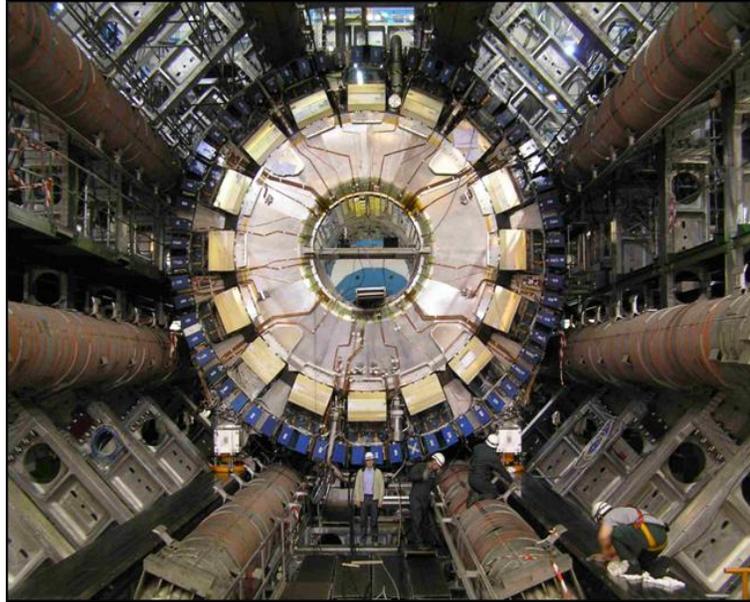


FIG. 8 – Le détecteur Atlas en cours de construction au CERN (novembre 2005)

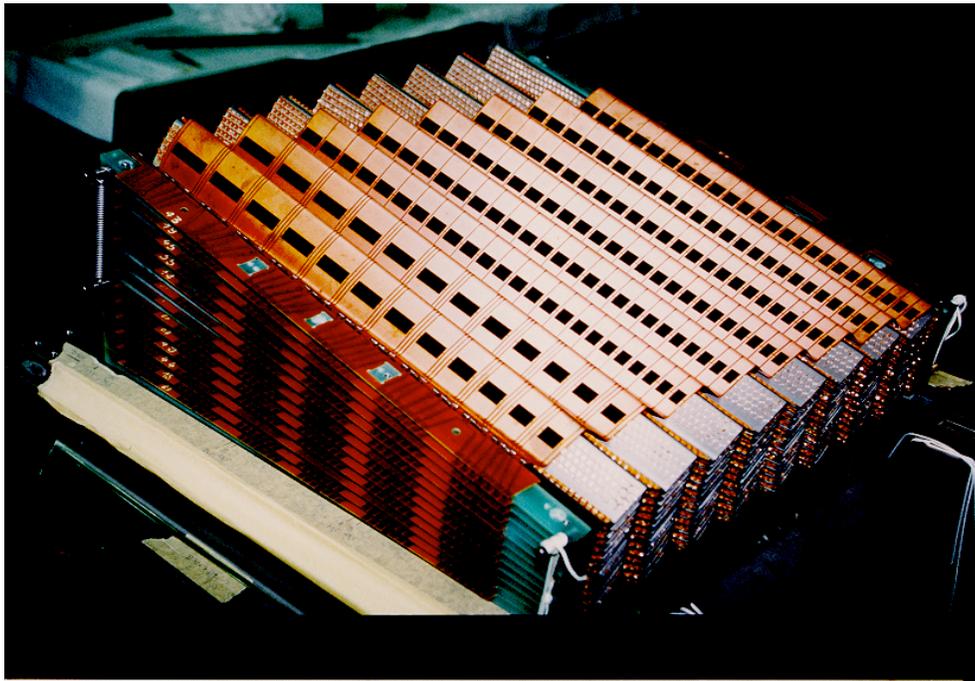


FIG. 9 – Une portion du calorimètre électromagnétique et de sa structure en accordéon

## B Graphes d'étude des données de calibration

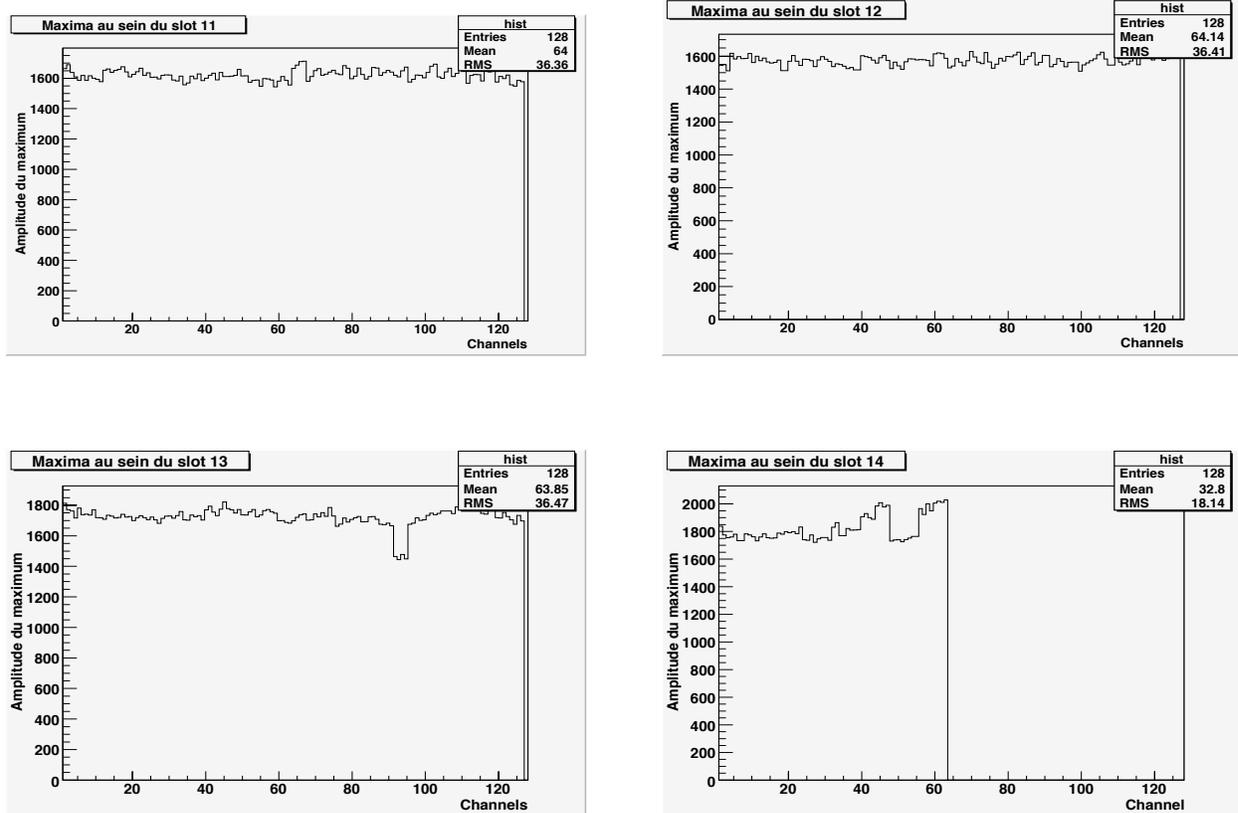


FIG. 10 – Maxima au sein du middle en fonction des channels

On voit bien sur ces quatre graphes la différence entre les deux groupes de slots au sein du middle : groupe 11-12, groupe 13-14. De plus, les slots défectueux au sein du slot 13 sont bien visibles.

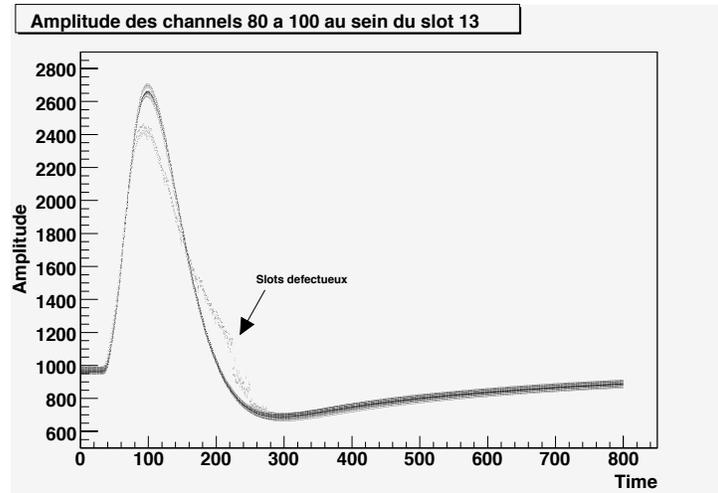


FIG. 11 – Tracé de quelques pulses au sein du slot 13 et mise en évidence graphique des slots défectueux

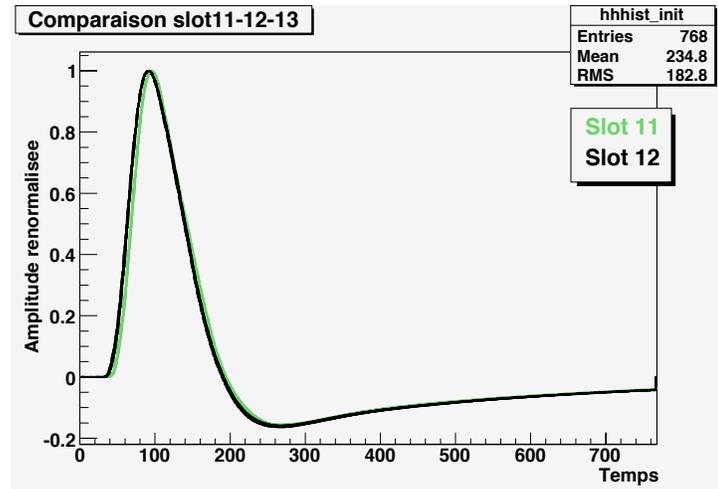


FIG. 12 – Tracé des pulses des slots 11 et 12 après renormalisation et recentrage : la superposition est quasi-parfaite

### C Graphes de la modélisation électrique

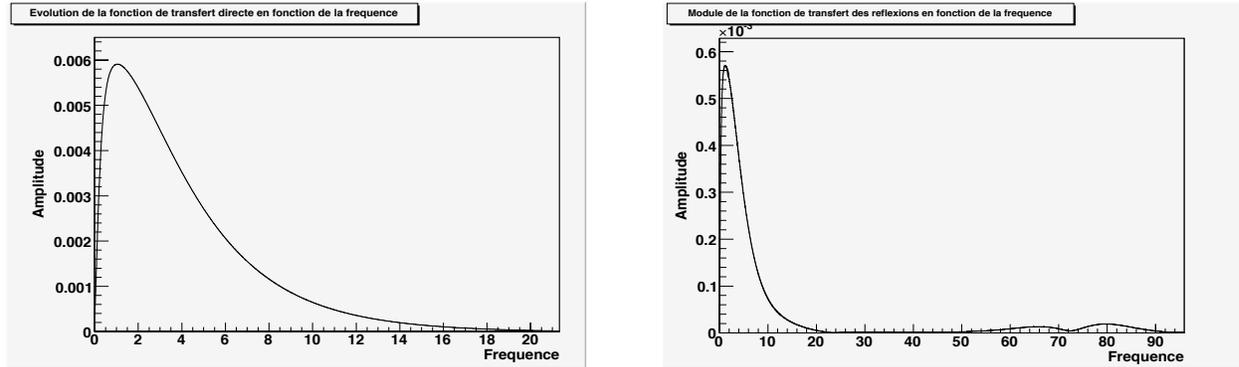


FIG. 13 – Fonction de transfert du modèle : voie directe à gauche, réflexions à droite

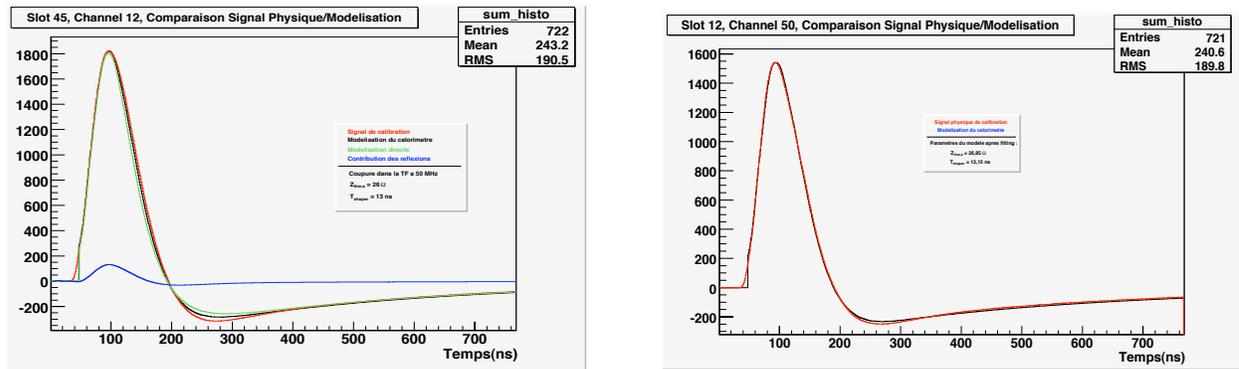


FIG. 14 – Comparaison entre données de calibration et modélisation

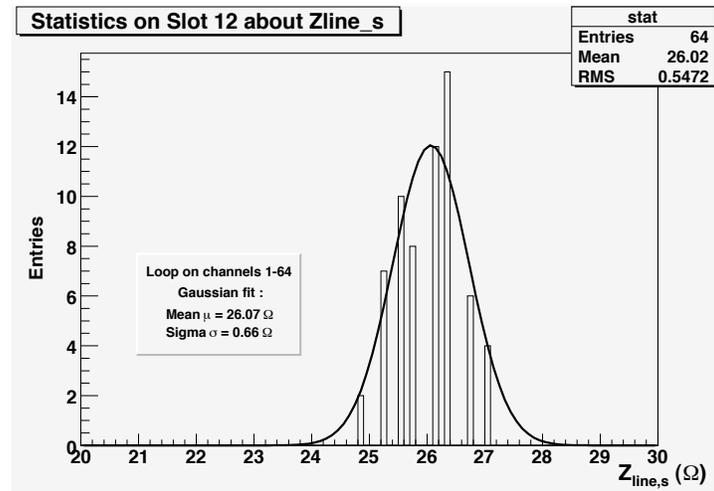
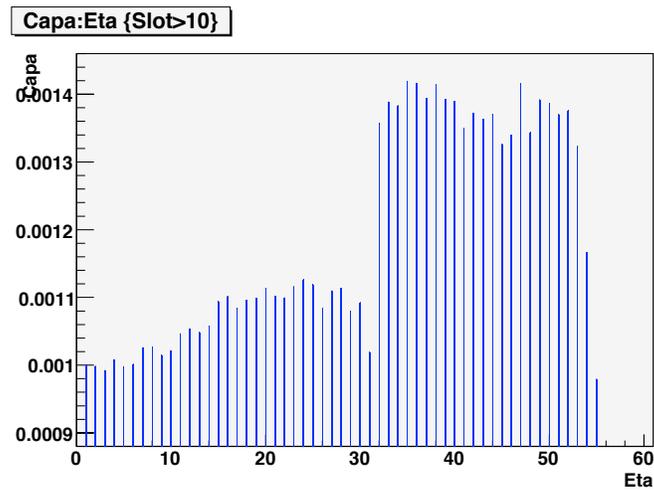
FIG. 15 – Ajustement de la répartition statistique de  $Z_{line,s}$  au sein du slot 12

FIG. 16 – Evolution de la capacité des cellules en fonction de la pseudo-rapacité

Ce dernier graphe permet de comprendre pourquoi il sera nécessaire de moyenner sur cette capacité lors de la méthode auto-cohérente, car elle joue sur le temps de montée du signal.

## Références

- [1] Equipe ATLAS, *ATLAS au coeur de la matière*, L'actualité du LAL (2006).
- [2] The ATLAS Collaboration, *ATLAS Detector and Physics Performance*, Tech. report, CERN, 1997.  
**URL** : <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/TDR/caloperf/TDR.bk.ps.gz>
- [3] Lionel Leukermans, *Etalonnage du calorimètre électromagnétique d'ATLAS et recherche du boson de Higgs dans ses désintégrations invisibles*, Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Annecy-Le-Vieux de physique des particules, 2002.
- [4] P. Perrodo L. Neukermans et R. Zitoun, *Understanding the ATLAS electromagnetic barrel pulse shapes and the absolute electronic calibration*, ATLAS Internal Note, ATL-LARG-2001-008 (2001).