

# Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

Ces quarante dernières années, expérimentateurs et théoriciens ont contribué à l'élaboration du Modèle Standard de la physique des particules qui décrit l'ensemble des particules élémentaires constituant la matière (quarks et leptons) ainsi que les interactions qui les lient. Ce modèle, alliant la mécanique quantique, la relativité restreinte et les symétries de groupe, permet une description précise de trois des quatre interactions connues à ce jour : électromagnétisme, interaction faible et interaction forte, la gravitation restant pour le moment du seul domaine de la relativité générale.

Le succès du modèle standard tient d'une part à une description des interactions dans un cadre théorique unifié et d'autre part à un accord d'une grande précision entre ses prédictions et les observations expérimentales. Il a en particulier permis de prédire l'existence aujourd'hui avérée des bosons W et Z associés à l'interaction faible et du quark top qui est la particule élémentaire de matière la plus massive connue. Les mesures ont été effectuées dans les années 1990 par les collisionneurs électron-positron SLC (Stanford Linear Collider) aux États-Unis et LEP (Large Electron Positron collider) du CERN en Europe. La validation du modèle standard est actuellement poursuivie grâce aux expériences qui se terminent ou en cours d'exploitation auprès de collisionneurs hadroniques proton-(anti)proton : le Tevatron du Fermilab aux États-Unis et le LHC (Large Hadron Collider) récemment mis en service au CERN, ce dernier collisionnant des protons de très grande énergie et avec une luminosité importante ( $7 \text{ TeV}$  dans le centre de masse et  $5 \text{ fb}^{-1}$  de luminosité intégrée pour les prises de données 2010-2011).

Aujourd'hui, parmi toutes les particules constitutives du modèle standard, seul le boson de Higgs manque à l'appel. Dans le cadre du modèle standard, le boson de Higgs est la particule nécessaire au mécanisme qui permet aux particules d'acquérir une masse. Sa recherche reste l'un des objectifs majeurs de l'expérience ATLAS du LHC et dans une moindre mesure de l'expérience  $DØ$  installée auprès du Tevatron, projets auxquels le LPSC participe. Ces deux instruments permettent également d'améliorer la précision de la mesure des masses du boson W et du quark top ainsi que de leurs sections efficaces de production ce qui conduira à un test encore plus poussé de la cohérence globale de la théorie.

Malgré son grand pouvoir prédictif, le modèle standard souffre cependant d'un certain nombre de lacunes. D'abord la masse des neutrinos et leur matrice de mélange ne trouvent que marginalement leur place dans le modèle. Ensuite, l'existence de trois familles et l'échelonnement des masses des particules en fonction de ces familles ne reçoivent aucune justification. Par ailleurs, notre Univers qui semble n'être composé que de matière aurait besoin d'un niveau de violation de la symétrie d'inversion combinée de la charge et de l'espace (CP) bien supérieure à ce qui est actuellement mesuré. De plus, à haute énergie, la théorie souffre d'instabilités et de divergences de calcul qui sont difficiles à contenir par un unique ajustement des paramètres libres du modèle. Un autre sujet d'interrogation est relié aux études et mesures récentes sur l'expansion de l'espace-temps et l'anisotropie du rayonnement fossile électromagnétique, lesquelles ont révélé que les constituants élémentaires que nous connaissons ne contribuent au plus qu'à 5% de l'énergie volumique moyenne de l'Univers. Une autre insuffisance du modèle est l'absence totale de l'interaction gravitationnelle qui nécessiterait une modélisation de la gravité quantique.

Plusieurs théories ont été proposées pour résoudre ces problèmes. Parmi celles-ci figurent la supersymétrie, les théories de grande unification, les théories avec des dimensions supplémentaires et la théorie des cordes. Ces différentes théories supposent l'existence de nouvelles particules ou de nouvelles interactions : partenaires supersymétriques aux constituants élémentaires actuels, boson de Higgs chargé, nouveaux bosons neutres... Les groupes du LPSC contribuent à cet effort de recherche de nouvelle physique, soit en mesurant avec une grande précision les paramètres du modèle standard afin de découvrir des indices indirects de l'existence de nouvelles particules ou interactions, soit en tentant de les mettre en évidence de façon directe.

Les équipes de physiciens et les services techniques du LPSC contribuent à des expériences menées auprès des collisionneurs de particules de très grande énergie (plusieurs TeV) et également à des expériences utilisant des neutrons de très basse énergie (de l'ordre du neV).

La première partie de ce rapport présente les analyses des données de l'expérience DØ qui enregistre le résultat des collisions de protons et d'antiprotons à une énergie de 1,96 TeV produites par le Tevatron. La masse du W a été mesurée avec précision, ce qui permet en particulier de contraindre de façon indirecte la masse du boson de Higgs. Par ailleurs, un groupe du LPSC est également fortement impliqué dans l'expérience ATLAS qui est l'une des quatre principales expériences installées auprès du LHC. Les différentes études effectuées par le groupe ATLAS s'organisent autour de trois thématiques principales : la recherche du boson de Higgs standard, la physique du quark top et la recherche de nouvelles particules telles que le boson de jauge neutre Z, le graviton ou le boson de Higgs chargé. Les premiers résultats obtenus à partir des données de collisions proton-proton enregistrées par ATLAS à l'énergie de démarrage du LHC (7 TeV) sont décrits dans la deuxième partie de ce rapport. L'analyse des données recueillies auprès de très grands instruments tels qu'ATLAS nécessitent des infrastructures et des outils informatiques très élaborés permettant le stockage, la gestion et le traitement de la quantité gigantesque de données produite par le LHC. Ces infrastructures de calcul sont également décrites dans la partie dédiée à l'expérience ATLAS.

Le groupe de physique des particules et les services techniques du LPSC sont aussi fortement impliqués dans les activités de Recherche et Développement effectuées pour les expériences qui devraient prendre place auprès du futur collisionneur linéaire électron-positron ILC (International Linear Collider) actuellement en projet. Ces développements techniques, essentiellement axés sur la calorimétrie électromagnétique, la micro-électronique et la mécanique, sont décrits dans le troisième chapitre de ce rapport.

Enfin, dans la dernière partie est présenté le programme de recherche de nouvelle physique basé sur des expériences utilisant des neutrons de très basse énergie : recherche de nouvelles interactions dans le domaine micrométrique avec l'expérience GRANIT et recherche de nouvelles sources de violation de CP via la mesure du moment dipolaire électrique du neutron avec l'expérience nEDM.

# Expérience DØ auprès du Tevatron

H. Li, G. Sajot, J. Stark

*DØ is one of the two experiments at the Tevatron collider at Fermilab (Chicago, USA). Run II of the Tevatron started in 2001 and was completed in september 2011. One of the main goals of this data taking campaign is a precise measurement of the  $W$  boson mass. It is a key ingredient in indirect constraints (from internal consistency of the standard model) on the mass of the hypothetical Higgs boson. The Grenoble group is the leader of the  $W$  boson mass measurement in DØ. A first measurement was published in 2009, based on only  $1 \text{ fb}^{-1}$  of data. It is already the single most precise measurement in the world. We are working on a measurement with the full dataset of  $10 \text{ fb}^{-1}$ , which (depending on the central value) could rule out the standard model of particle physics.*

Les expériences CDF et DØ sont installées auprès du Tevatron, le collisionneur du Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) près de Chicago (États-Unis). Le Tevatron a été arrêté en septembre 2011. Le Tevatron produisait des collisions entre des faisceaux de protons et d'antiprotons à une énergie dans le centre de masse de 1,96 TeV. Depuis son entrée en service en 1992 jusqu'au démarrage du Large Hadron Collider (LHC) au CERN en 2010, le Tevatron a détenu le record mondial de la plus haute énergie dans le centre de masse. DØ est une collaboration d'environ 450 physiciens répartis dans 84 institutions et 19 nations. Le groupe de Grenoble participe à DØ depuis mi-1998. Dans la période 2010-2011, avec la migration naturelle des physiciens du Tevatron vers le LHC, l'activité DØ du LPSC a été significativement réduite par rapport à son pic vers 2005. L'ensemble de nos efforts est désormais centré sur une seule analyse des données de DØ : la mesure précise de la masse du boson  $W$ . De nos jours, cette mesure est l'un des objectifs principaux de la physique des hautes énergies car elle permet, avec les recherches directes du boson de Higgs hypothétique auprès du LHC, d'élucider le mécanisme de la brisure de la symétrie électrofaible, l'une des pièces manquantes du modèle standard. La mesure de la masse du boson  $W$  de DØ, basée sur  $1 \text{ fb}^{-1}$  de données, est la plus précise au monde. L'échantillon final de l'expérience DØ est environ dix fois plus grand et l'analyse détaillée de l'échantillon complet permettra d'améliorer la précision d'un facteur trois par rapport au résultat basé sur  $1 \text{ fb}^{-1}$ . Une telle précision pourrait permettre de remettre le modèle standard en question. Le groupe du LPSC est à l'initiative de la mesure de la masse du boson  $W$  dans DØ, et il est la pierre angulaire de cet effort à la fois pour le premier résultat ( $1 \text{ fb}^{-1}$ ) et pour l'analyse de l'échantillon complet. La mesure de la masse du boson  $W$  sera poursuivie par les expériences auprès du LHC une fois que les performances des détecteurs seront quantifiées avec la précision requise et que les incertitudes théoriques (plus importantes au LHC) seront suffisamment bien maîtrisées. De ce fait, les premiers résultats compétitifs du LHC ne sont pas attendus dans les quelques années qui viennent.

## Mesure de la masse du boson $W$

Dans le cadre du modèle standard de la physique des particules, la masse du boson  $W$  reçoit des corrections radiatives via des diagrammes avec des quarks top ou des bosons de Higgs virtuels. Deux exemples de ces diagrammes sont représentés sur les figures. 1a et 1b. De par ces corrections radiatives, les masses du boson  $W$ , du quark top et du boson de Higgs sont liées. Une mesure des masses du quark top et du boson  $W$  permet donc de prédire la masse du boson de Higgs hypothétique. Cette contrainte indirecte sur la masse du boson de Higgs est représentée sur la figure 2. Dans le cadre du modèle standard, nous nous attendons donc à ce que le boson de Higgs soit léger. Différentes extensions du modèle standard, comme par exemple la supersymétrie, prédisent de nouvelles particules qui elles aussi donnent lieu à des corrections radiatives à la masse du boson  $W$  (Fig. 1c). La relation entre les trois masses citée ci-dessus serait donc modifiée et un boson de Higgs plus léger serait possible (Fig. 2). Les mesures actuelles préfèrent un boson de Higgs non-standard, mais elles restent compatibles avec le modèle standard (Fig. 2). La précision expérimentale sur la masse du boson  $W$  est actuellement de 23 MeV. Cette valeur est le facteur limitant dans la contrainte indirecte sur la masse du boson de Higgs. Si l'incertitude expérimentale sur la masse du boson  $W$  pouvait être réduite à 15 MeV et si la valeur centrale restait la même, le modèle standard serait exclu à 95% de degré de confiance.

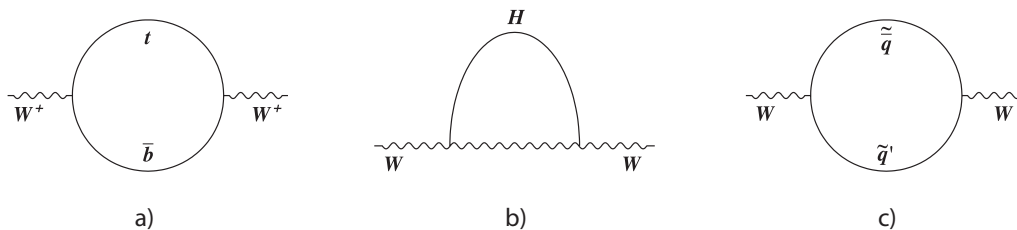


Fig. 1 : Exemples de diagrammes de Feynman qui donnent lieu aux corrections radiatives à la masse du boson  $W$ .

L'incertitude actuelle de 23 MeV est le résultat de la combinaison de toutes les mesures de la masse du boson  $W$  au

LEP et au Tevatron. La mesure la plus précise par une seule expérience est celle de DØ, basée sur seulement  $1 \text{ fb}^{-1}$  de données et publiée fin 2009 (fig. 3). Elle a une incertitude de 43 MeV, essentiellement due à la statistique finie des événements  $Z \rightarrow e e$  qui servent à calibrer, avec une précision de quelques  $10^{-4}$ , l'échelle en énergie du calorimètre de DØ. Avec l'échantillon final de  $10 \text{ fb}^{-1}$  environ, l'expérience DØ peut à elle seule atteindre une précision de 15 MeV. L'expérience DØ est actuellement en train d'analyser, sous la direction de physiciens du LPSC, les données récentes de DØ. Un nouveau résultat intermédiaire basé sur  $6 \text{ fb}^{-1}$  est attendu pour début 2012, et le résultat final est attendu pour 2013. La principale différence par rapport à la première analyse ( $1 \text{ fb}^{-1}$ ) s'explique par le fait que le premier  $\text{fb}^{-1}$  de données a été enregistré à une luminosité instantanée environ trois fois moins élevée que les données suivantes. De nouveaux effets expérimentaux dus au grand nombre d'interactions simultanées doivent être pris en compte. La modélisation de ces nouveaux effets est primordiale pour le résultat final. La mise au point de ces modèles a été l'activité principale de l'équipe du LPSC pendant les deux dernières années.

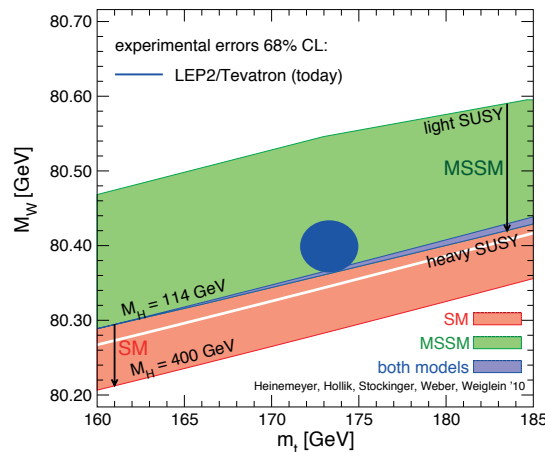


Fig. 2: Représentées dans le plan [masse du quark top, masse du boson W], les iso-masses du boson de Higgs (lignes rouge, bleue et verte en biais), ainsi que les mesures actuelles de la masse du quark top et celle du boson W (ellipse bleue). La zone rouge indique le domaine permis dans le cadre du modèle standard (avec la limite inférieure à  $M_H = 114 \text{ GeV}$  qui provient des recherches directes à LEP). La zone verte correspond à la zone permise dans le cadre du MSSM, une extension supersymétrique du modèle standard.

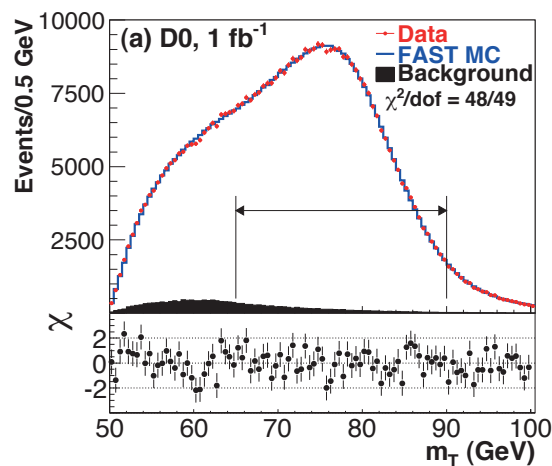


Fig. 3: La distribution de la masse transverse des événements  $W \rightarrow e \nu$  dans le premier  $\text{fb}^{-1}$  de données de l'expérience DØ. La prédiction par une simulation est superposée. La double flèche indique le domaine qui est utilisé pour ajuster la masse du boson W.

**Pour en savoir plus**

Measurement of the W boson mass at the Tevatron, A. Kotwal et J. Stark, Annual Reviews of Nuclear and Particle Science 58 (2008)

Precise prediction of  $M(W)$  in the MSSM, S. Heinemeyer, W. Hollik, D. Stockinger, A.M. Weber et G. Weiglein, JHEP 0608:052 (2006)

Measurement of the W boson mass, Collaboration DØ, V.M. Abazov et al., Physical Review Letters 103, 141801 (2009)

Measurement of the properties of electroweak bosons with the DØ detector, H. Li pour la collaboration DØ, dans les actes de la conférence EPS-HEP 2011 à Grenoble, juillet 2011

Precision electroweak studies, J. Stark, dans les actes de la conférence Lepton-Photon 2011 à Bombay (Inde), août 2011

# Expérience ATLAS auprès du LHC

Q. Buat, B. Clément, J. Collot, S. Crépe-Renaudin, B. Dechenaux, T. Delemontex, P.-A. Delsart, J. Donini, J.-Y. Hostachy, E. Laisné, F. Ledroit, B.T. Le, A. Lleres, A. Lucotte, F. Malek, C. Monini, F. Polci, G. Sajot, J. Stark, X. Sun, B. Trocmé, J. Wang, C. Weydert  
 S. Albrand, C. Gondrand, J. Fulachier, F. Lambert, Service Informatique  
 Y. Carcagno, D. Grondin, J.-C. Malacour, D. Marchand, J. Menu, Service Études et Réalisations Mécaniques  
 L. Eraud, Service Électronique  
 Collaboration ATLAS

*ATLAS is one of the four main particle experiments at the Large Hadron Collider (LHC) located at CERN. Its main physics purposes are the study of the elementary constituents of matter and of their interactions. After a long period of development, building and commissioning, data taking has started in November 2009 and first physics analyses have been carried out in three main directions: Standard Model Higgs physics, top quark physics and search of new particles outside standard field. The performance of the ATLAS apparatus for electron, photon and jet reconstruction, identification and calibration has also been studied.*

L'expérience ATLAS est l'une des quatre principales expériences de physique des particules auprès du grand collisionneur de protons du CERN : le LHC (Large Hadron Collider). Situé à la frontière entre la France et la Suisse, le LHC a été conçu pour produire à terme des collisions entre protons à une énergie dans le centre de masse jamais atteinte de 14 TeV. Le taux de collisions nominal prévu est environ 100 fois supérieur à celui du collisionneur le plus puissant existant avant la mise en service du LHC : le Tevatron au Fermi National Laboratory (Fermilab) aux États-Unis.

Les premières collisions pour les études de physique ont eu lieu en novembre 2009 à une énergie dans le centre de masse de 900 GeV puis à partir de mars 2010 à 7 TeV. Les prises de données vont se poursuivre jusqu'à fin 2012 et un long arrêt de la machine est alors prévu à cette date afin de préparer la montée en énergie du collisionneur à l'énergie nominale de 14 TeV.

Les objectifs scientifiques de l'expérience ATLAS sont la mise en évidence et l'étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. Le Modèle Standard décrit notre compréhension actuelle de ces éléments. Les particules qu'il décrit ont été observées dans les expériences de physique des particules à l'exception notable du boson de Higgs. Ce dernier est associé au processus qui permet à certaines particules d'acquérir une masse. Le Modèle Standard a passé avec succès tous les tests de précision aux échelles d'énergie accessibles aux expériences passées et en cours. Sa validité est cependant remise en cause aux échelles d'énergie accessibles au LHC. Les expériences LHC ont donc pour objectifs de tester de façon encore plus précise le Modèle Standard, mettre en évidence le boson de Higgs, s'il existe, et découvrir des signes de nouvelle physique non prédite par le Modèle Standard.

Après une importante phase de construction et de tests des différents détecteurs qui composent l'expérience ATLAS couplée à de nombreux développements d'outils d'analyse pour les études de physique, le groupe ATLAS du LPSC s'est impliqué depuis le démarrage des prises de données à 7 TeV dans les études de performance de l'appareillage de détection et les analyses de physique.

Lors de la phase de construction d'ATLAS, les équipes du LPSC avaient en charge le développement, la construction et l'installation du pré-échantillonneur associé au calorimètre électromagnétique ainsi que de la cryogénie de proximité de l'ensemble des calorimètres à argon liquide (tonneau et bouchon). Des études importantes ont ensuite été effectuées pour s'assurer d'une compréhension détaillée des performances des calorimètres et en particulier de la chaîne de lecture électronique. Cette activité a ensuite mené à une implication du groupe du LPSC dans la certification des données pour l'ensemble de la calorimétrie à argon liquide. Cette activité est décrite dans la première partie de ce chapitre.

Le LPSC contribue également aux développements techniques visant à consolider et à améliorer l'appareillage ATLAS. Le projet relatif à l'implémentation d'une couche supplémentaire de pixels dans le détecteur interne de traces (Insertable B-Layer (IBL)) est décrit dans la deuxième section de ce chapitre.

Pour permettre l'exploitation des données enregistrées par les détecteurs, les activités des équipes du LPSC se poursuivent dans le développement d'applications dédiées à la gestion des logiciels et des données d'ATLAS. D'autre part, la quantité de données enregistrées (de l'ordre du péta-octet soit  $10^{15}$  octets par an) ne peut être traitée et mise à disposition des milliers de physiciens de la collaboration ATLAS que grâce à une grille de calcul dont les ressources sont réparties partout dans le monde. Ces activités sont décrites respectivement dans les parties « Développement logiciel » et « Calcul scientifique LHC ».

Enfin, l'équipe du LPSC s'investit également dans les analyses de physique proprement dites. Trois thématiques principales sont étudiées : la recherche du boson de Higgs standard, la physique du quark top et la recherche de



nouvelles particules (Higgs chargé, graviton, bosons de jauge). À ces études de physique sont associées des études de performance pour la reconstruction, l'identification et la calibration des particules produites dans les différents canaux étudiés (électrons, photons, jets). Ce travail d'analyse est décrit dans la dernière section de ce chapitre.

## Calorimétrie électromagnétique

Le groupe ATLAS du LPSC contribue depuis 1991 à la calorimétrie électromagnétique à argon liquide à travers tous ses aspects: éléments de détection (pré-échantillonneur tonneau notamment), électronique de lecture frontale et services (cryogénie de proximité). À ces projets de conception, de construction et d'intégration, a succédé une implication continue dans la mise en route du détecteur.

Ainsi, à partir de 2006, un effort important a été mené dans la conception d'algorithmes de contrôle en ligne de différents paramètres: vérification de l'intégrité des données, performances de la chaîne de lecture électronique, identification des muons provenant des rayons cosmiques... Cette implication a trouvé un prolongement dans la certification des données pour l'ensemble de la calorimétrie à argon liquide, dont la coordination est confiée à un membre du groupe depuis 2008.

En raison du taux d'acquisition de données très important (environ 20 tera-octets par jour), l'ambition d'ATLAS est de pouvoir reconstruire – ou rejeter – tout lot de données moins d'une semaine après son enregistrement. Eu égard à la complexité des détecteurs et au volume de données à traiter, un système d'étiquetage quasi automatique et fiable a été mis en place. En 2009, lors des premières collisions à très basse luminosité, ce modèle a fait ses preuves avec la quasi intégralité des données reconstruites de façon optimale et disponibles pour analyse en moins de 4 jours. Cependant, au cours de l'année 2010, avec l'augmentation de la luminosité instantanée, ont été observés plusieurs phénomènes mettant en péril la qualité des données: augmentation des instabilités d'alimentation haute tension, observation de bouffées de bruit affectant soit une cellule isolée, soit l'intégralité d'une partition, désynchronisation de cartes de lectures frontales isolées. L'ensemble de ces phénomènes a entraîné au premier semestre 2011 une réjection de 10% des données. Plusieurs études approfondies, menées notamment au LPSC, ont cependant permis de démontrer que cette réjection était très conservative dans le cas des désynchronisations et des bouffées de bruit cohérent. Ces études ont ainsi permis à l'automne 2011 de réduire la réjection des données à un niveau inférieur à 4%.

À côté de ces pathologies qui présentent un caractère transitoire, le calorimètre à argon liquide a également connu des problèmes de défaillance des transmetteurs optiques des cartes frontales, induisant une perte d'acceptance permanente du détecteur, de l'ordre du 8% par électron/photon. L'origine du problème a été identifiée et réglée à l'occasion de la maintenance hivernale de 2011 mais les données de 2010 ont été entachées de ces pertes d'acceptance. Une étude dédiée menée par le groupe ATLAS du laboratoire a cependant permis de traiter d'une manière cohérente les simulations Monte Carlo et d'estimer l'erreur systématique associée à ce défaut comme étant de l'ordre de 0,4% par électron/photon.

## Projet IBL

La collaboration ATLAS a décidé en 2008 d'ajouter à son détecteur à pixels actuel une quatrième couche active (Insertable B-Layer ou IBL) située à un rayon moyen de 33 mm à partir de l'axe du faisceau. Elle sera constituée de 6 millions de pixels de silicium ( $50 \times 250$  micron<sup>2</sup> par pixel) réalisés en technologie planaire. Son extension axiale active est de 33 cm de part et d'autre du point de collision. Le coût global de ce projet est d'environ 10 M CHF si l'on inclut le nouveau tube à vide du faisceau.

Le détecteur à pixels est la clé de voute de l'étiquetage des quarks b que l'on retrouve dans tous les secteurs stratégiques de la physique du LHC: Higgs, supersymétrie, quark top, physique du B... Les raisons principales qui ont motivé l'ajout d'IBL sont diverses. En premier lieu, IBL renforcera la robustesse du détecteur à pixels, dont les performances pourraient être altérées si des dégradations ou des pannes se produisaient en son sein dans les années à venir. IBL permettra également de faire face à la montée en luminosité du LHC durant sa phase 1. Dans sa version actuelle, le détecteur à pixels d'ATLAS est conçu pour fonctionner avec une luminosité de  $1 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> alors que l'on pourrait dépasser le double de cette valeur avant 2020.

Le LPSC participe à ce projet depuis la fin de l'année 2009. Le service mécanique du laboratoire est en charge de concevoir et de réaliser les outillages (Fig. 1) qui seront utilisés pour extraire le tube à faisceau actuel d'ATLAS et insérer ensuite IBL monté sur le nouveau tube à faisceau. Par ailleurs, le service électronique du LPSC a accepté de coordonner la conception, la documentation et l'installation des câbles et des tubes de refroidissement. Le groupe de micro-électronique a conçu un comparateur à très faible consommation pour un ADC SAR 10 bits utilisé dans la partie de contrôle lent de l'ASIC de lecture FE-I4.

Après la phase d'essai d'extraction et d'insertion en surface prévue en 2012, l'installation d'IBL dans ATLAS est prévue à partir du printemps 2013 lors du premier long arrêt pour maintenance du LHC.

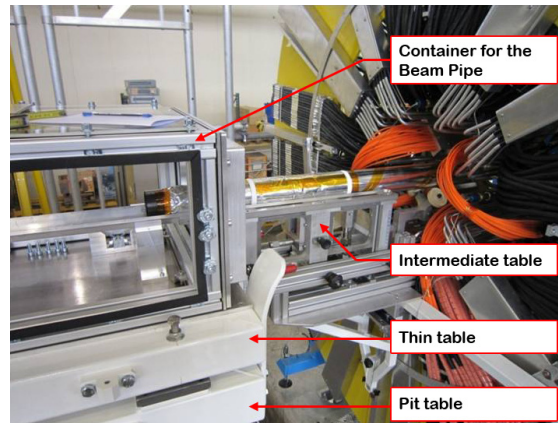


Fig. 1 : Outils d'extraction du tube à vide du faisceau.

## Développement logiciel

Les ingénieurs du service informatique sont responsables de deux applications essentielles qui font partie de l'infrastructure logicielle de l'expérience ATLAS. L'application AMI (ATLAS Metadata Interface) est un des points d'entrée pour les physiciens afin de consulter les données disponibles pour l'analyse. La deuxième application dont nous sommes à l'origine s'appelle « Tag Collector ». Cette application est devenue essentielle à la gestion des versions (« releases ») du logiciel (« software ») d'ATLAS car elle catalogue les versions de différentes parties (« packages ») du logiciel et impose les règles établies par le coordinateur. Par exemple on peut contrôler quels packages peuvent être ajoutés et qui a l'autorisation pour le faire. Cette application est utilisée par tous les développeurs de logiciel d'ATLAS. AMI et Tag Collector utilisent le même logiciel de base, écrit en JAVA. On notera que Tag Collector utilise la base de données mySQL alors qu'AMI utilise Oracle.

### AMI

Le logiciel AMI est un système de gestion de catalogues. Son utilisation principale au sein de la collaboration ATLAS est de cataloguer toutes les données officielles soit réelles (acquises par le détecteur), soit simulées. Les données brutes qui sortent du détecteur ATLAS sont enregistrées dans des fichiers puis organisées en conteneurs ou « datasets ». Ces datasets sont catalogués dans AMI dans les minutes qui suivent l'acquisition. De même, les résultats de la reconstruction ainsi que les datasets de la production Monte Carlo officielle d'ATLAS sont disponibles rapidement dans AMI. L'application fait la corrélation entre plusieurs sources et conserve un sous-ensemble d'informations (« metadata ») décrivant chaque dataset et chaque fichier produit. En outre un certain nombre d'informations dérivées sont ajoutées. Par exemple, AMI présente le nombre de fichiers dans chaque dataset ainsi que le nombre d'événements. Différentes valeurs de statut sont dérivées ; si tous les « jobs » de reconstruction ne se terminent pas correctement, AMI avertit les utilisateurs que des événements manquent dans le dataset résultant. Les datasets qui ont été effacés ou déclarés mauvais ne sont pas affichés par défaut. Fin 2010 nous avons pu profiter du nouveau service de data management qui publie la liste des fichiers perdus. Pour les données acquises par le détecteur, AMI peut utiliser cette information, couplée à la provenance fichier/fichier pour signaler aux utilisateurs la liste des blocs de luminosité perdus. Les valeurs de section efficace issues de la simulation Monte Carlo d'événements sont propagées aux datasets dérivés, l'accès à cette information essentielle étant ainsi facilité.

Une interface WEB très puissante permet la recherche des datasets selon les metadatas. Un programme client écrit en Python permet aux physiciens d'accéder à AMI à partir d'une ligne de commande, ou d'incorporer des informations venant d'AMI dans leurs propres applications.

Les sources de données sont :

- ATLAS Tier-0 – le système qui gère la formation des ensembles de données brutes du détecteur et la première reconstruction.
- Les bases de données du système de production utilisées pour les reconstructions suivantes (pour l'application de l'étalonnage final) dites « reprocessing » et la simulation Monte Carlo.

AMI est également utilisé pour stocker des informations de référence pour la nomenclature des datasets.

Enfin, nous avons pu exploiter la possibilité dans l'application de « voir » une base de données externe comme si elle faisait partie d'AMI. Une collaboration très proche avec COMA (ATLAS COnditions Metadata) a permis l'exploitation des données dans COMA par une suite d'interfaces AMI. Cette interface permet aux physiciens de grouper les « runs » d'ATLAS dans des périodes selon leurs propriétés.

## Tag Collector

Tag Collector est développé dans le cadre du groupe «ATLAS Software Infrastructure». La collaboration ATLAS avait précédemment organisé le découpage des compilations («builds») du logiciel de reconstruction en sous-ensembles qui peuvent être générés de manière indépendante et parallèle. Des règles d'appartenance ainsi qu'une hiérarchie des dépendances ont été établies. Tag Collector assure l'application de ces règles et vérifie que les dépendances sont respectées. Cette souplesse a permis la construction en parallèle de plusieurs versions du logiciel (au moins 15). Par exemple il est possible de construire une version pour la reconstruction des données en différé et une autre pour la première reconstruction en ligne des données brutes. Chaque version est déclinée en exécutables pour linux 32 et 64 bits. De nombreuses fonctions ont été introduites pendant les deux dernières années pour rendre la construction de la compilation du logiciel plus simple pour les développeurs et les coordinateurs. Il est possible de déclarer des groupes de packages que l'on appelle «bundles», qu'un coordinateur peut traiter ensemble plutôt qu'un à un. Tag Collector recoupe les informations associées à un package et déclare ses dépendances avec les versions disponibles dans la zone de dépôt de ces packages. Ainsi il est possible d'avertir un développeur s'il y a eu un changement d'interface dans un package qu'il utilise.

Une autre fonction importante introduite dans Tag Collector est la mise en œuvre d'un processus de validation des packages à intégrer aux versions du logiciel («releases»). Ce processus qualité, nommé «tag approval», permet aux responsables des «releases» de compiler des versions de tests du logiciel avant de publier la version finale. Le processus de tag approval permet des échanges entre les coordinateurs et les développeurs et participe grandement à l'amélioration de la qualité du développement.

## Déploiement et Qualité de Service

Depuis mars 2008, AMI et Tag Collector sont déployés au Centre de Calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3) de Lyon. La plupart de nos données sont stockées dans Oracle. Les bases de données AMI du CCIN2P3 vers le CERN sont répliquées par Oracle streams, dans le cadre du projet «3D» piloté par le groupe bases de données du CERN. Ainsi il est possible de lire les bases de données d'AMI au CERN en cas de problème de réseau à Lyon. En trois ans le nombre d'utilisateurs de nos services a été multiplié par trois, et il est de plus en plus essentiel de maintenir une haute qualité de service. Le soutien de nos collègues du CCIN2P3 nous a été indispensable. Deux nouveaux serveurs, achetés par ATLAS France, ont été installés en 2011. Nous disposons également d'une copie au CERN installé sur une machine virtuelle.

Une chaîne automatisée de production et de déploiement de RPM a été mise en place; elle s'appuie sur les outils Tag Collector, SVN, ANT et QUATTOR. Par ailleurs, un outil de gestion de projet collaboratif, RedMine (forge IN2P3) a été mis en place pour assurer le suivi et la qualité de service des projets AMI et Tag Collector.

### Pour en savoir plus

<http://ami.in2p3.fr>

*Emil Obreshkov et al. Organization and Management of ATLAS Software Releases, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 584, Issue 1, 1 January 2008, Pages 244-251.*

*The ATLAS metadata interface, S. Albrand, T. Doherty, J. Fulachier, F. Lambert, J.Phys. Conf. Ser. 119 Volume 119 (2008) 072003 (10pp).*

## Calcul scientifique LHC

### Les projets W-LCG et LCG-France

Chaque collision constitue, au niveau de chacune des quatre expériences, un événement dont la taille en données brutes est de l'ordre de 1 Mo. Afin de réduire la quantité de données, un tri intelligent est réalisé en un temps ultra court (moins d'une seconde) pour ne garder que les événements potentiellement intéressants. Ce tri réduit le taux d'acquisition dans une première étape (quelques  $\mu$ s) à 100 000 événements par seconde grâce au circuit électronique de déclenchement, puis, dans une deuxième étape à environ 100 ou 200 événements par seconde cette fois-ci en traitant les informations à l'aide de ressources (fermes de calcul) et d'algorithmes dédiés. Les données brutes, après tri, sont finalement enregistrées à un taux équivalent à 1,5 CD par seconde pour les quatre expériences, sachant que la capacité d'enregistrement d'un CD est de 700 Mo.

Dans les conditions nominales de fonctionnement du LHC, les expériences enregistreront chaque année  $10^{10}$  collisions, ce chiffre étant comparable au nombre d'étoiles dans la Voie Lactée. Traiter les données ainsi accumulées, représente un véritable défi informatique autant pour les flux (de l'ordre du giga-octet par seconde) que pour leur volume (plusieurs dizaines de peta-octets chaque année). À tout instant, quelques milliers de chercheurs du monde entier solliciteront des ressources de calcul et de stockage pour analyser ces données. Pour faire face à ce défi, la solution du calcul distribué, ou grille de calcul, s'est imposée.

Le principe de la grille W-LCG s'appuie sur des centres de calcul répartis dans le monde entier et qui sont organisés en réseau. Elle s'articule autour de deux grilles principales, technologiquement différentes mais interoperables, l'une



en Europe, EGEE<sup>1</sup> (Enabling Grids for E-sciencE), et l'autre aux États-Unis OSG<sup>1</sup> (Open Science Grid), auxquelles sont associées des grilles régionales ou nationales. En 2010, le projet EGI (European Grid Initiative)<sup>2</sup> a pris le relais du projet EGEE financé par l'Europe. Il repose sur des initiatives nationales (NGI) dont le «GIS» France Grilles est le représentant français et l'Institut des Grilles du CNRS le mandataire<sup>3</sup>.

Lorsqu'une requête est formulée par un utilisateur à partir de l'un des nombreux points d'entrée du système, la grille de calcul établit l'identité de l'utilisateur, vérifie ses autorisations, recherche les sites disponibles et susceptibles de fournir les ressources requises, en termes de stockage, de capacité de calcul, de disponibilité des logiciels d'analyse... pour finalement satisfaire la requête de l'utilisateur sans que ce dernier ait à se soucier du détail du processus. La grille W-LCG est hiérarchisée en quatre niveaux, ou rangs, appelés «Tier». L'appartenance à un rang donné fixe la nature et la qualité des services qu'un centre de calcul doit fournir. La quantité de ressources à fournir est à la discrétion des agences de financement selon un protocole d'accord rediscuté chaque année (MoU)<sup>4</sup>.

Des réseaux haut débit, de 10 giga-octets/s ou plus, spécialement conçus pour le LHC, LHCOPN (LHC Optical Private Network), connectent le centre Tier-0 aux centres Tier-1. Ils assurent le transit des données venant des expériences et des données de physique traitées à un taux de 800 mega-octets/s. Les centres Tier-2 sont connectés aux Tier-1 par des réseaux de l'ordre du giga-octets/s.

Pour traiter l'ensemble des données enregistrées par les expériences du LHC, les besoins en capacité de calcul atteints en 2011 sont de plus de 250 kCPU cores et plus de 150 peta-octets de disk. Actuellement, la grille W-LCG compte près de 200 sites répartis sur 3 continents, en Europe, Amérique et Asie et 2 sites en Afrique: 1 Tier-0; 11 Tier-1; 68 fédérations de Tier-2.

En 2011 W-LCG a exécuté plus de 1 million de tâches par jour correspondant à 150 kCPU. Le transfert des données entre les sites a dépassé parfois le taux nominal de 1,3 giga-octets/s.

La France (voir fig. 2) héberge au centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne dans la région lyonnaise, l'un des 11 centres Tier-1 de W-LCG. La France dispose également de plusieurs sites Tier-2 et Tier-3 à Annecy, Clermont-Ferrand, Grenoble, Ile-de-France, Lyon, Marseille, Nantes, Strasbourg. La gestion de ces ressources, le fonctionnement, le financement et les relations avec W-LCG sont assurés par le projet LCG-France créé en 2004<sup>5</sup>.

Le CC-IN2P3, financé conjointement par l'IN2P3 du CNRS et l'IRFU du CEA, offre ses services aux quatre expériences du LHC à hauteur de 10% de l'effort mondial des Tier-1. Le CC-IN2P3 héberge également un Tier-2 et un Tier-3 regroupés sous l'appellation de «ferme d'analyse» ou AF. Une partie des ressources des sites Tier-2 hors CC-IN2P3 est également dédiée à l'analyse type Tier-3. Un seul site, GRIF en Ile de France, est une agglomération de plusieurs sites Tier-2/Tier-3. La contribution relative de la France à l'effort mondial des Tier-2 est voisine de 10%.

Seules les ressources du Tier-1 et des sites Tier-2 (ressources «pledges») sont affichées et mises à disposition de la communauté internationale W-LCG et constituent un engagement auprès de celle-ci.

Il est important de noter que les ressources françaises ne sont pas réservées exclusivement aux chercheurs français mais qu'elles sont accessibles à l'ensemble des chercheurs participant au projet LHC selon l'accord de collaboration (MoU). Réciproquement, les chercheurs français ont accès à l'ensemble des ressources mondiales.

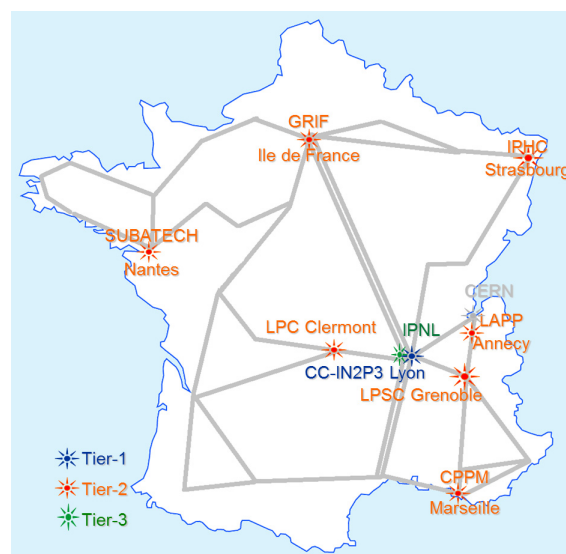


Fig.2: Infrastructure LCG-France en 2011.

**Pour en savoir plus**

<sup>1</sup> Les sites de W-LCG, EGEE et OSG se consultent, respectivement, ici : <http://lcg.web.cern.ch/LCG/>, <http://www.eu-egge.org/>, <http://www.opensciencegrid.org>

<sup>2</sup> EGI : <http://web.eu-egi.eu/>

<sup>3</sup> Institut des Grilles du CNRS : <http://www.idgrilles.fr/>

<sup>4</sup> MoU : Memorandum Of Understanding = protocole d'accord de collaboration dont la référence est : CERN-C-RRB-2005-01

<sup>5</sup> Le site Web du projet LCG-France : <http://lcg.in2p3.fr/>

**La grille de calcul pour ATLAS**

Les sites et services de la grille de calcul LHC sont donc organisés autour des structures de W-LCG au niveau mondial et de LCG-France au niveau français. Par contre, les activités grilles propres à chaque expérience LHC sont gérées directement par ces dernières. Ainsi, en ce qui concerne l'expérience ATLAS, certains services sont traités de façon centralisée au CERN alors que d'autres sont gérés par région ou « nuage ». Un nuage représente l'ensemble des sites Tier-2 ou Tier-3 qui ont un lien privilégié avec un centre Tier-1 d'envergure nationale.

Le LPSC participe activement au calcul grille ATLAS via son nœud de grille qui contribue au stockage, à la simulation et à l'analyse des données de l'expérience mais aussi via le travail de plusieurs membres de l'équipe ATLAS aux niveaux de l'opération et de la surveillance du calcul distribué de l'expérience.

**Activités ATLAS du nœud de grille du LPSC**

Le nœud de grille du LPSC est décrit dans la partie plateforme de ce document. Depuis la mise en fonctionnement du site, son utilisation par ATLAS a été constante.

En ce qui concerne les activités ATLAS, le site bien que classé Tier-3, a fonctionné jusqu'à la fin 2009 sur les mêmes bases qu'un Tier-2 puisqu'il avait les performances et les services requis. Son activité s'est donc partagée entre la production Monte Carlo et l'analyse des données. Une partie des données (5% des données destinées aux Tier-2) d'ATLAS était distribuée et stockée sur le site.

Au début de l'année 2010, avec l'arrivée de nombreux sites Tier-3 avec des services de grille minimaux, la collaboration ATLAS a clairement différencié les activités des Tier-3 et des Tier-2 en particulier en matière de distribution des données. Les données n'étant plus automatiquement importées au LPSC, l'activité d'analyse s'est donc restreinte aux utilisateurs locaux qui importent les données des groupes de physique auxquels ils appartiennent ou leurs propres données d'analyse ainsi qu'aux utilisateurs extérieurs intéressés par ces données particulières. De plus, il n'est pas possible pour un Tier-3 de recevoir automatiquement les données des groupes de physique traitées via la production centrale, la copie de ces données ne peut donc être faite que manuellement. En conséquence, pendant cette période, l'activité de production Monte Carlo a pu être poursuivie mais la contribution à l'analyse du LPSC par rapport aux sites Tier-2 a baissé en proportion. Cette évolution de l'utilisation des Tier-3 par la collaboration ATLAS est l'une des raisons qui ont mené à la demande de passage du site du LPSC à un site de type Tier-2.

Depuis l'été 2011, grâce à l'implication de son personnel et aux bons résultats du site, le nœud de grille du LPSC a été accepté comme un site de niveau Tier-2 par W-LCG. Depuis, le site reçoit à nouveau des données ATLAS via les différents systèmes de distributions : données pré-placées et données placées dynamiquement en fonction de la demande des utilisateurs. Les taux de transferts étant suffisant, le site a été classé comme « T2D » par la collaboration. Ce label permet de désigner les sites qui ont une connexion suffisante pour recevoir efficacement les données ATLAS directement depuis d'autres Tier-1 que celui de son nuage et même de Tier-2. De tels sites peuvent aussi produire des données de simulation pour d'autres nuages.

La répartition des tâches ATLAS au LPSC depuis janvier 2010 est représentée sur la figure 3. L'augmentation du nombre de tâches d'analyse depuis l'automne 2010 est particulièrement visible et correspond au traitement et à l'analyse de la première période de prise de données du LHC.

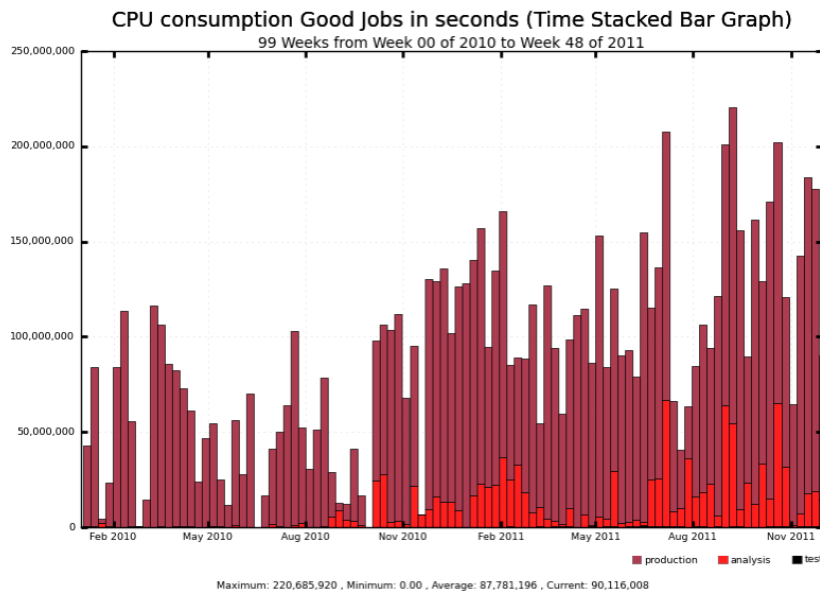


Fig. 3: Répartition de la puissance de calcul consommée par semaine en HEPSPEC06 par type de tâche au LPSC depuis janvier 2010 pour l'expérience ATLAS.

L'activité du site du LPSC représente environ 3% de l'activité de l'ensemble des sites du nuage français tant du point de vue de la production que de l'analyse. Rappelons que le nuage français regroupe l'ensemble des sites français et des sites roumains qui participent à ATLAS ainsi que le site chinois de Beijing et le site japonais de Tokyo. Il fournit environ 13% des ressources grille pour l'expérience ATLAS.

### Fonctionnement et suivi du calcul distribué d'ATLAS

Plusieurs membres de l'équipe ATLAS du LPSC participent à différentes activités liées au calcul distribué pour l'expérience.

Ainsi plusieurs personnes effectuent régulièrement des périodes de surveillance des activités du Tier-0 du CERN (premier traitement des données enregistrées par le détecteur, sauvegarde et transfert de ces données vers les Tier-1).

D'autre part un membre du groupe a récemment pris en charge l'organisation et le suivi de la phase de « reprocessing » des données. Il s'agit de la seconde phase du traitement des données d'ATLAS sur la grille. Celle-ci permet de fournir des données reconstruites avec les étalonnages et la compréhension des détecteurs les plus aboutis. Ces données sont utilisées pour l'analyse finale par les physiciens de l'expérience.

Enfin, une personne appartient à l'équipe d'experts qui s'assure du bon fonctionnement de l'ensemble du nuage français. Cette équipe assure, en étroite collaboration avec les membres du Tier-1, la mise en place et le suivi des outils nécessaires au bon fonctionnement du nuage. Elle est le lien privilégié entre les équipes qui gèrent les sites et celles qui s'occupent des fonctions grilles centrales au CERN. Elle effectue le suivi de l'ensemble des sites du nuage, s'assure que leur fonctionnement est optimal et travaille à améliorer la qualité du service délivré à l'expérience et aux utilisateurs.

## Analyses de physique

### Reconstruction et calibration des jets

Les interactions de haute énergie impliquant l'interaction forte résultent systématiquement en la création de jets de particules hadroniques. Ces jets ont une importance majeure pour les analyses du LHC: d'abord parce que les processus QCD sont, de plusieurs ordres de grandeur, les processus dominants au LHC et donc toutes les analyses sont concernées par le bruit de fond QCD. D'autre part, beaucoup de canaux de recherche ont un état final contenant un ou des jets (produits de désintégration de particule massive, rayonnement d'état initial ou final). Le groupe du LPSC contribue activement au travail sur les jets hadroniques. Il a la responsabilité des logiciels ATLAS dédiés à cette tâche. La complexité de ces logiciels reflète celle des phénomènes hadroniques: ils couvrent les aspects théoriques (algorithmes de jets) et expérimentaux (utilisation optimale des sous-détecteurs) et doivent satisfaire plusieurs contraintes techniques. Le groupe assure leur maintenance (utilisation en production) et surtout leur constante évolution: différentes méthodes de calibration, d'analyse apparaissent régulièrement et doivent être intégrées sans gêner la production. Parallèlement, le groupe participe aussi aux efforts sur la calibration des jets. ATLAS explore une technique consistant à calibrer les constituants des jets reconstruits par le calorimètre: les « clusters topologiques ». Le groupe s'occupe de la validation et de l'estimation des erreurs systématiques liées à cette calibration.

**Physique du quark top**

Depuis la découverte du quark top à Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF, une campagne de mesure ambitieuse au LHC s’est orientée dans deux principales directions: la première vise à des mesures précises des propriétés du quark top, tandis que la seconde s’attache à la recherche de signes d’une physique au-delà du Modèle Standard. Dans le premier cas, la détermination précise de ses propriétés concerne l’étude de ses modes de production et de leur section efficace associée, la mesure de sa masse, de sa largeur, de son spin, de sa charge électrique, ou encore de ses couplages aux fermions et bosons existants. Dans la seconde orientation, il s’agit de rechercher de nouvelles particules dans ses produits de désintégration (le quark top étant la particule connue la plus lourde à ce jour) ou dans ses modes de production, qui se reflètent soit par l’apparition de nouvelles signatures, par des modifications des sections efficaces absolues et différentielles, soit encore indirectement par des modifications des couplages du quark top aux particules connues.

C’est dans le cadre de l’étude de la production de quark top célibataire (ou single-top) que s’insèrent les activités du groupe du LPSC depuis 7 ans, avec, au cours des trois dernières années, la participation de trois chercheurs permanents, d’un post-doctorant pendant quatre ans, et de quatre étudiants en thèse. Les études menées ont utilisé les quelques 340 000 collisions attendues contenant un seul quark top accumulées entre 2010 et 2011, et ont permis d’améliorer déjà singulièrement notre connaissance de ces modes de production et de compléter les résultats obtenus à Fermilab par le Tevatron. En particulier, le groupe a participé à la redécouverte d’un des trois modes de production, et aux efforts de mise en évidence d’un nouveau mode de production jamais observé à ce jour. Une première interprétation de ces mesures en termes de recherche de nouvelle physique a été également conduite, notamment avec la recherche dans les événements single-top de courants neutres violant la saveur (FCNC) et la recherche de nouveaux bosons jauge.

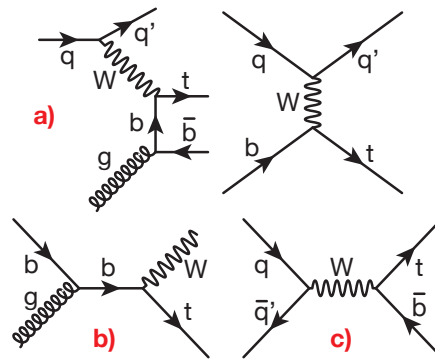


Fig. 4 : Les 3 mécanismes de production du top en singlet au LHC : a) voie-t b) voie de production associée d’un boson W et du top c) voie-s par un W virtuel.

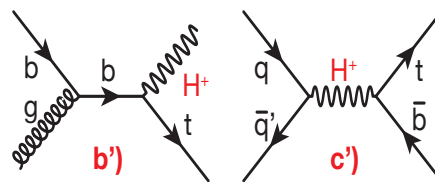


Fig. 5 : Diagrammes supplémentaires dans les modèles à deux doublets de Higgs. b’) production en association avec un top, et c’) production par voie-s.

Dans le Modèle Standard, il existe ainsi trois mécanismes de production du top célibataire, représentés par les diagrammes des figures 4 et 5. La mesure de la section efficace de la production de quark top célibataire constitue un test précis du modèle des interactions électrofaibles: dépendant du couplage du quark top aux particules connues, la mesure du taux d’événements et sa comparaison aux prédictions permet de confirmer la validité du modèle utilisé. Le nombre d’événements attendus au cours des années 2010-2011 dans les canaux décelables, avec une désintégration en muon ou électron du W, est typiquement de 66 000 par  $1 \text{ fb}^{-1}$  dans la voie-t, 15 000 dans la voie W+t, et 4000 dans la voie-s, pour une année à basse luminosité et à 7 TeV. Tout écart dans le taux d’événements détectés avec les valeurs prédites peut être interprété comme le signe de couplages anormaux du quark top avec les particules en lesquelles il se désintègre, ou comme le signe de présence de nouveaux mécanismes de production.

Au cours des années 2010-2011, deux des trois mécanismes de production du quark top célibataire, d’états finaux très différents, ont été étudiés à l’aide d’analyses spécifiques développées au LPSC: la production de quark top par la voie-t, et la production associée d’un quark top avec un boson W, qui n’a jamais été observée à ce jour.

La redécouverte de la production dominante du single-top (via la voie-t) a été possible avec une luminosité de  $0,7 \text{ fb}^{-1}$  accumulée jusqu’à l’été 2011. La participation du groupe du LPSC à la mise au point de la sélection de ces collisions,

ainsi qu'à l'estimation des incertitudes systématiques associées, a abouti à l'annonce de la redécouverte de ce mécanisme aux conférences d'été 2011, un an à peine après les résultats du Tevatron. Il est à noter que le groupe avait la responsabilité de l'édition des notes publiques associées à ce travail. Depuis, le LPSC s'est investi dans une analyse plus performante et plus complexe, basée sur l'utilisation de la technique des *arbres de décision boostés*, qui permet une détermination plus précise de la section efficace de production, et sur la ré-estimation des incertitudes systématiques associées à la mesure. Ce travail fait l'objet d'une thèse et est en cours de publication par la collaboration.

Cette première mesure et la mise au point des critères de sélection de ces événements permettent maintenant l'étude précise des propriétés de la production de quark top célibataire, ce qui est impossible à Fermilab en raison de la trop faible statistique accumulée. Le groupe s'est donc investi dans la mesure de la polarisation de ces quarks top, qui sont attendus 100% polarisés dans le cadre du Modèle Standard de la physique des particules. Toute déviation observée serait le signe de nouveaux modes de production du quark seul, et donc d'une nouvelle physique. Une autre orientation a été suivie, avec la recherche dans ces événements d'une production par courant neutre changeant la saveur, avec en particulier la production d'un quark top seul provenant de l'interaction  $ug \rightarrow t$  ou  $cg \rightarrow t$ . Les premiers résultats sont déjà obtenus et en cours de publication. Ces deux thématiques font l'objet d'une thèse qui est en cours.

La dernière voie suivie concerne l'étude du mode de production associant un quark top et un boson W. Ce mode de production n'a encore jamais pu être mis en évidence et il est de plus très sensible à la présence de nouveaux bosons chargés qui sont prévus par les modélisations au-delà du Modèle Standard : c'est le cas du boson de Higgs chargé prévu dans les modèles supersymétriques à deux doublets de Higgs ou un quark d'une quatrième famille ( $b'$ ). Le groupe du LPSC s'est investi dans la mise au point de la sélection de ces événements et dans l'estimation des incertitudes systématiques associées. La difficulté réside dans le niveau très élevé de processus de fond à notre signal (voir figure 6), qui nécessite l'utilisation de techniques optimales de séparation tout en minimisant les effets des incertitudes systématiques affectant la connaissance de ces fonds. Les résultats obtenus par le groupe ont constitué les résultats officiels de la collaboration et ont été montrés aux conférences d'hiver et d'été 2011 : ils ont permis de poser les premières limites mondiales sur ce processus, obtenues avec  $0,7 \text{ fb}^{-1}$ . Le groupe a eu la responsabilité de l'édition de la note publique correspondante. Depuis, le LPSC travaille à la mesure de la section efficace de ce processus, avec une signification de plus de trois écarts standards, qui constituerait une première évidence. L'utilisation d'*arbres de décision boostés*, comme dans le cadre de l'analyse de la voie-t, permet d'optimiser la discrimination des fonds au signal, provenant des paires de quarks top. Avec une plus haute statistique, cette optimisation est obtenue maintenant par minimisation des incertitudes systématiques dominantes.

Ces études ont également montré que toutes ces mesures seront dominées par les incertitudes systématiques affectant la procédure de sélection : expérimentalement, les principaux biais proviennent de la méconnaissance de l'échelle d'énergie des jets, de l'efficacité d'étiquetage des jets de b et du taux de mauvaise identification des jets de quarks légers, ainsi que du paramétrage des effets de radiations de gluons des partons initiaux ou finaux, pour un total de 8-10%. L'estimation des fonds est particulièrement complexe et repose sur l'usage de simulations dont les prédictions théoriques sont aujourd'hui non fermement établies, induisant une incertitude de 5 à 10% selon les processus en jeu.

Toutes nos analyses utilisent des méthodes statistiques sophistiquées. Ces méthodes statistiques, basées sur la combinaison de méthodes de vraisemblance, ont été implémentées de façon générique, dans le cadre d'un software pouvant être utilisé par des utilisateurs extérieurs au groupe. Plusieurs fonctions de vraisemblance ont été définies et optimisées contre les processus de fond spécifiques. Leur utilisation a permis dans les deux analyses une amélioration de la pureté des lots attendus de 30 à 40% en événements de signal à efficacité de sélection égale. Ces performances permettent un meilleur contrôle des incertitudes systématiques qui dominent les mesures dès les premières données. Elles ont également conduit à la définition d'une procédure qui permet de déterminer la normalisation et les formes des fonds sur les données elles-mêmes, en enrichissant les lots en processus spécifiques, de façons indépendantes à partir des fonctions de vraisemblance, par la sélection de régions où le signal attendu est négligeable. Ces travaux ont orienté la stratégie de mesure de la collaboration ATLAS pour les premières données.



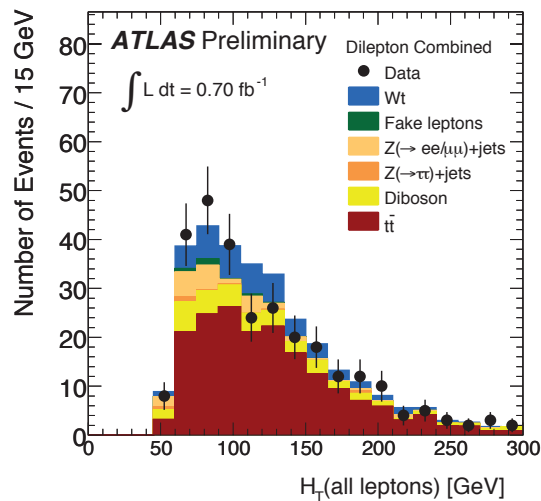


Fig. 6: Somme des impulsions transverses des leptons pour une luminosité de  $0,7 \text{ fb}^{-1}$ .

### Étude du spectre di-photons à la recherche du boson de Higgs et du graviton

L'intérêt de l'étude du spectre de masse invariante de deux photons au LHC est multiple. D'abord il est un test de la théorie QCD perturbative (pQCD). Ensuite il permet de chercher le boson de Higgs en sa désintégration en deux photons, prévue par le Modèle Standard (MS)<sup>1</sup>, ou des particules prévues dans des modèles de nouvelle physique, comme le graviton dans le cadre du modèle de dimensions supplémentaires Randall-Sundrum (RS)<sup>2</sup> ou de Arkani-Hamed, Dimopoulos et Dvali (ADD)<sup>3</sup>.

Les mesures de précision entreprises au LEP ont contraint la masse du boson de Higgs du MS à une limite inférieure de  $114,4 \text{ GeV}/c^2$  avec des recherches directes. De nouvelles contraintes ont été récemment produites par le Tevatron qui excluent une masse dans l'intervalle  $[156, 177] \text{ GeV}/c^2$ . Dans ce cadre, l'intervalle en masse entre 110 et  $140 \text{ GeV}/c^2$  reste d'un grand intérêt, et dans cette région le MS prévoit que le Higgs se désintègre en deux photons. Il devrait donc se manifester comme une résonance sur un continuum de bruits de fond, dont les principales contributions sont la production non résonante de di-photons (fond irréductible) et la production de couples photon-jet où le jet est mal reconstruit et interprété comme un photon (fond réductible). Cela est a priori une signature expérimentale très claire, mais le rapport d'embranchement en deux photons est faible et les bruits de fond sont importants. Il est donc nécessaire d'accumuler une grande quantité de données pour observer le signal et en même temps réduire et estimer correctement les bruits de fond. Actuellement et jusqu'à la fin 2011, le LHC pourra fournir des limites sur la section efficace de production du Higgs.

À l'automne 2009, quand l'énergie dans le centre de masse pour les premières années de fonctionnement du LHC a été fixée à 7 TeV, nous avons voulu mettre à jour le potentiel d'exclusion du canal, en utilisant aussi les estimations théoriques les plus récentes pour le signal et le bruit de fond, basées sur des calculs aux ordres supérieurs (NLO). Cela fut aussi l'occasion de finaliser la technique d'analyse et de mettre en place les outils pour l'extraction des limites. Les résultats ont fait l'objet d'une note publique ATLAS<sup>4</sup>.

Depuis le début de la prise de données, le spectre en masse des photons a été étudié par étapes. La première était la mesure de la section efficace de production de photons seuls issus du processus primaire. Nous avons participé à la comparaison des premières données avec la simulation concernant les variables qui décrivent la gerbe électromagnétique dans le calorimètre. La mesure de la section efficace de production de photons seuls a fait l'objet de deux publications pour des intervalles en énergie transverse  $E_T$  des photons différents<sup>5</sup>. Elle a mis en évidence la capacité du détecteur à isoler des échantillons de photons avec une très bonne efficacité et une pureté supérieure à 90%. La seconde étape a été de faire la même étude pour les di-photons et a permis la publication de la mesure de la section efficace<sup>6</sup>. Ce travail nous a permis d'avoir une bonne confiance dans notre estimation du bruit de fond irréductible. Dans les deux étapes, les mesures sont globalement compatibles avec les prévisions théoriques de pQCD mais montrent la nécessité d'améliorer ces prévisions dans des régions particulières du spectre où la fragmentation des quarks en photons et l'émission de gluons de basse énergie sont importantes.

La première limite d'ATLAS sur la production d'un boson de Higgs se désintégrant en deux photons a été montrée début 2011, et a été mise à jour pendant l'été 2011 (Fig. 7)<sup>7</sup>.

Depuis le début 2011 nous avons porté notre attention sur la partie la plus énergétique du spectre en masse, celle supérieure à 500 GeV. Ceci permet l'étude de modèles de dimensions supplémentaires qui prévoient l'existence de gravitons de spin 2 à des masses élevées qui se désintègrent en partie en deux photons. Dans cette analyse nous avons abordé des problématiques différentes de l'analyse du Higgs. En particulier, il est nécessaire d'extrapoler pour les photons de haute

énergie, les efficacités de reconstruction des photons de basse énergie, car à haute énergie nous n'avons pas suffisamment de données collectées pour des études des performances. Aussi, comme la prise des données a été caractérisée par une présence importante d'évènements sous-jacents, nous avons développé des méthodes pour l'évaluation de l'impact de l'empilement sur cette étude. Les résultats, qui ont été présentés aux conférences 2011 et soumis pour publication, dépassent les limites précédentes sur les paramètres du modèle fournies par le Tevatron. Dans le cadre du modèle Randall-Sundrum, la limite à 95% de niveau de confiance sur la masse du graviton le plus léger en fonction du facteur de couplage  $k/M_{Pl}$  avec les champs du MS est illustrée sur la figure 8. Dans le cadre du modèle ADD, la limite à 95% de niveau de confiance sur l'échelle fondamentale de Planck varie entre 2,27 et 3,53 TeV selon le nombre de dimensions supplémentaires et le formalisme utilisé. Cette recherche est actuellement l'objet d'une thèse de doctorat au laboratoire<sup>8</sup>.

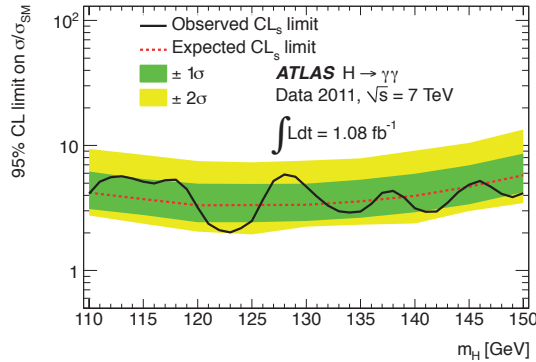


Fig. 7 : Limite sur la production d'un boson de Higgs se désintégrant en deux photons en fonction de la masse pour une luminosité intégrée de  $1,08 \text{ fb}^{-1}$ .

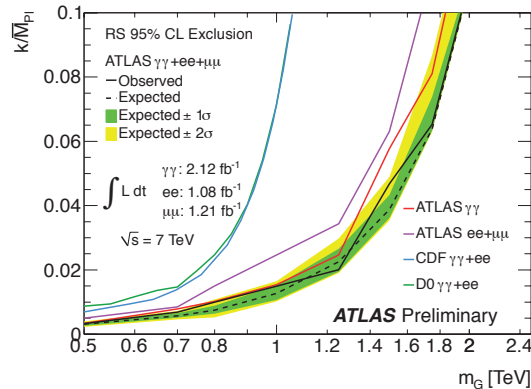


Fig. 8 : Limite sur la production d'un graviton Randall-Sundrum en fonction de sa masse et du couplage  $k/M$ . Les résultats du Tevatron sont montrés pour comparaison.

**Pour en savoir plus**

- <sup>1</sup> Large Hadron Collider Workshop, Aachen, C. Aurenche and C. Seez, edited by G. Jarlskog and D. Rein, in Proc, CERN, 90-10/ ECFR 90-133 (1990)
- <sup>2</sup> Large mass hierarchy from a small extra dimension, L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999)
- <sup>3</sup> N. Arkani-Hamed et al., Phys. Lett. B429, 263 (1998)
- <sup>4</sup> ATL-PHYS-PUB-2010-009
- <sup>5</sup> Phys. Rev. D 83 (2011) 052005 and Phys. Lett. B706 (2011), 150-167
- <sup>6</sup> CERN-PH-EP-2011-088, accepted by PRD
- <sup>7</sup> arXiv:1108.5895v1 [hep-ex]
- <sup>8</sup> Thèse de Quentin Buat, débutée en octobre 2010

**Recherche de nouveaux bosons de jauge neutres**

De nombreux modèles au-delà du Modèle Standard (MS) prédisent l'existence de nouveaux bosons de jauge. Nous nous intéressons au cas des bosons neutres, dans le cadre de deux grandes familles de modèles : ceux dans lesquels le groupe de jauge du MS est étendu (par exemple les modèles de grande unification), et ceux qui proposent d'incorporer un nombre de dimensions d'espace-temps supérieur à quatre, qu'on appelle modèles avec dimensions supplémentaires. On note  $Z'$  l'état propre de masse du plus léger nouveau boson neutre dans les premiers modèles, et le premier état des excitations dites de Kaluza-Klein (KK) des bosons neutres du MS dans les seconds.

Nous avons choisi le canal  $Z' \rightarrow e^+e^-$  qui est mesurable avec ATLAS avec la meilleure précision. Depuis le dernier rapport d'activité, le LHC est entré en service et ATLAS a commencé à acquérir des données. Nous avons donc appliqué les études précédemment effectuées sur des données de simulation aux données enregistrées par ATLAS en 2010, dans un premier temps, soit environ  $36 \text{ pb}^{-1}$  de luminosité intégrée. L'analyse consiste à sélectionner deux électrons bien reconstruits et bien identifiés. Le principal bruit de fond (irréductible) provient du processus  $Z/\gamma^* \rightarrow e^+e^-$ ; les autres bruits de fond sont constitués de paires de tops et d'événements  $W$ +jets et multi-jets. Tous sont évalués à l'aide de la simulation Monte Carlo, sauf la composante multi-jets qui est évaluée directement dans les données en renversant des coupures d'identification des électrons. L'observable principale est la masse invariante di-électron, représentée sur la figure 9. Aucun excès de données n'étant observé par rapport aux prédictions, une limite sur la masse d'un  $Z'$  se désintégrant en une paire électron positron est dérivée dans le cadre de modèles de grande unification basés sur le groupe  $E_6$  en comparant la section efficace attendue à la section efficace maximale autorisée par les données. Cette dernière est calculée en ajustant le spectre de masse invariante avec la forme prévue par la théorie, et en utilisant une méthode Bayésienne pour dériver la limite. Le résultat obtenu, illustré sur la figure 10, a été publié dans Physics Letter B (un membre du groupe était responsable de l'édition de cette publication). Un  $Z'$ , dans le cadre de ces modèles, est exclu pour des masses inférieures à  $604 \text{ GeV} - 829 \text{ GeV}$ , suivant le modèle considéré et après combinaison avec le canal dimuon.

L'analyse d'une partie des données enregistrées en 2011 a permis de mettre ces résultats à jour avec  $1 \text{ fb}^{-1}$  de luminosité intégrée, soit trente fois plus que la publication précédente. Les résultats, acceptés à la publication, ont permis de porter les limites en masse à la plage  $1,49 \text{ TeV} - 1,64 \text{ TeV}$ . L'analyse de la totalité des données enregistrées en 2011 ( $5 \text{ fb}^{-1}$ ) est en cours et nous sommes de nouveau responsables de l'édition de la publication. Celle-ci fait l'objet de la thèse d'un étudiant du groupe; elle inclura également l'interprétation des résultats dans d'autres modèles théoriques.

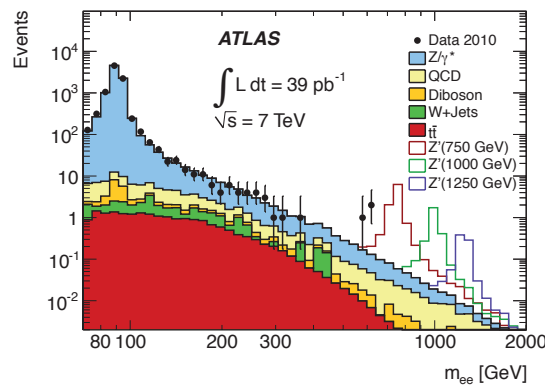


Fig. 9: Masse invariante di-électron après la sélection finale comparée à la somme des bruits de fond, avec trois exemples de signal superposés.

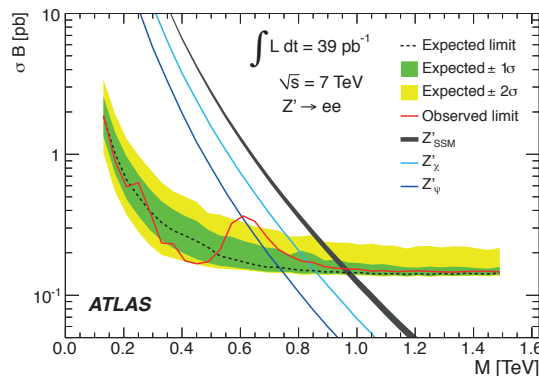


Fig. 10: Limites attendue et observée à 95% de degré de confiance sur le produit de la section efficace par le rapport d'embranchement, et section efficace attendue pour la production de  $Z'$  dans le modèle séquentiel standard (SSM) et pour les deux modèle de type  $E_6$  ayant la plus petite et la plus grande section efficace. L'épaisseur de la courbe théorique pour le SSM représente l'incertitude théorique et est valable pour les autres courbes théoriques.

**Pour en savoir plus**

Search for high mass dilepton resonances in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  with the ATLAS experiment, ATLAS collaboration, Phys. Lett. B700:163-180,2011.

Search for dilepton resonances in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector, ATLAS collaboration, accepted by PRL.

# LE PROJET ILC

J.-Y. Hostachy, K. Krastev, L. Morin,

J. Bouvier, D. Dzahini, L. Gallin-Martel, E. Lagorio, F.-E. Rarbi, O. Rossetto, M. Yamouni, Service Électronique

Y. Carcagno, J. Giraud, D. Grondin, J.-C. Malacour, J. Menu, E. Perbet, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques  
Collaboration ILC

*The next major project of particle physics will be the International Linear Collider ILC: a linear accelerator in which electrons and positrons will collide with energies of 500 to around 1000 billion electronvolts. The LPSC-Grenoble is involved in the R&D activities for the International Large Detector (ILD) and in particular in the electromagnetic (EM) calorimeter (i.e. design of the fastening and cooling systems, design of the mechanics of the end-caps, test of EM prototypes, analysis of test beam data, performance studies, design of the calibration (16 bits DAC) and readout (low power 12 bit ADC) parts of the integrated electronics circuit.*

L'ILC (International Linear Collider) est un projet de collisionneur d'électrons et de positrons à une énergie totale comprise entre 90 GeV et 1 TeV. Deux détecteurs sont prévus pour enregistrer ce qui sera produit dans les collisions de particules. Ils profiteront des avancées technologiques récentes pour améliorer significativement les performances par rapport aux expériences actuelles de physique des particules.

Dans ce cadre, notre contribution est essentiellement orientée sur des activités de Recherche et de Développement en continuité avec l'historique et le savoir faire du groupe (calorimétrie EM, électronique et mécanique). Nous sommes membre de la collaboration internationale CALICE «CALorimeter for the LInear Collider Experiment» qui regroupe 57 Instituts de 17 pays différents provenant des 4 continents: Afrique, Amérique, Asie et Europe.

## Tests en faisceau, analyse des données et simulations

Certains des travaux qui suivent ont été réalisés en collaboration avec l'université de Casablanca au Maroc dans le cadre du LIA ILCP.

Les analyses ont concerné essentiellement les tests en faisceau qui ont eu lieu soit au CERN (Suisse) soit à Fermilab (USA) et qui ont mis en jeu les différents prototypes de calorimètres EM silicium-tungstène (Si-W) à haute granularité (un facteur 1000 comparé aux expériences «classiques»). En particulier nous avons travaillé sur: la technique d'identification des électrons à partir de la forme des gerbes, la méthode d'alignement des différentes couches actives des cellules de détection, les techniques de corrections des effets dus aux anneaux de garde des matrices de diodes, l'étude de la résolution en énergie sans ou avec rotation des prototypes de calorimètre EM, la linéarité, l'étude de la résolution spatiale et angulaire et enfin les comparaisons des résultats expérimentaux avec les prédictions obtenues à partir de simulations Monte-Carlo (voir Fig. 1). Ces travaux ont contribué à l'écriture de plusieurs articles et d'une thèse.

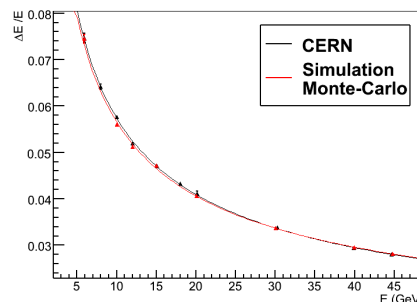


Fig. 1: Résolution en énergie du prototype de calorimètre EM (~10 000 voies) mesurée au CERN (en noir) et comparée aux prédictions Monte-Carlo (en rouge).

Nous avons aussi travaillé sur la mesure de la masse du boson de Higgs dans le canal  $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow e^+e^- + X$  pour le futur détecteur ILD (International Large Detector, fusion des projets à dominante européenne LDC et asiatique GLD) de l'ILC. La cinématique initiale de la collision est très bien définie. On peut alors remonter à la masse du boson de Higgs sans faire la moindre hypothèse sur ses modes de désintégration. La polarisation du faisceau permet dans ce cas une amélioration du rapport signal sur bruit. Le boson Z est reconstruit en sélectionnant les couples  $e^+e^-$  qui reproduisent au mieux la masse du Z. Enfin on introduit le bruit ce qui a pour effet de détériorer les résultats de nos précédentes données. Nous pouvons néanmoins conclure qu'avec une luminosité intégrée de  $250 \text{ fb}^{-1}$ , le boson de Higgs avec une masse de 120 GeV (dans le cadre du Modèle Standard) est susceptible d'être mis en évidence (voir Fig. 2). L'erreur sur la mesure de sa masse sera de l'ordre de 100 MeV selon l'état de polarisation du faisceau.

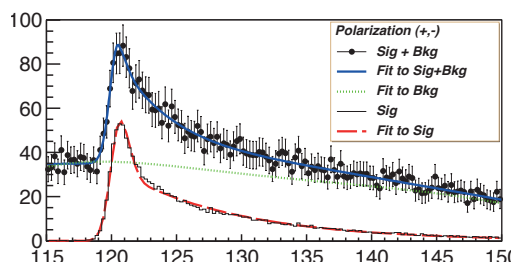


Fig. 2: Simulation de la masse de recul du boson de Higgs; en bleu: signal + bruit de fond; en vert: bruit de fond et en rouge: signal seul.

## Travaux de R&D

### Micro-électronique

Nous participons à la conception de l'électronique de lecture, de codage et d'étalonnage du calorimètre EM Si-W. Nous travaillons sur un convertisseur analogique numérique de 12 bits à 25 MHz précédé d'un multiplexeur (Fig. 3). La faible consommation est un paramètre critique pour cette étude car le calorimètre sera doté de plus de 100 millions de cellules de détection. Le circuit est polarisé en mode pulsé très rapide (extinction à 1/1000 de la consommation en 1  $\mu$ s) pour rendre la dissipation proportionnelle au rapport cyclique du faisceau ( $\sim 1$  ms toutes les 200 ms). Nos premiers résultats ont un facteur de mérite (consommation/vitesse) de 1,5 mW/MHz à l'état actif. Toutefois, la technologie CMOS 0,35  $\mu$ m présente une limitation sur la précision des gains des étages pipeline, ce qui dégrade la linéarité finale du convertisseur à  $\pm 4$  LSB. Une étude est en cours pour aller au delà de cette limitation technologique avec une méthode analogique ou une autre numérique. La consommation:  $\sim 140$  nW par canal est finalement bien meilleure que l'estimation dédiée initialement (2,5  $\mu$ W/voie).

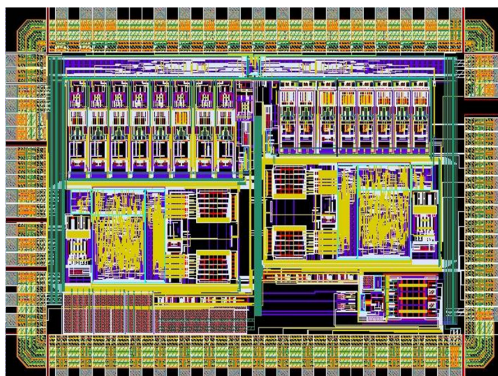


Fig. 3: Photo d'un multiplexeur 12 bits avec un ADC «pipe line» ayant un premier étage multi-bits avec structure DEM.

Nous travaillons aussi sur la conception d'un convertisseur numérique analogique pour l'étalonnage du calorimètre EM. Deux prototypes de convertisseur numérique analogique DAC 14 bits dite «matrice segmentée de capacités commutées» ont été réalisés respectivement à 5 et 15 MHz (Fig. 4). Les résultats sont excellents avec une non linéarité de  $\pm 0,4$  LSB. Le prototype à 15 MHz a été mis à profit pour un ADC de type approximations successives à 14 bits, ce qui permettra d'utiliser le DAC de la calibration pour faire aussi le codage des signaux.

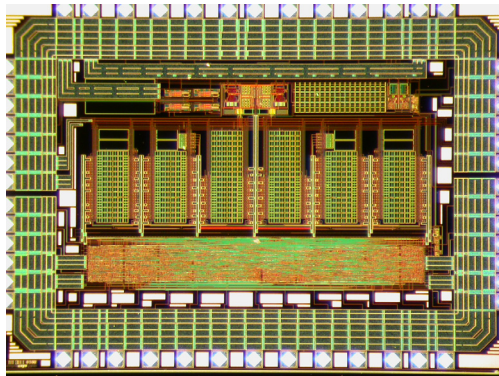


Fig. 4: Photo du circuit intégré d'étalonnage 14 bits.

Le laboratoire du CNESTEN (Rabat, Maroc) contribue ponctuellement à certaines phases de ces études.



## Mécanique

Les travaux du SERM (Service Études et Réalisations Mécaniques) mentionnés ci-après ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires LLR de Palaiseau et le LAL d'Orsay.

### Architecture générale des bouchons EM: dessins avancés et simulations numériques

La masse du tungstène dans chaque bouchon EM est d'environ 16 tonnes. Des travaux de simulation numérique ont donc été entrepris afin d'étudier le comportement mécanique de ce sous-détecteur subdivisé en 12 modules de 3 types différents pour chaque bouchon (voir Fig. 5). La structure alvéolaire (tungstène + fibres de carbone) sera remplie de plaques de tungstène prises en « sandwich » entre 2 fines couches d'un milieu actif (matrices de diodes en silicium). La tenue mécanique de la structure porteuse composite et les aspects de déformation ont déjà fait l'objet de travaux suivis de dessins avancés et de la réalisation de composants comme le système d'interface composite/métallique pour l'accrochage des modules et la rigidification de la structure. Une nouvelle architecture qui permettrait d'éviter certaines zones mortes (« cracks ») est en cours de validation technologique. Cette nouvelle structure requiert en effet des modules d'environ 2,50 m de long et nécessite donc la construction de prototypes afin de vérifier la faisabilité de la solution. La fabrication d'une première cellule composite longue a révélé début 2010 la difficulté de réalisation, des améliorations sont en cours au niveau du moulage de ces grandes alvéoles; pour des raisons de coût la réalisation de couches d'alvéoles prototypes sera entreprise fin 2011.

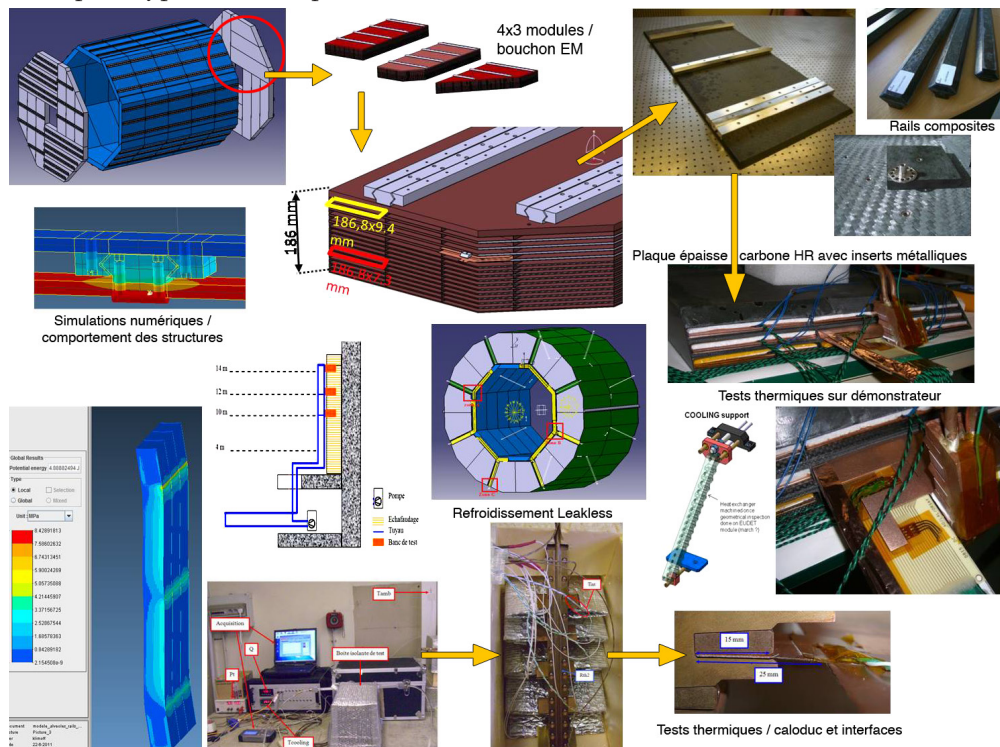


Fig. 5 : Mécanique dédiée au calorimètre EM Si-W.

### Assemblage et positionnement du calorimètre EM

Le système d'accrochage (seulement 3 [1,5 à 3] cm sont disponibles entre le tonneau [et les bouchons] des calorimètres EM et hadronique, pour le passage des fluides et commandes) constitue aussi un défi auquel nous apportons des solutions par la réalisation de prototypes de rails ainsi que par l'optimisation des modèles numériques. Des travaux concernant l'implantation et la tenue à l'arrachement des inserts supports ainsi que la validation du système d'assemblage et de positionnement ont été réalisés et présentés à la collaboration.

### Définition du système de refroidissement

Enfin un dispositif de refroidissement est nécessaire pour évacuer la chaleur produite par le grand nombre de voies électroniques. Là encore le peu de place disponible (le calorimètre EM doit rester le plus compact possible) est évidemment source de difficultés. Après le test d'un système à caloducs, un système de circulation fluide sous-atmosphérique « leakless » est en cours de réalisation après un test en grandeur réel en 2010. L'étude de l'installation globale est en cours (circuits, sécurité, contrôle commande).

### Le Démonstrateur

Un premier prototype appelé « demonstrator » (1,30 m de long, 3 couches alvéolaires) à été réalisé par la collaboration. Le SERM de Grenoble a pris activement part à sa conception et construction, fournissant les « couvercles » interne

et externe ainsi que le système d'accrochage. Il a permis notamment de vérifier le fonctionnement du proto de refroidissement conçu à Grenoble et surtout de valider les simulations qui serviront ensuite à concevoir le système global pour l'ensemble du calorimètre.

#### **Le Module EUDET**

Un module de 1,50 m de long, 15 couches alvéolaires (dit EUDET) proche de la version finale est en cours de finalisation. Comme pour le démonstrateur, le SERM a pris activement part à sa construction (« couvercles » interne et externe, système d'accrochage). Le système de refroidissement Grenoblois équipera le prototype. Une fois terminé et muni de son électronique et du système d'acquisition, le prototype sera testé sous faisceau soit au CERN soit à FERMILAB fin 2011. Évidemment nous comptons participer activement aux campagnes de mesures.

#### **Le projet AIDA**

Ce projet répondant à l'appel FP7-INFRASTRUCTURES-2010-14 de la Commission Européenne a pour but de fournir un design du ECAL proche de celui proposé pour l'ILC, nécessitant la réalisation de prototypes validant les différentes technologies utilisées. À ce titre, pour la partie mécanique, le SERM s'est engagé à développer le système opérationnel de refroidissement devant assurer une bonne thermalisation de l'électronique embarquée ainsi que le système optimisé d'accrochage des modules.

## Groupe UCN

F. Naraghi, G. Pignol, K. Protasov, D. Rebreyend

R. Faure, Service Détecteurs et Instrumentation

O. Bourrion, E. Lagorio, J.-P. Scordilis, C. Vescovi, Service Électronique

Y. Carcagno, D. Grondin, E. Perbet, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques

G. Dargaud, Service Informatique

*Our group is conducting a program to search for new physics with precision experiments using ultracold neutrons (UCNs). The GRANIT experiment, being assembled at the ILL, will do the spectroscopy of the quantum neutron bouncing to search for new interactions in the micrometer range. The nEDM experiment, waiting for its first UCNs at PSI, is about to take data to find the source of CP violation at the origin of the baryon asymmetry of the universe.*

Notre groupe a poursuivi le développement de son programme de recherche de nouvelle physique basé sur des expériences de précision utilisant des neutrons de très basse énergie (UCN = Ultra Cold Neutron) : l'expérience GRANIT d'étude de la spectroscopie du système quantique gravitationnel neutron-Terre dont l'objectif principal est la recherche de nouvelles interactions dans le domaine micrométrique; l'expérience nEDM de mesure du moment électrique dipolaire du neutron, dédiée à la recherche de nouvelles sources de violation de CP. Ces 2 dernières années ont constitué une période de transition et n'ont pas permis d'obtenir les premiers résultats escomptés en raison de nombreuses difficultés techniques, en particulier sur les nouvelles sources d'UCN en cours de développement. L'expérience nEDM s'apprête toutefois à démarrer la prise de données.

### Le projet GRANIT

L'institut Laue Langevin (ILL, Grenoble) et le LPSC sont les deux principaux laboratoires contribuant au projet GRANIT. Le LMA<sup>1</sup> apporte son savoir-faire pour la réalisation des traitements de surface des miroirs et un certain nombre de laboratoires russes, allemands et américains participent également.

Depuis l'installation de la salle blanche accueillant le spectromètre, fin 2008, nous sommes confrontés à des difficultés liées à la source cryogénique utilisant l'hélium superfluide pour produire les UCN. La source a été testée avec succès à l'ILL pour la première fois en décembre 2010. Depuis lors, nous travaillons au raccordement de la source au spectromètre, mais les performances cryogéniques de l'installation ne permettent plus d'atteindre la température nominale de 0,7 K. En lien avec des experts cryogénistes, des modifications ont été proposées et seront mises en œuvre à l'automne 2011.

Concernant le cas de physique, il a été enrichi considérablement cette année en remarquant que GRANIT sera sensible à des forces supplémentaires prédites par certains modèles cosmologiques. Il s'agit des théories dites « caméléons », invoquant un champ scalaire cosmologique responsable de l'expansion accélérée de l'univers.

#### Pour en savoir plus

*Strongly Coupled Chameleons and the Neutronic Quantum Bouncer*, P. Brax et G. Pignol, à paraître dans *Physical Review Letters*.

### L'expérience nEDM

La collaboration nEDM@PSI a pour objectif d'améliorer la mesure du moment dipolaire électrique du neutron (nEDM) au niveau nécessaire pour découvrir une valeur non nulle, dans l'hypothèse où l'asymétrie matière-antimatière a été générée à la transition de phase électrofaible dans l'univers primordial.

La phase I du projet a été achevée avec succès en 2009 : il s'agissait d'améliorer un appareillage existant et de caractériser ses performances auprès de la ligne de neutrons ultrafroids de l'ILL. Le LPSC a contribué de façon déterminante à cette phase, notamment en assurant la coordination technique. La finalisation des analyses s'est poursuivie en 2010 et a abouti à une nouvelle limite dans un canal de violation de l'invariance de Lorentz.

La phase II du projet a commencé avec l'arrivée du spectromètre début 2009 à Zurich au Paul Scherrer Institut (PSI), auprès de la source de neutrons ultrafroids la plus intense du monde, entrée en fonction à l'été 2011. L'appareillage est maintenant complètement assemblé. La prise de données de physique débutera en 2012, pour une durée de deux ans au minimum.

La contribution du LPSC à la phase II concerne : 1) la conception, fabrication, caractérisation de la source de courant ultrastable alimentant la bobine pour le champ magnétique principal 2) le module électronique principal d'acquisition de données 3) l'amélioration de l'optique de lecture du comagnétomètre mercure 4) la découverte d'une théorie généralisée décrivant l'effet systématique principal.

#### Pour en savoir plus

*New constraints on Lorentz invariance violation from the neutron electric dipole moment*, I. Altarev et al, *EPL*, 92 (2010) 51001.

<sup>1</sup> Laboratoire des Matériaux Avancés, Lyon (France)

