

Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

Découvrir et étudier les composants fondamentaux de l'univers, comprendre les interactions qui les lient, tel est l'ambitieux objectif des expériences décrites dans ce chapitre.

Pendant les 40 dernières années, expérimentateurs et théoriciens ont contribué à l'élaboration d'un modèle: le modèle standard de la physique des particules. Celui-ci décrit l'ensemble des particules qui constituent les briques élémentaires de la matière, telles que nous les connaissons aujourd'hui, ainsi que leurs interactions, à l'exception notable de la gravité. Construit à partir des avancées théoriques du XX^e siècle, il allie la mécanique quantique, la relativité restreinte ainsi que les symétries des groupes. La gravitation restant le domaine de la relativité générale, le modèle standard permet une description précise des trois autres interactions connues à ce jour: l'électromagnétisme, l'interaction faible et l'interaction forte.

Le succès du modèle standard est double: il tient d'une part dans sa réussite à décrire dans un même cadre théorique l'interaction forte et de façon unifiée l'électromagnétisme et l'interaction faible (interaction électrofaible), d'autre part dans le fait de son excellente cohérence avec les observations. En effet, il permet de rendre compte d'une écrasante majorité des phénomènes observés à ce jour et a permis de prédire l'existence de particules aujourd'hui mises en évidence

expérimentalement. On citera par exemple les bosons Z et W associés à l'interaction électrofaible ou le quark top, la particule élémentaire de matière la plus massive connue. Quant à la précision des mesures, la validité du modèle standard a été testée expérimentalement au niveau du pour mille. Ces mesures ont été effectuées dans les années 1990 par les collisionneurs SLC (Stanford Linear Collider) aux États-Unis et LEP (Large Electron Positron collider) du CERN en Europe à la frontière franco-suisse et sont actuellement complétées par les expériences en cours auprès du Tevatron, le collisionneur de Fermilab aux États-Unis.

Si l'on résume le contenu en particules du modèle standard (voir Fig. 1), on trouve d'une part les fermions ou particules de matière, de spin demi-entier, et d'autre part les bosons, particules porteuses des interactions qui elles sont de spin entier. L'interaction entre deux particules de matière se fait en effet par l'échange d'un boson qui peut être l'un des huit gluons de l'interaction forte, le photon de l'interaction électromagnétique et l'un des trois bosons Z et W de l'interaction faible. Le modèle standard contient donc 12 particules associées aux interactions. Les fermions quant à eux, sont séparés en deux catégories: les quarks, seuls sensibles à l'interaction forte et les leptons dont le représentant le plus connu est l'électron. Ces dernières particules sont classées en trois familles, la première

(quark up, quark down qui entrent dans la composition des neutrons et protons, l'électron et le neutrino électronique) est la base de la matière ordinaire. Les deux autres familles sont très similaires à la première avec comme différence notable la masse des particules qui les composent: par exemple le quark top est 200 fois plus massif que le quark charmé, lui-même 1000 fois plus massif que le quark up. L'ensemble forme un total de 12 particules auquel il faut ajouter un tableau similaire composé de 12 antiparticules: on a montré en effet qu'à chacun des fermions est associée une particule jumelle de mêmes caractéristiques mais dont les charges sont opposées à celles de la particule.

le nouveau collisionneur de protons du CERN, qui a produit ses premières collisions en novembre 2009.

Malgré le bilan extrêmement positif des tests du modèle standard, nous ne pouvons nous satisfaire de ce dernier pour plusieurs raisons. D'abord, il ne décrit pas de façon unifiée l'interaction forte avec les autres et comme il a été déjà souligné, l'interaction gravitationnelle est complètement absente de cette théorie. Ensuite, l'existence de trois familles et l'échelonnement des masses des particules en fonction de ces familles ne reçoivent aucune justification. De plus, à haute énergie, les calculs de la masse du boson de Higgs

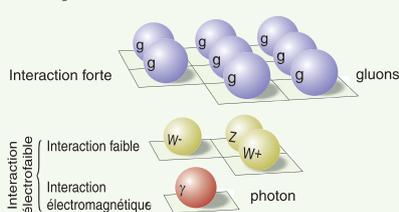
ne sont pas stables, ils divergent. Enfin, le modèle standard n'explique que 5% du contenu de l'univers tel que nous l'observons aujourd'hui.

Plusieurs théories ont été proposées pour résoudre ces problèmes. Parmi celles-ci nous pouvons citer la supersymétrie,

Les particules élémentaires

Quarks	u <small>up</small>	c <small>charmé</small>	t <small>top</small>
	d <small>down</small>	s <small>strangé</small>	b <small>beauté</small>
Leptons	e <small>électron</small>	μ <small>muon</small>	τ <small>tau</small>
	ν_e <small>neutrino électronique</small>	ν_μ <small>neutrino muon</small>	ν_τ <small>neutrino tau</small>
	1 ^{ère} 2 ^{ème} 3 ^{ème} familles		

Les porteurs des interactions



Le boson de Higgs



Fig. 1 : Tableaux des particules élémentaires, des particules liées aux interactions et du boson de Higgs selon le modèle standard.

L'ensemble de ces particules (fermions et bosons) ont été observées par les expériences auprès de différents accélérateurs, certaines très récemment comme le quark top en 1995 ou le neutrino tau en 2000 au Fermilab. Seul manque à l'appel, le boson de Higgs nécessaire au mécanisme qui permet aux particules du modèle standard d'acquiescer une masse. Les mesures de la masse du W et du top indiquent cependant que, s'il existe, il devrait être découvert au Tevatron ou au LHC,

les théories de grande unification, les théories avec des dimensions supplémentaires, la théorie des cordes... En général, ces théories, qui ne s'excluent pas forcément les unes des autres, supposent l'existence de nouvelles particules ou de nouvelles interactions que nous pouvons rechercher de façon directe ou indirecte. Les groupes du LPSC, dont le travail est décrit dans ce chapitre, contribuent ainsi à cet effort de recherche, soit en mesurant avec une grande précision les para-

mètres du modèle standard et en cherchant à découvrir des indices indirects de l'existence de ces nouvelles particules, soit en tentant de les mettre directement en évidence.

Au LPSC, nous travaillons sur deux grands types d'expérience: les expériences auprès de collisionneurs qui utilisent des particules de très hautes énergies jusqu'à quelques TeV (soit 10^{12} eV) et les expériences utilisant des neutrons de très basse énergie de l'ordre du neV (soit 10^{-9} eV).

En ce qui concerne les premières, nous analysons les données de l'expérience DØ qui étudie le résultat des collisions de protons et d'antiprotons à 1,96 TeV du Tevatron. Les chercheurs de ce groupe mesurent entre autres la masse du boson W, ce qui permet en particulier de contraindre la masse du Higgs. Dans la continuité de cette thématique, les techniques d'analyses permettant de découvrir le Higgs sont développées par le groupe ATLAS du LPSC. ATLAS est l'une des quatre principales expériences du LHC. La grande énergie de ce collisionneur (qui devrait atteindre 14 TeV à terme), laisse présager la possibilité de découvrir de nouvelles particules ou interactions. Ainsi, nous avons développé des analyses pour mieux étudier le quark top et permettre éventuellement de voir les signes de la présence d'un Higgs chargé, prédit par la supersymétrie par exemple. Les potentiels de découverte d'un boson de jauge Z', présent dans différentes théories, sont aussi à l'étude.

Ce travail de recherche ne serait cependant pas possible sans l'implication des services techniques du laboratoire et des groupes de physique dans la construction du détecteur. Ce travail impressionnant commencé il y a plus de dix ans est maintenant achevé et ce rapport donne le détail des toutes dernières interventions sur le détecteur. Les performances des détecteurs sont maintenant mesurées, étudiées et améliorées en continu. Enfin, les membres des services techniques et des groupes de physique continuent le travail permettant le traitement informatique de la gigantesque quantité de données que devrait produire le LHC.

Par ailleurs, nous préparons le futur puisque ce rapport décrit aussi le travail des membres du groupe de physique et des services techniques travaillant pour l'ILC (International Linear Collider). Vous trouverez dans la suite les développements autour des futures expériences qui devraient prendre place auprès de ce collisionneur linéaire d'électrons, actuellement en projet.

Enfin, ce rapport se termine par la description du travail du groupe qui développe des expériences utilisant les neutrons froids de très basse énergie. Ces particules sont en effet des sondes qui permettent de tester les interactions avec une très grande précision: la gravitation de façon directe avec l'expérience GRANIT et des interactions au-delà du modèle standard de façon indirecte via la mesure du moment dipolaire électrique du neutron, avec l'expérience nEDM.

Expérience DØ auprès du TeVatron

Y. Arnoud, B. Martin dit Latour, G. Sajot, J. Stark
Collaboration DØ

The DØ experiment is currently accumulating data at the FNAL proton antiproton collider, the Tevatron. The group is working on technical tasks leading to the understanding and improvement of the calorimeter performance. This work is the basis of the physics analysis which are centred on the measurements of the top pair production cross section and the W mass and width.

Les expériences CDF et DØ sont installées auprès du Tevatron, le collisionneur du Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) près de Chicago (USA). Le Tevatron produit 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, le Tevatron détient le record mondial d'énergie dans le centre de masse, et ce, jusqu'au démarrage du Large Hadron Collider (LHC) au CERN. DØ est une collaboration internationale d'environ 500 physiciens répartis dans 82 institutions et 19 nations. Le groupe de Grenoble participe à DØ depuis mi-1998. Depuis le démarrage, en 2001, de sa deuxième phase de fonctionnement (Run II), le Tevatron a accumulé environ 6 femtobarns inverse (fb^{-1}) de données enregistrées avec un record de luminosité instantanée de $3,5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Contributions techniques

Elles concernent le suivi et l'amélioration des performances du calorimètre et l'étude de l'efficacité de reconstruction et d'identification des jets.

Étalonnage des calorimètres

La précision mécanique de la fabrication des modules des calorimètres était adaptée pour le Run I, mais avec la réduction du temps d'intégration au Run II (132 ns), les imprécisions mécaniques résiduelles donnent lieu à des variations allant jusqu'à 20% entre les gains des différentes cellules. Une méthode mise au point à Grenoble a été utilisée pour étalonner toutes les cellules des calorimètres de DØ avec une grande précision. La méthode est basée sur des données de collision qui sont enregistrées à l'aide d'un déclenchement spécifique, développé par un membre du groupe.

Identification des jets

À DØ, les efficacités de reconstruction et d'identification des jets sont essentiellement mesurées sur des échantillons «di-jet», par la méthode dite «tag and probe». Cependant, ces mesures sont peu fiables pour les jets de basse quantité de mouvement transverse (p_T). Un membre du groupe a développé une procédure pour obtenir ces efficacités à partir d'événements Z+jet, pour lesquels le boson Z recule face à un jet de faible p_T (Fig. 1). Il s'est également impliqué dans l'identification des jets dans un environnement à haute luminosité. L'augmentation des performances de l'ac-

cérateur résulte en un nombre accru d'interactions proton-antiprotons lors d'une collision. Pour parvenir à distinguer les jets provenant de l'interaction dure et ceux produits lors d'interactions additionnelles, l'information calorimétrique est comparée aux traces issues des différents vertex reconstruits. La discrimination est basée sur la quantité de mouvement des traces que contient le jet, ainsi que sur la probabilité pour chaque vertex d'être le vertex primaire.

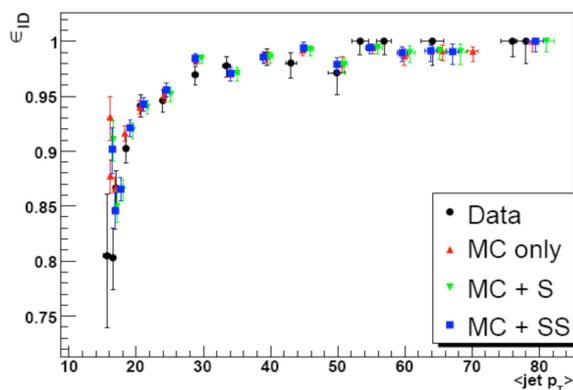


Fig. 1 : Distribution de l'efficacité d'identification des jets en fonction de leur quantité de mouvement transverse ($p_T > 13 \text{ GeV}$) dans le calorimètre central pour les données, le MC sans correction, le MC+S (S = correction de smearing seulement), le MC+SS (SS = correction de smearing et de shifting). SSR (Smearing Shifting Removing) est une procédure de correction appliquée aux jets du MC.

Analyses de Physique

Elles concernent la mesure de la section efficace de production de paires top-antitop (notées $t\bar{t}$ dans la suite) et la mesure de la masse et de la largeur du boson W.

Mesure de la section efficace de production $t\bar{t}$

À l'heure actuelle, les propriétés du quark top sont encore mal connues car sa découverte est récente (1995 par CDF et DØ) et du fait de sa masse (mesure combinée CDF et DØ : $173,1 \pm 1,3 \text{ GeV}$), sa section efficace de production est faible (environ 7 pb). Au Tevatron, la production de paires $t\bar{t}$ se fait (Fig. 2) par l'annihilation d'un quark et d'un anti-quark ou par la fusion de gluons. Dans le Modèle Standard, le quark top se désintègre dans près de 100% des cas en un quark b et un boson W.

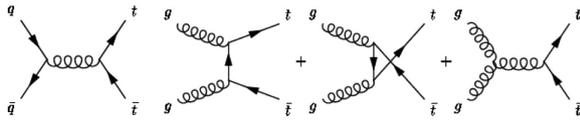


Fig. 2: Modes de production des paires $t\bar{t}$ au Tevatron : par annihilation de quarks (85% des cas) et par fusion de gluons (15% des cas).

Les analyses se différencient selon le mode de désintégration du W . Le groupe a eu en charge l'analyse dans le canal 2 électrons + énergie transverse manquante (MET). Il s'agit d'une analyse purement topologique qui repose sur la présence de deux électrons isolés, d'énergie transverse manquante (MET) et d'au moins deux jets. Elle a été réalisée sur les données enregistrées entre avril 2002 et février 2006 et correspondant à une luminosité intégrée d'environ 1 fb^{-1} . Il a été observé que l'impulsion transverse du boson Z (p_T) n'est pas bien modélisée par le générateur ALPGEN utilisé par la collaboration. Une procédure de pondération a donc été mise au point pour accorder la distribution du p_T du Z dans le MC avec celle qui est observée dans les données. Il a fallu aussi déterminer l'efficacité de déclenchement des événements afin de l'appliquer au MC. Le nombre d'événements de fond provenant de jets faussement identifiés comme électrons dans les événements W +jets et multijets est estimé à partir des données par une procédure de maximum de vraisemblance sur la distribution d'une variable de qualité de l'électron. De même le nombre d'événements dus à une mesure erronée de la MET est obtenu à partir des données. Il a été vérifié qu'à toutes les étapes de l'analyse, il y a accord à la fois en forme et en nombre d'entrées dans les distributions des données et du MC. La section efficace mesurée (pour une masse de top de 170 GeV) est de: $\sigma(t\bar{t}) = 9,6 + 3,2 - 2,7$ (stat) + 1,0 - 0,9 (syst) + 0,8 - 0,7 (lumi) pb. Cette analyse a été combinée avec les analyses lepton+trace et dilepton pour donner une section efficace égale à $8,18 + 0,98 - 0,87$ pb.

Mesure de la masse du boson W et de sa largeur

La masse du boson W est connue actuellement avec une incertitude de 25 MeV, soit une précision de 0,0003. L'objectif est de réduire cette incertitude sur la masse du W afin de contraindre plus fortement la masse du Higgs. Par exemple une incertitude de 2,1 GeV sur la masse du top se traduit par une incertitude relative de 18% sur la masse du Higgs. Comparativement, il faut une incertitude de 12 MeV sur la masse du W pour avoir la même incertitude relative de 18% sur la masse du Higgs. Actuellement, c'est donc la précision sur la masse du W qui est le facteur limitant pour contraindre le Higgs.

L'analyse s'effectue dans le cas où le W se désintègre en électron et neutrino. Les seules grandeurs mesurées disponibles sont celles relatives à l'électron et au systè-

me de recul, c'est-à-dire tout ce qui est déposé dans le calorimètre. La masse est mesurée par l'intermédiaire de la masse transverse. La distribution obtenue dans les données est comparée à celles obtenues par simulation pour différentes masses de W (par pas de 5 MeV). La meilleure valeur est trouvée par maximum de vraisemblance. Une telle mesure de précision nécessite une compréhension très détaillée de la réponse des particules qui traversent le détecteur et en particulier du calorimètre. Cette étude coordonnée par l'un de membres du groupe a nécessité plusieurs années de travail d'une équipe dédiée. Il a fallu mettre au point de nouvelles techniques d'étalonnage, de mesures de la quantité de matière non instrumentée devant le calorimètre, des simulations très détaillées du développement des gerbes... L'analyse de 1 fb^{-1} de données enregistrées entre 2002 et 2006 a permis de mesurer une masse de $80,401 \pm 0,044$ GeV. À la fin du RunII l'incertitude sur la masse du W , par expérience, devrait être de l'ordre de 25 MeV. Cette analyse va se poursuivre par la mesure de la largeur du W par ajustement de la partie haute de la distribution de la masse transverse.

Pour en savoir plus

- DØ note 5579, B. Martin dit Latour et al, Final Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross section at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV in ee Final States Using p17 Data Set.
- DØ Collaboration Combination and interpretations of $t\bar{t}$ cross section measurements with the D0 detector. arXiv:0903.4800 and Fermilab-Pub-092-E submitted to Phys. Rev. D.
- DØ note 5893, T. Andeen et al Measurement of the W Boson Mass with 1 fb-1 of D0 Run II Data.

Expérience ATLAS auprès du LHC

B. Clément, J. Collot, S. Crépe-Renaudin, P.-A. Delsart, J. Donini, J. Labbé, F. Ledroit, A. Llerès, A. Lucotte, F. Malek, J. Morel, B. Trocmé, C. Weydert

S. Albrand, C. Gondrand, J. Fulachier, F. Lambert, Service Informatique

A. Béuille, Y. Carcagno, G. Damieux, J.C. Malacour, D. Marchand, E. Perbet, P. Petit, Scé Études et Réalisations Mécaniques
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 and building, the ATLAS experiment is now in a commissioning phase. Presampler and cryogenics for calorimetry were the main parts of the ATLAS detector built by the LPSC teams; they have successfully been installed in the ATLAS cavern and are fully operational. These important activities lead by the LPSC have given the way to calorimeter commissioning, software preparation and computing grid deployment. In parallel, strategies for physics analysis are being developed in three main directions: standard model Higgs physics, top quark physics and search of new particles outside standard field.

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 actuellement en service: le Tevatron au Fermi National Laboratory (Fermilab) aux États-Unis.

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 précisions aux échelles d'énergie accessible 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 le modèle standard, mettre en évidence le boson de Higgs, s'il existe, et découvrir des signes de nouvelle physique.

Ce rapport marque la fin d'une importante phase de construction et de tests des différents détecteurs qui composent l'expérience ATLAS. Les équipes du LPSC avaient en charge le développement, la construction et l'installation du pré-échantillonneur associé au calorimètre électromagnétique d'ATLAS et de la cryogénie de proximité de l'ensemble des calorimètres à argon liquide (tonneau et bouchon). Les calorimètres et la cryogénie associée ont été installés en 2005 dans la caverne et leur fonctionnement validé lors de tests, lors des prises de données cosmiques et fin 2008 lors des premières circulations de faisceaux dans le LHC. Des études importantes sont en cours pour s'assurer d'une compréhension détaillée des performances des

calorimètres et en particulier de la chaîne de lecture électronique. D'autre part, la prochaine prise de données doit être préparée par le développement d'algorithmes de contrôle de données et la définition de la politique de qualité des données. L'ensemble de ces activités sont décrites dans la première partie de ce rapport.

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 pétaoctets soit 10^{15} octets par an) ne peut être traitée et mise à disposition des milliers de physiciens d'ATLAS que grâce à une grille de calcul dont les ressources sont réparties partout dans le monde. Ces activités sont décrites respectivement dans la partie « Développement logiciel » et « Calcul LHC ».

Enfin, l'équipe du LPSC s'investit également dans la préparation aux analyses de physique elles-mêmes dans trois thématiques principales: la recherche du boson de Higgs standard, la physique du quark top et la recherche de nouvelles particules (Higgs chargé, bosons de jauge). Ce travail est décrit dans la dernière partie de cette section.

Détecteur et mise en route

Les équipes du LPSC sont principalement impliquées dans le travail de mise en route du calorimètre électromagnétique d'ATLAS. La partie cryogénie de proximité décrite ci-dessous a été terminée avec succès et un travail important est en cours pour que le calorimètre soit parfaitement prêt et ses potentialités pleinement exploitées lors de l'arrivée des premières collisions.

Cryogénie de proximité des calorimètres

Depuis le début du projet jusqu'à la fin de l'installation proprement dite en 2007, ATLAS a confié au Service des Études et Réalisations Mécaniques du

LPSC la responsabilité de la tâche dite « cryogénie de proximité ». Elle consistait notamment en :

- la conception, la fabrication, la livraison au CERN et l'intégration dans la caverne UX15 d'ATLAS de tous les équipements intégrant ce sous-système pour les 3 calorimètres à argon liquide d'ATLAS (2 calorimètres bouchons pour les extrémités du détecteurs et 1 calorimètre dit tonneau pour la partie centrale, l'ensemble représentant 83 m³ d'argon liquide à 87 K). Ces équipements comprennent des boîtes à vannes, des vases d'expansion, des raccords baïonnettes isolants, des lignes cryogéniques rigides et flexibles, des systèmes de guidage et des structures,
- l'installation des lignes cryogéniques flexibles de 350 m des deux calorimètres bouchons intégrés dans leur système de guidage respectif (1ère mondiale avec des lignes de diamètre 150 mm et de 35 m de long), et des lignes cryogéniques rigides de 200 m des calorimètres tonneau et bouchon.

Après l'installation des lignes à argon liquide et le montage des lignes flexibles d'azote pour les bouchons en 2006 et 2007, le SERM s'est de nouveau impliqué début 2008 dans :

- le réhaussage du niveau de la ligne d'argon liquide (de 300 mm de diamètre) pour un meilleur remplissage de la ligne, suite aux informations de l'inclinaison d'ATLAS dans la caverne,
- la réparation de la ligne flexible d'argon liquide suite aux dégâts causés par le rapprochement brusque du calorimètre bouchon C depuis sa position d'essai suite au déplacement sous-estimé des aimants supraconducteurs lors de leur mise en route.

Dans l'attente du redémarrage du LHC à l'automne 2009, l'installation et les tests sur la cryogénie de proximité du détecteur se sont terminés avec succès (voir Fig. 1), grâce à l'expérience et à l'implication sans faille de l'équipe mécanique, lors de nombreuses missions sur site, et grâce à la présence constante sur le chantier d'un coordinateur technique détaché par le service.

Le tonneau et les deux bouchons sont aujourd'hui remplis d'argon liquide et stables en température prêts pour la période d'exploitation d'ATLAS.

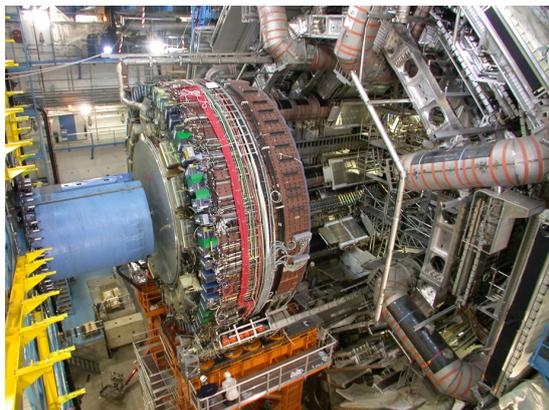


Fig. 1 : Déplacement du calorimètre bouchon A avec la ligne flexible d'argon liquide.

Mise en route du calorimètre à argon liquide

Avec une conception très novatrice, un nombre élevé de canaux (plus de 180 000) et une procédure d'étalonnage très complexe, la mise en route du calorimètre à argon liquide (LAr) requiert un travail important antérieurement aux premières collisions. Le groupe du LPSC est impliqué dans cette procédure depuis plusieurs années avec différents axes forts.

Mesure de la diaphonie et de la gigue électronique

Grâce à un système d'étalonnage qui injecte un signal très similaire à celui émis suite au passage de particules dans le sous-détecteur, il est possible d'étudier précisément la réponse du calorimètre.

Le groupe du LPSC a ainsi été responsable de la mesure de la diaphonie du calorimètre tonneau, quantité décrivant l'existence de signaux parasites dans les cellules voisines à la cellule où un signal a été observé. Cette étude a permis de montrer que la diaphonie mesurée était compatible avec les mesures partielles réalisées au cours de la production du calorimètre, et dont il a été prouvé la possibilité de maîtriser l'impact. Cette étude a par ailleurs permis de caractériser plus précisément des pathologies (canaux morts ou bruyants) et de révéler des problèmes impossibles à détecter par ailleurs (erreur de câblage), et qui ont pu être corrigés avant le début de la prise de données.

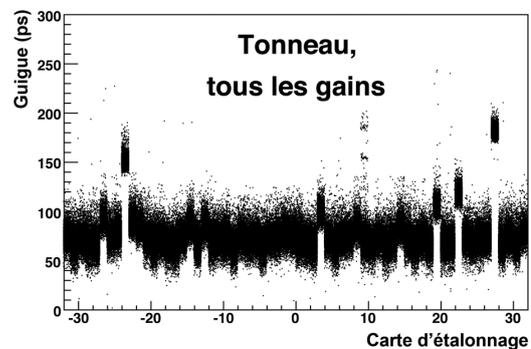


Fig. 2 : Gigue électronique mesurée dans le calorimètre électromagnétique tonneau en fonction de la carte d'étalonnage utilisée.

Outre cette étude, la prise de données d'étalonnage permet de mesurer la fluctuation temporelle de la chaîne électronique de lecture du calorimètre (voir Fig. 2), qui a été mesurée comme inférieure aux spécifications initiales (mieux que 160 ps); il a également été prouvé que cette fluctuation avait pour origine principale le système d'étalonnage et non le système de lecture du signal, ce qui la rend d'autant plus négligeable. L'ensemble de ces études a fait l'objet d'un travail de thèse.

Développement d'algorithmes de contrôle de données

Le groupe du LPSC a pour responsabilité le contrôle (en ligne et hors-ligne) de l'intégrité des données; une

corruption des données au long de la complexe chaîne d'acquisition est un risque majeur qui doit être contrôlé avant de procéder à toute analyse et interprétation des données enregistrées. Parallèlement à cela, un algorithme de détection de canaux problématiques ou de recherche de sources de bruit a également été développé.

Ces deux algorithmes sont utilisés quotidiennement dans les régulières prises de données cosmiques (basées sur le signal déposé par les rayons cosmiques), qui permettent de progresser dans la compréhension du détecteur et dans la façon de le faire fonctionner.

Ces deux aspects sont un point fort de l'activité du groupe depuis plusieurs années. Ils ont de plus connu le développement d'un axe supplémentaire avec la conception d'une interface informatique d'aide à la détection rapide et efficace des problèmes. Cette interface est maintenant utilisée au quotidien au-delà de la communauté LAr, ayant été adoptée par d'autres sous-détecteurs.

Définition de la politique de qualité des données

Avant de pouvoir analyser les données enregistrées par le calorimètre en termes de signal physique laissé par une particule, la collaboration LAr a la responsabilité d'étiqueter les données comme étant de qualité satisfaisante. Cela passe, comme déjà évoqué, par une certification que les données n'ont pas été corrompues, qu'aucune source de bruit n'en a dégradé leur qualité et que les différentes parties sont bien synchronisées en temps.

Cet étiquetage se base sur le résultat de plusieurs algorithmes de contrôle des données, dont les résultats doivent être combinés pour extraire une information binaire (données de bonne qualité ou non). En raison de la quantité de canaux de mesures, des données disponibles, de leurs complexités et des fortes contraintes de temps, un système de décision automatique a dû être mis en place.

Le groupe du LPSC est responsable de la définition de cette politique de décision, dont l'implémentation concrète a également été testée lors des prises de données cosmiques.

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 découvrir 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

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'information («metadata») décrivant chaque dataset et chaque fichier produit. Une interface WEB très puissante permet la recherche des datasets selon les metadata. D'autres paramètres sont fournis : par exemple le nombre total des événements est recalculé chaque fois qu'un changement est constaté dans le dataset.

Les sources de données sont :

- ATLAS Tier 0 – le système qui gère la formation des datasets 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. La collaboration a décidé en 2007 d'introduire un contrôle plus strict de nombre de champs permis et de leurs valeurs possibles.

Enfin, AMI permet aux utilisateurs de naviguer vers d'autres bases de données d'ATLAS tel le catalogue des configurations de la géométrie du détecteur, ou les détails des sous-périodes de prise de données. Nous espérons étendre cette fonctionnalité dans l'avenir, allant jusqu'à la possibilité de faire des requêtes croisées sur des bases différentes.

L'équipe a participé à tous les tutoriaux du logiciel d'ATLAS organisés par la collaboration. L'année 2008-2009 a vu un doublement du nombre d'utilisateurs de cette application. Plusieurs demandes d'extension des fonctions d'AMI nous sont parvenues de différentes communautés de physiciens.

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.

Le travail fourni pour Tag Collector est comptabilisé dans la contribution de l'IN2P3 au budget d'ATLAS.

Déploiement et Qualité de Service

Au début de l'année 2008 AMI et Tag Collector ont été déménagés de nos serveurs du LPSC vers des serveurs dédiés au CCIN2P3 de Lyon. Afin d'améliorer la qualité de service de nos applications, nous avons travaillé à la mise en place d'une réplique des bases de données Oracle vers le CERN 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.

L'utilisation de la copie au CERN implique l'installation du logiciel de l'application sur un serveur au CERN et entraîne des contraintes. Nous avons profité de l'occasion pour faire migrer notre code de CVS vers SVN et réorganiser sa structure afin de la rendre plus modulaire. Désormais notre application est déployée en format RPM au CERN et sur nos serveurs de test au LPSC sous contrôle de QUATTOR.

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

Calcul LHC

L'implication du laboratoire dans la partie calcul LHC qui concerne le traitement des données acquises par le détecteur ATLAS se fait par l'intermédiaire d'une personne qui dirige le projet LCG-France et qui fédère les projets de grilles de calcul pour le LHC et par la mise en place d'un nœud de grille au LPSC.

LCG

Le projet W-LCG est une collaboration internationale impliquant tous les partenaires, pays et laboratoires, des 4 expériences LHC du CERN (ATLAS, ALICE, CMS et LHCb). Le but de W-LCG (<http://lcg.web.cern.ch/lcg/>) est de satisfaire les besoins en calcul jamais atteints jusqu'à maintenant en déployant internationalement un service de grille de calcul. Celle-ci intègre les capacités en calcul scientifique de différents centres à travers l'Europe, l'Asie et le continent Américain. Lorsque l'accélérateur LHC commencera à opérer, près de 7000 personnes de laboratoires et d'universités du monde entier vont participer à l'exploitation des données. Pour pouvoir participer à cette aventure dans de bonnes conditions, les requêtes en calcul des différentes expériences sont énormes: près de 14 péta-octets de données générées chaque année, l'équivalent de plus de 20 millions de CD actuels. Pour l'analyse, les besoins seront de l'ordre de 70 000 processeurs (équivalents processeurs de PC les plus rapides sur le marché actuellement). Environ 20% des ressources nécessaires à LCG seront situées au CERN, le reste sera distribué sur les centres dits Tier 1, Tier 2 et Tier 3 répartis dans le monde.

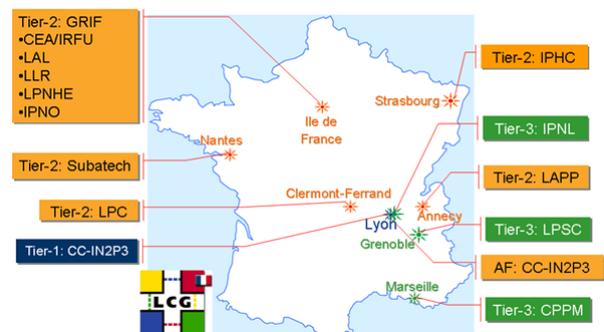


Fig. 3 : Infrastructure LCG-France en 2009.

LCG-France (<http://lcg.in2p3.fr/>) est le partenaire français de W-LCG et a pour but premier de mettre en place le Tier 1 au CC-IN2P3 (Lyon) et de fédérer les Tier 2 et Tier 3 de France pour que les données soient distribuées efficacement et pour que la collaboration française des expériences LHC soit la plus efficace possible en termes d'impact scientifique. Ce projet fait collaborer tous les laboratoires de l'IN2P3 et du CEA impliqués dans les expériences LHC. La figure 3 illustre l'infrastructure LCG-France en 2009. Le statut et le périmètre d'action du projet sont décrits dans un document fondateur. Deux membres chercheurs du LPSC participent au projet respectivement en tant que responsable scientifique du pro-

jet et responsable du Tier 3 LPSC, ainsi que 3 ingénieurs informaticiens.

Le budget de LCG-France est de 20 millions d'euros pour 4 ans pour la partie Tier 1. Ce budget a été augmenté d'1 million d'euros à partir de 2009 pour soutenir l'effort des centres Tier 2 et Tier 3 de France à un niveau acceptable de performance. Grâce à ce budget, la France devrait pouvoir assurer le calcul des 4 expériences LHC, au Tier 1, Tier 2 et Tier 3 à hauteur de 10% des ressources mondiales. Au total 60 personnes (chercheurs, ingénieurs et techniciens) sont impliquées directement dans le projet sur tous les sites LCG-France.

Mise en place d'un centre Tier 3 au LPSC et utilisation pour ATLAS

Début 2008, dans le but de répondre aux besoins en calcul des équipes ALICE et ATLAS du LPSC, un nœud de grille de calcul de type Tier 3 a été mis en place au laboratoire. Cet équipement est décrit en détail dans la partie plateformes de ce document. L'équipe ATLAS du LPSC s'est fortement impliquée dans sa mise en place et son utilisation localement ainsi que dans le contexte plus large de la production et l'analyse de données centralisées pour ATLAS.

Ainsi le Tier 3 du LPSC est intégré au sein du nuage français qui regroupe entre autres l'ensemble des nœuds de grille des laboratoires français qui participent à ATLAS. Il est rattaché au Tier 1 français, le nœud central du nuage, qui se trouve au centre de calcul de l'IN2P3 à Villeurbanne (CC-IN2P3). Le Tier 3 du LPSC participe ainsi principalement à la production centralisée de simulation Monte Carlo de l'expérience ATLAS et à la production d'échantillons de données adaptées à l'analyse du groupe de physique du top de l'expérience. Le nœud est aussi ouvert aux physiciens, français ou non, de la collaboration ATLAS pour leurs analyses personnelles. De plus en ce qui concerne le stockage des données, le LPSC reçoit 5% des données qui doivent être stockées par l'ensemble des Tier 2 du nuage.

Le Tier 3 a en outre participé à l'ensemble des campagnes de tests initiés soit par le nuage, soit par la collaboration ATLAS, voire l'ensemble des expériences LHC afin d'évaluer le degré de préparation du système de grille de calcul pour l'arrivée des données de collision du LHC. L'ensemble de ces résultats est très satisfaisant. Enfin une personne du groupe participe au support centralisé pour la production de données au niveau du nuage français.

Au regard de la taille modeste du nœud de calcul, la contribution à l'expérience ATLAS est déjà notable. En effet, le site est passé de 22 cœurs et 6 To lors de sa mise en production début 2008 à 132 cœurs et 80 To utiles actuellement (100 cœurs maximum et un peu moins de 50 To sont alloués à ATLAS). Pendant cette période environ 25 To de données ont été transférés et un million de travaux représentant environ 100 000 h normalisées en ksi2k d'utilisation de CPU ont été tournés sur le site.

Le site est toujours en phase d'expansion importante, fin 2009 il devrait atteindre 260 To d'espace disque disponible et 600 cœurs. La part attribuée à ATLAS est d'environ 55% de ces moyens. La contribution du Tier 3 LPSC au calcul pour l'expérience d'ATLAS devrait donc augmenter en conséquence.

Pour en savoir plus

- LCG : <https://edms.in2p3.fr/document/I-003682/1>
- Plateforme nœud de grille Tier 3 du LPSC: ce document
- <http://lpsc.in2p3.fr/atlas-ile/calculLHC.htm>
- <http://lpsc.in2p3.fr/ATLAS/Tier 3.htm>

Analyses de physique

Le groupe du LPSC s'est investi dans la préparation aux analyses de physique dans les trois thématiques suivantes : la physique du quark top, la recherche du boson de Higgs et la recherche de nouveaux bosons de jauge.

Physique du quark top et recherche de boson de Higgs chargé

Étude du quark top et recherche de physique au-delà du Modèle Standard

L'extension la plus répandue du MS repose sur une nouvelle symétrie, la supersymétrie. Intégrant le secteur électrofaible dans sa description standard, elle en offre un cadre étendu qui permet de rendre compte de la génération des masses des particules par le processus de Higgs. Dans ce contexte, sont prédits le doublement du nombre de particules et l'existence d'au moins cinq nouveaux bosons, les bosons de Higgs. Parmi ceux-ci trois sont neutres et deux sont chargés. Le LHC devrait permettre d'apporter une réponse décisive quant à l'existence de ces nouveaux bosons recherchés depuis 20 ans sans succès : soit par le biais de recherches directes de ces particules, à partir de leurs produits de désintégration, soit par des recherches indirectes reposant sur la mesure précise de quantités bien connues qui dépendent de leurs caractéristiques. Le groupe du LPSC est impliqué dans ce deuxième type de mesure dans le cadre de la physique du quark top. Les événements contenant un quark top étant abondamment produits au LHC, une mesure précise de leurs sections efficaces devrait constituer un des canaux privilégiés de découverte d'un boson de Higgs chargé.

Depuis la découverte du quark top à Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF une campagne de mesure s'est ouverte afin de déterminer ses propriétés : sa masse, sa largeur, son spin, sa charge électrique, ou encore son couplage aux fermions et bosons du modèle font l'objet de nombreuses recherches auprès du TeVatron. Cependant, en raison de sa masse élevée, la production d'événements comprenant un ou plusieurs quark(s) top est de faible probabilité, limitant la précision de la plupart de ces mesures. Avec plus de 8 millions de paires de quarks top et plus de 2 millions de quarks top en singlet produits au cours d'une année

à basse luminosité, le LHC ouvre une nouvelle ère de mesures de précision. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC depuis 2004.

Mesures de sections efficaces de production de quarks top en singlet

La mesure de la section efficace de la production de quark top en singlet constitue un test crucial du modèle des interactions électrofaibles : dépendant directement 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. Dans le Modèle Standard, il existe 3 mécanismes de production du top en singlet : la voie t , la voie s et la production associée Wt . Le nombre d'événements attendus dans les canaux décelables, avec une désintégration en muon ou électron du W , est typiquement de 500 000 dans la voie t , 180 000 dans la voie $W+t$ et 20 000 dans la voie s pour une année à basse luminosité soit 10 fb^{-1} . 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. Ainsi, dans le cadre supersymétrique de modèles à deux doublets de Higgs (2HDM) auxquels le groupe du LPSC s'est intéressé, le boson chargé H^\pm ajoute une nouvelle source de production de quark top.

Les trois mécanismes de production du quark top en singlet, d'états finaux très différents, ont été étudiés à l'aide d'analyses spécifiques développées au LPSC. Ces études ont abouti à la détermination de la sensibilité statistique attendue pour une luminosité de 30 fb^{-1} . Celle-ci est de l'ordre de 1,5% pour la voie t , 4% pour la voie $W+t$ et environ 10% pour la voie s . Cette performance se traduit par une détermination de $|V_{tb}|$ au niveau de quelques pourcents. 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. L'ensemble représente une incertitude de 8 à 10%. L'estimation des fonds est particulièrement complexe et repose sur l'usage de simulations dont les prédictions théoriques ne sont pas aujourd'hui fermement établies, induisant une incertitude de 5% à 10% selon les processus en jeu.

Ces mesures devraient permettre, à moyen terme, d'être sensible à l'existence de bosons de Higgs chargé de masse voisine et plus élevée que le quark top, dont la présence modifierait la section efficace d'interaction. La figure 4 montre les nombres d'événements attendus dans les trois voies de désintégration pour une luminosité de 1 fb^{-1} .

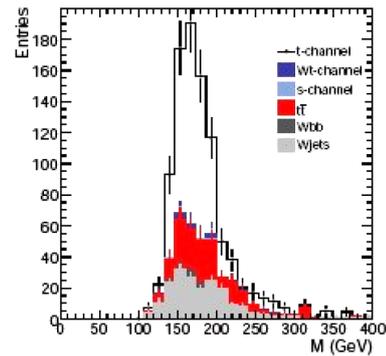


Fig. 4 : Nombre d'événements attendus pour les trois voies de production : la voie t , la voie s et la production associée Wt .

Pour toutes ces études, l'utilisation de techniques statistiques complexes de classification des événements de signal par rapport aux événements de bruits est nécessaire afin de maximiser le rapport signal sur bruit et par la suite de réduire les incertitudes systématiques. Le groupe s'est investi dans le développement d'un logiciel permettant l'optimisation de l'utilisation des caractéristiques des événements en vue de leur discrimination et permet la combinaison des mesures des différents canaux.

Mesure de sections efficaces de quarks top en paires

La production de paires de quarks top est statistiquement plus importante que la production de quarks seuls, rendant la mesure de ce canal attractif pour les premières mesures. Le groupe s'investit dans la définition d'une sélection optimisée de ces événements par des techniques multi-variées. La précision attendue est grande, en raison de la bonne statistique et du rapport signal sur bruit favorable. Une sensibilité à un boson de Higgs chargé de masse plus légère que le quark top peut être atteinte sur une large gamme de l'espace des phases des modèles supersymétriques. Cette sensibilité nous permet de rechercher le boson de Higgs chargé sur une gamme complémentaire de la précédente.

Mesure de la polarisation des bosons W issus des décroissances de quarks top

Un quark top se désintègre quasi-exclusivement en un boson W^+ et un quark b ultra-relativiste qui se retrouve ainsi dans un état propre d'hélicité négative. Si l'on prend en compte la masse non nulle du quark b et quelques corrections d'ordres supérieurs, on peut montrer que le W^+ est créé à 69,4% dans un état d'hélicité négative, à 30,4% dans un état de polarisation longitudinale et à 0,15% dans un état d'hélicité positive. Ces prédictions ont déjà été vérifiées par les collaborations $DØ$ et CDF au Tevatron, mais avec des précisions relatives assez modestes allant de 30 à 50%. Du fait de son taux de production de quarks top beaucoup plus important, le LHC et en particulier l'expérience ATLAS pourraient nettement améliorer ces mesures. Des contraintes expérimentales supplémentaires pourraient ainsi être apportées sur le vertex Wtb .

Ces travaux ont été développés dans le cadre d'un doctorat soutenu en 2009. La distribution angulaire des leptons (e et μ) émis dans les désintégrations des W a été utilisée pour extraire les probabilités d'états de spin des W , à l'aide d'une analyse statistique mettant en oeuvre la méthode des gabarits. C'était la première fois que cette méthode était employée pour cette étude particulière au sein de la collaboration ATLAS. Dans l'état actuel de cette analyse, nous avons montré que les précisions de mesure des probabilités d'états de spin seraient facilement améliorées d'un facteur deux à trois par rapport aux valeurs mesurées au Tevatron avec 1 fb^{-1} de données à 14 TeV. Une réduction plus importante du bruit de fond et une étude plus précise des gabarits simulés permettront certainement d'aller encore plus loin.

Préparation aux premières collisions

Le groupe du LPSC s'est investi dans les études préparatoires aux premières prises de données à 10 et 14 TeV, en vue des premières collisions du LHC, avec la mise au point d'analyses spécifiques en vue de périodes avec une luminosité intégrée limitée, entre 200 pb^{-1} et 1 fb^{-1} . Les résultats obtenus par le groupe dans les trois canaux sont devenus des résultats officiels de la collaboration ATLAS. La préparation aux premières collisions concerne également la mise en place d'un modèle d'analyse au niveau du groupe « physique du top » de la collaboration ATLAS. Ce modèle est basé sur la formation centralisée d'échantillons d'événements de contrôle permettant la validation des simulations à partir des données, et ce pour l'ensemble des personnes travaillant dans le domaine de la production simple de quarks tops.

Dans tous les cas, un programme cohérent allant de la re-découverte du quark top aux premières mesures de sections efficaces, puis à la détermination précise conjointe des différents processus de production de quarks top, a été défini et mis en place. La maîtrise des outils et la compréhension de la production des quarks top pourraient bien constituer alors un des premiers lieux de mise en évidence de nouvelle physique.

Production associée du Higgs et sa désintégration en deux photons

Les mesures de précision entreprises au LEP ont contraint la masse du boson de Higgs du Modèle Standard (MS) à une limite inférieure de 114,4 GeV. Ces contraintes ont été obtenues par des mesures directes. Si la masse du Higgs est proche de cette limite basse, il devient intéressant d'utiliser le canal de désintégration $H \rightarrow \gamma\gamma$ pour pouvoir découvrir le Higgs au LHC, même si celui-ci a un rapport d'embranchement très faible. Les potentialités de découverte du boson de Higgs du MS peuvent s'étudier dans la gamme en masse 110-140 GeV. Dans cet intervalle, le processus dominant de production du Higgs au LHC se fait via la fusion de gluons par une boucle impliquant un quark top ($g \rightarrow H$). La re-

cherche de la production d'un Higgs en association avec un boson W ou Z , ou une paire top-antitop peut permettre d'apporter un complément de signal et pourra éventuellement permettre la détermination, avec plus de précision, des constantes de couplage aux bosons de jauge du MS et du couplage de Yukawa au quark top.

Nous avons étudié ces processus en simulation complète avec une analyse statistique pour une luminosité intégrée de 100 fb^{-1} . Ce travail est publié sous forme de note ATLAS avec comité de lecture et a fait l'objet d'une thèse. Ainsi, nous avons analysé les événements avec trois sortes de topologies: diphoton, énergie transverse manquante et un lepton isolé impliquant la sélection des événements $WH \rightarrow e \nu \gamma$, diphoton et énergie transverse manquante impliquant la sélection des événements $ZH \rightarrow \nu \nu \gamma$ et enfin hadronique, impliquant la sélection d'événements diphoton et la désintégration hadronique du boson de jauge.

Pour une luminosité de 30 fb^{-1} , la signifiante totale obtenue pour les 3 processus étudiés à une masse du Higgs de 120 GeV est de 2,8. Elle fait passer la signifiante du $H \rightarrow \gamma\gamma$ inclusive de 5,1 (processus gluon gluon + VBF) à 5,8 avec la production associée W et Z (notre étude). La figure 5 (à gauche) ci-dessous montre la signifiante obtenue en fonction de la masse du boson de Higgs. Une comparaison avec les résultats de CMS a été réalisée où l'on montre que, malgré les différences dans les méthodes d'analyse et les lots d'événements étudiés (bruits de fonds différents), les résultats sont semblables, voir la figure 5 (à droite).

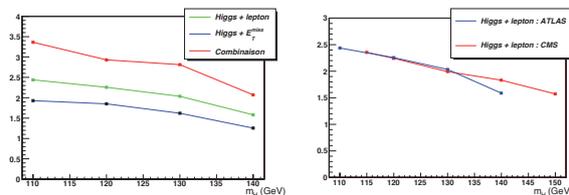


Fig.5 : (à gauche) Signifiante à 30 fb^{-1} en fonction de la masse du boson de Higgs. (à droite) ATLAS comparé à CMS à 30 fb^{-1} en fonction de la masse du boson de Higgs.

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, que l'on appelle modèles avec des 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 des bosons neutres du MS dans les seconds.

Nous avons choisi le canal $Z' \rightarrow e^+e^-$ qui sera le mieux mesuré avec ATLAS. Nos études les plus récentes sont centrées sur l'évaluation du potentiel de découverte des bosons Z' et sur les méthodes statistiques nécessaires à l'évaluation de limites en cas de non-observation. Une méthode statistique extrêmement rapide, basée sur des transformations de Fourier rapides, a ainsi été mise au point, qui permet d'éviter le tirage de millions de pseudo-expériences dans le calcul des rapports de vraisemblance. Cela permet d'effectuer le calcul pour différents modèles dans un temps raisonnable. Les résultats obtenus (Fig. 6), dans l'hypothèse d'une énergie dans le centre de masse de 14 TeV, constituent la majeure partie d'une thèse qui s'est déroulée de 2006 à 2008. Ils font également partie de la principale publication ATLAS faisant le point sur les analyses de physique juste avant le démarrage du LHC. Ils montrent que pour les modèles de grande unification usuels, un Z' pourra être découvert avec quelques dizaines de picobarns inverses, s'il a une masse de l'ordre de 1 TeV. Cette valeur de la masse correspond à la limite supérieure exclue par les expériences de l'accélérateur précédent (le Tevatron). Au-delà, quelques femtobarns inverses seront suffisants pour aller jusqu'à 3 TeV.

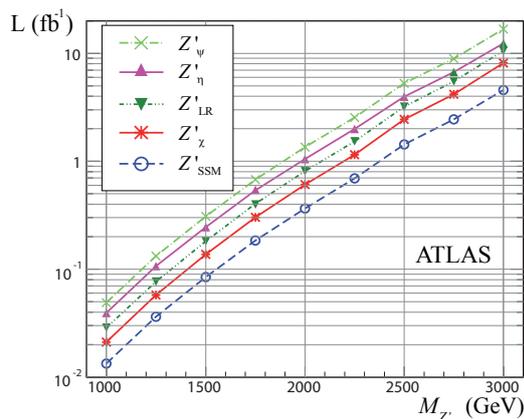


Fig.6: Potentiel de découverte d'un Z' dans les modèles de grande unification.

Pour en savoir plus

- The ATLAS collaboration, CERN-OPEN-2008-020
- Expected Performance of the ATLAS Experiment: Detector, Trigger and Physics, The ATLAS Collaboration, CERN-OPEN-2008-020, <http://arxiv.org/abs/0901.0512>
- Préparation de l'expérience ATLAS: étalonnage électronique du calorimètre électromagnétique, mesure de la polarisation des bosons W dans la décroissance des quarks top. Thèse de J. Labbé, Université Joseph Fourier, Grenoble (1^{er} juillet 2009)
- Étude de la production associée ZH/WH, $H \rightarrow \text{gamma gamma}$ avec le détecteur ATLAS. Thèse de B. Brelier, Université Joseph Fourier, Grenoble (9 décembre 2008)
- Recherche d'une nouvelle résonance Z' dans le canal diélectron avec le détecteur ATLAS. Thèse de J. Morel, Université Joseph Fourier, Grenoble (7 novembre 2008)

Le projet ILC

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

J. Bouvier, D. Dzahini, L. Gallin-Martel, E. Lagorio, F.-E. Rarbi, O. Rossetto, C. Vescovi, M. Yamouni, Scé Électronique A. Bêteille, Y. Carcagno, D. Fombaron, J. Giraud, D. Grondin, M. Jullien, J.-C. Malacour, G. Michel, E. Perbet, S. Roni, 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 bit DAC) and readout (low power 12 bit ADC) parts of the integrated electronics circuit). In addition, we have contributed to the design of the readout electronics (4 or 5 bit ADC) of the micro-vertex detector.

Le Projet ILC est un projet développé au sein du Groupe ATLAS-ILC dont le but est de participer à la conception d'un des détecteurs du futur accélérateur linéaire électron-positron devant se substituer au LHC. Ce nouvel accélérateur permettra des mesures de précision de la physique à l'échelle du TeV. Il s'agit donc avant tout, du futur de la physique des particules. Ce projet est principalement orienté sur des activités de recherche et de développement en continuité avec l'historique et le savoir faire du groupe (calorimétrie EM, électronique et mécanique). Notre contribution porte sur le concept de détecteur ILD «International Large Detector» (fusion des projets à dominante européenne LDC et asiatique GLD). Nous sommes membre de la collaboration internationale CALICE «CALorimeter for the LInear Collider Experiment» qui regroupe 53 Instituts de 17 pays différents.

Tests en faisceau, analyse des données et simulations

Depuis juillet 2006 nous avons participé à toutes les campagnes de tests en faisceau qui ont eu lieu soit au CERN soit à Fermilab (USA, voir Fig. 1) mettant en jeu les différents prototypes de calorimètres EM silicium-tungstène (Si-W) du projet ILC. Nous avons aussi pris une part très active à l'analyse des données en particulier concernant la calorimétrie EM: technique d'identification des électrons à partir de la forme des gerbes, technique d'alignement des différentes couches actives des cellules de détection, techniques de corrections des effets dus aux anneaux de garde des matrices de diodes, étude de la résolution en énergie sans ou avec rotation du prototype de calorimètre EM, linéarité, étude de la résolution spatiale et angulaire et enfin comparaisons des résultats expérimentaux avec les prédictions obtenues à partir de simulations Monte Carlo. Ces travaux ont contribué à l'écriture de 2 articles.

Nous avons aussi travaillé en étroite collaboration avec l'université Hassan II de Casablanca (Maroc) sur la détection d'électrons dans le calorimètre EM Si-W afin

de comparer la méthode analogique (mesure classique du dépôt d'énergie) à celle dite numérique (nombre de cellules touchées dans chaque couche). Bien que la réponse concernant la technique numérique ne soit pas linéaire, il est cependant possible de remonter à l'énergie de la particule incidente avec un paramétrage adéquat. De plus, il est intéressant, à partir des données expérimentales, de constater qu'au-dessous de 2 GeV la technique numérique l'emporte (meilleure résolution) sur la technique analogique. Enfin, en pondérant correctement les deux techniques (qui ne sont pas totalement corrélées) il est évidemment possible d'obtenir une amélioration de la résolution en énergie.



Fig. 1: Dispositif testé à Fermilab (USA), au centre: le prototype de calorimètre EM (~ 10000 voies) suivi par le prototype de calorimètre hadronique analogique.

Travaux de R&D

Micro-électronique

Le LPSC participe à la conception de l'électronique de lecture, de codage et d'étalonnage. Les circuits de lecture et de codage équiperont :

- Le sous-détecteur micro-vertex ou détecteur à «pixels» développé par l'IPHC de Strasbourg. Chaque canal d'électronique comporte un échantillonneur-bloqueur et un ADC «pipe line» d'une dynamique de 4 ou 5 bits. La taille du circuit est extrêmement réduite: de l'ordre de 1 mm x 20 µm. Le faible

niveau des signaux (~ 1 mV), la faible consommation (~ 1 mW) et la rapidité (> 10 MHz) constituent des contraintes drastiques. Les cellules de détection (« pixels ») et l'électronique de lecture et de codage seront intégrées ensemble sous forme de SOC (« System On Chip »). Des prototypes ont déjà été développés et les résultats ont fait l'objet de 2 articles. Une nouvelle version utilisant le mode « courant » est à l'étude.

- Le calorimètre EM Si-W. Nous travaillons sur un convertisseur analogique numérique de 12 bits à 25 MHz. 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 μ s) pour rendre la dissipation proportionnelle au rapport cyclique du faisceau (~ 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. Plusieurs prototypes ont été développés et testés. La consommation: ~ 140 nW par canal est finalement bien meilleure que l'estimation dédiée initialement (2,5 μ W/voie). Néanmoins, la précision de la technologie CMOS 0,35 μ m étant limitée à 10 bits, cela impose une non-linéarité de ± 4 LSB qui se retrouve dans notre convertisseur. Une étude novatrice est en cours dans le domaine de la correction numérique des erreurs. Cette correction comporte 2 étapes: une augmentation du nombre de bits dans le premier étage du convertisseur avec une répartition aléatoire des capacités pour moyennner les distorsions (voir Fig. 2) et un algorithme de correction numérique des erreurs. Cette étude touche aux limites du savoir faire actuel en matière de convertisseur analogique numérique.

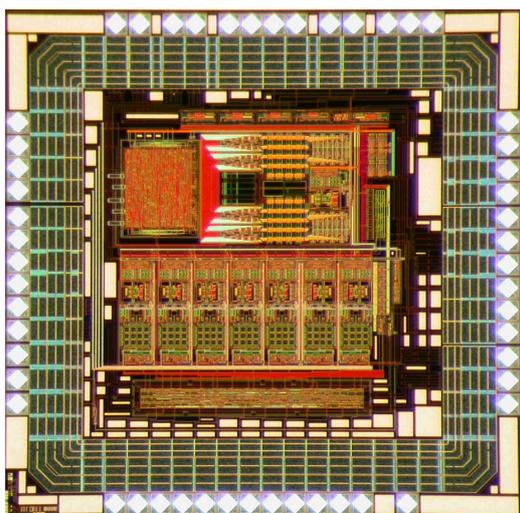


Fig. 2: Photo du circuit ADC « pipe line » 12 bits avec un premier étage multi-bits plus une structure DEM.

Nous travaillons aussi sur la conception d'un convertisseur numérique analogique pour l'étalonnage du calorimètre EM. Un premier prototype de convertisseur numérique analogique DAC de type $\Sigma\Delta$ 16 bits a été

réalisé et testé. Les résultats sont bons (INL $< \pm 4$ LSB) mais cette architecture impose la conception d'un filtre à grande constante de temps dont l'intégration est non triviale. Une autre architecture dite « matrice segmentée de capacités commutées » a été utilisée pour des DAC de 12 et ensuite 14 bits (voir Fig. 3). Les résultats sont excellents avec une non-linéarité de $\pm 0,4$ LSB. Une version de 16 bits de cette architecture est en cours d'étude.

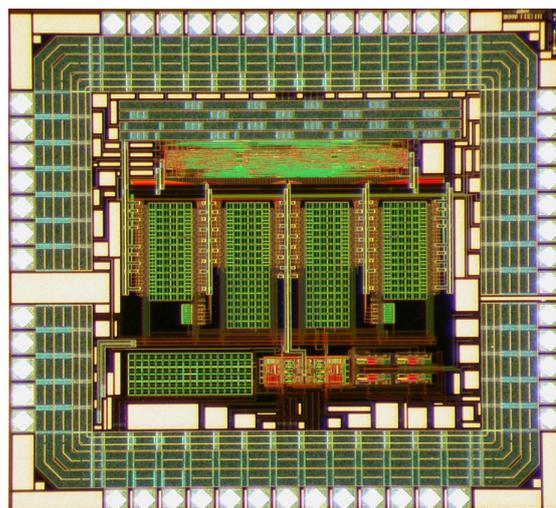


Fig. 3: Photo du circuit intégré d'étalonnage 14 bits.

Les laboratoires du CNESTEN (Rabat, Maroc) et IXL de Bordeaux contribuent ponctuellement à certaines phases de ces études.

Mécanique

Les travaux mentionnés ci-après ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires LLR de Palaiseau, LAL d'Orsay et l'Université de Manchester.

1. Architecture générale des bouchons EM: dessins avancés

La masse du tungstène dans chaque bouchon EM est d'environ 16 tonnes. Des travaux de simulation 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. 4). 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. Une nouvelle architecture qui permettrait d'éviter certaines zones mortes (« cracks ») est à l'étude. Cette nouvelle structure requiert des modules d'environ 2,50 m de long et donc nécessite la construction de prototypes afin de vérifier la faisabilité de la solution. La fabrication d'une première cellule composite longue est prévue pour fin 2009; pour des raisons de coût la réalisation de couches d'alvéoles prototypes sera entreprise à partir de 2010.

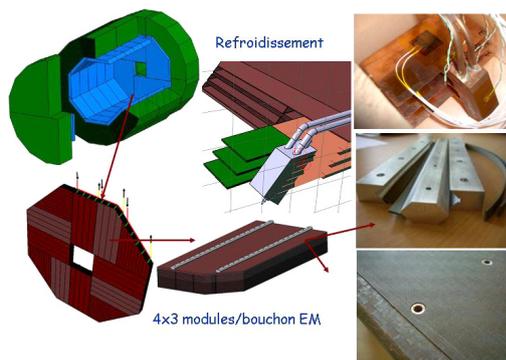


Fig. 4: Mécanique dédiée au calorimètre EM Si-W.

2. 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) constitue aussi un défi que nous tentons de relever. 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.

3. Définition du système de refroidissement

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. Deux systèmes sont réalisés et en test : circulation fluide sous-atmosphérique et système à caloduc. L'étude de l'installation globale est en cours (circuits, sécurité, contrôle commande).

4. Le « Demonstrator »

Un premier prototype appelé « demonstrator » (1,30 m de long, 3 couches alvéolaires) a été réalisé par la collaboration. Le Service Études et Réalisations Mécaniques (SERM) du LPSC a pris activement part à sa construction. Par exemple les « couvercles » interne et externe ainsi que le système d'accrochage ont été conçus et réalisés à Grenoble. Il a permis notamment de vérifier le fonctionnement du prototype de refroidissement conçu à Grenoble et surtout de valider les simulations qui serviront ensuite à concevoir le système global pour l'ensemble du calorimètre.

5. 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 réalisation. Comme pour le « demonstrator », le SERM prend 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 vers 2010-2011. Évidemment nous comptons participer activement aux campagnes de mesures.

Conclusion

Un gros effort a déjà été fait :

- Les analyses des nombreux tests en faisceau ont permis de mesurer les performances du premier prototype de calorimètre EM Si-W.
- Des prototypes de circuits intégrés de lecture et de codage ainsi que d'étalonnage ont été réalisés et les tests nous permettent d'envisager le futur avec optimisme.
- Les premières études mécaniques (système de positionnement, définition du système de refroidissement, architecture générale des bouchons EM) ont entraîné la réalisation de prototypes novateurs afin de vérifier leur fiabilité.

La finalisation du projet est évidemment loin d'être terminée.

Neutrons ultra-froids (UCN)

F. Naraghi, G. Pignol, K. Protasov, G. Quéméner, D. Rebreyend, S. Rocchia
 R. Faure, M. Marton, M. Migliore, P. Stassi, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation
 O. Bourrion, R. Foglio, E. Lagorio, S. Muggeo, J.-P. Scordilis, C. Vescovi, Service Électronique
 Y. Carcagno, D. Fombaron, C. Geraci, D. Grondin, J.-C. Malacour, E. Perbet, S. Roni, S. Roudier, F. Vèzzu, Service Études et Réalisations Mécaniques
 G. Dargaud, Service Informatique

The UCN group, formed in 2004, aims at studying fundamental interactions and symmetries using Ultra Cold Neutrons (UCN). Our group is currently involved in two activities: the measurement of the neutron electric dipole moment (nEDM) and the study of the quantum levels of neutrons trapped in the earth gravitational field (GRANIT). Major steps were achieved over the last two years, for both projects: the end of R&D activities at the ILL and the move of the RAL-Sussex spectrometer to the Paul Sherrer Institut for the nEDM project; the completion of the set-up installation at the level C of the ILL for the GRANIT project.

Le groupe UCN travaille depuis 2004 sur l'étude des interactions et symétries fondamentales à l'aide de neutrons de très basse énergie (UCN = Ultra Cold Neutron). Les deux projets auxquels notre groupe contribue, la mesure du moment électrique dipolaire du neutron (projet nEDM¹) et l'étude des niveaux quantiques de neutrons piégés dans le champ de pesanteur (projet GRANIT²), ont franchi récemment des étapes importantes : la fin de la phase de test auprès du réacteur de l'institut Laue Langevin (ILL, Grenoble) et le déménagement du spectromètre RAL-Sussex-ILL vers l'Institut Paul Sherrer (PSI, Suisse) pour le projet nEDM ; l'achèvement de l'installation du dispositif expérimental au niveau C de l'ILL pour le projet GRANIT.

Le projet GRANIT

Le projet GRANIT fait suite à une série d'expériences pionnières réalisées à l'ILL qui ont permis la première observation des états quantiques du neutron confiné par le champ gravitationnel. Son objectif est de réaliser la première mesure directe de l'énergie de transition entre ces états quantiques. Ce projet, soutenu par une collaboration regroupant l'ILL, le LMA³ et le LPSC ainsi que plusieurs laboratoires russes et allemands, a été financé en partie par une subvention ANR obtenue en 2005.

Les deux dernières années ont permis de finaliser la conception et de fixer les caractéristiques du spectromètre de seconde génération GRANIT. Les principales études se sont concentrées sur l'estimation des paramètres du piège spéculaire qui constitue le « cœur » du spectromètre ainsi que sur le choix de la méthode pour induire les transitions (gradient de champ magnétique). Une étude prospective sur le programme de physique accessible a également été menée.

Le montage du dispositif expérimental au niveau C de l'ILL a débuté fin 2008 avec l'installation de la salle

blanche (Fig. 1). Un guide neutron spécifique équipé d'un monochromateur à cristaux intercalés a été mis en place pendant le long arrêt d'hiver et testé au printemps 2008. Il permet d'extraire les neutrons froids à 8,9 Å qui sont ensuite transformés en UCN par modulation dans une source d'hélium superfluide. Après une longue période de montage et de tests en laboratoire, l'ensemble cryogénique qui permet de maintenir l'hélium à une température de 0,5 K est désormais installé in situ. L'optimisation de ses performances ainsi que sa connexion au spectromètre sont prévues pour l'automne 2009.



Fig. 1 : La salle blanche de l'expérience GRANIT au niveau C de l'ILL.

Le spectromètre GRANIT lui-même se trouve dans la phase finale d'assemblage avec l'installation des miroirs sur la table optique. De nombreux tests sont en cours pour évaluer le niveau de vibrations et déterminer les procédures de réglage de l'horizontalité, les premières mesures de physique étant prévues pour la fin de l'année 2009.

Réalisations techniques

Depuis fin 2006, le LPSC est fortement impliqué dans la conception, la réalisation et l'intégration du spectromètre GRANIT à l'ILL. Le SERM est particulièrement mis à contribution. Outre la coordination technique du projet, il a conçu et assuré le suivi de fabrication de nombreux éléments du spectromètre :

1 neutron Electric Dipole Moment

2 GRAvitational Neutron Induced Transitions

3 Laboratoire des Matériaux Avancés, Lyon (France)

la chambre à vide, les miroirs de transport et le miroir « piège » ainsi que les systèmes mécaniques permettant leur positionnement, le système de support des bobines de correction magnétique... Le service Détecteurs et Instrumentation supervise depuis le printemps 2009 le contrôle-commande. Il a en particulier réalisé en collaboration avec l'institut nucléaire de Dubna l'écriture des programmes permettant le pilotage des inclinomètres et des accéléromètres. Enfin, le service Électronique a contribué à la définition, à la fourniture et au câblage de la connectique nécessaire aux différents appareillages de mesures et de contrôles.

Pour en savoir plus

- Constraint on the coupling of axionlike particles to matter via an ultracold neutron gravitational experiment. S. Baeßler *et al.*, Phys. Rev. D75 (2007) 075006.
- A method to measure the resonance transitions between the gravitationally bound quantum states of neutrons in the GRANIT spectrometer. H. Borner *et al.*, à paraître dans NIMA.

L'expérience nEDM

Depuis 2005, notre collaboration travaille à l'ILL sur le spectromètre RAL-Sussex, détenteur de la meilleure limite sur le moment électrique dipolaire du neutron. Notre objectif est d'améliorer certaines de ses performances afin de réaliser une mesure auprès de la nouvelle source d'UCN en construction à l'Institut Paul Scherrer (Suisse), dont le démarrage est prévu au cours de l'année 2010.

Après les années de reprise en main et d'apprentissage, l'année 2008 a permis de restaurer les performances presque optimales de l'installation après avoir réussi à localiser et éliminer les principales sources d'inhomogénéité magnétique. L'apport de magnétomètres Cs très performants venant compléter le co-magnétomètre Hg existant constitue une des principales améliorations apportées par notre collaboration. De nombreux tests comparatifs ont pu être effectués, démontrant tout le potentiel de cette combinaison inédite. Au cours du dernier cycle de fonctionnement du réacteur en 2008, nous avons pu obtenir nos premières données « nEDM », c'est-à-dire avec un dispositif expérimental totalement opérationnel et ayant d'excellentes performances. La statistique était malheureusement très insuffisante pour obtenir une mesure compétitive de l'EDM du neutron mais nous avons toutefois mis à profit la disponibilité des magnétomètres Cs pour mettre des contraintes fortes sur des couplages exotiques du neutron dépendant du spin.

Début 2009, l'ensemble de l'installation a été démontée en vue de son déménagement vers le PSI (Fig. 2). La réinstallation du spectromètre auprès de la nouvelle source s'est déroulée au cours de l'année 2009, les premières prises de données étant prévues début 2010.



Fig. 2 : Démontage de l'ensemble blindage+chambre à vide du spectromètre RAL-Sussex avant emballage et transport vers le PSI.

Réalisations techniques

De par sa proximité géographique avec l'ILL, le LPSC a joué un rôle déterminant dans le fonctionnement de l'installation et sa remise à niveau. Le service Détecteurs et Instrumentation a été particulièrement sollicité en assurant la coordination technique du projet au niveau du laboratoire et la maintenance de l'installation. Il a également supervisé le démontage, la mise en colis et le déménagement de l'ensemble du spectromètre de l'ILL au PSI. Le SERM a développé un nouveau type de vanne neutron ainsi qu'une nouvelle paire d'électrodes pour la chambre de précession. Pour ce faire, il a dû se familiariser avec les contraintes fortes liées au stockage des UCN aussi bien sur le choix des matériaux (amagnétisme) que sur les traitements de surface. Le service Électronique a développé une nouvelle carte d'acquisition de données intégrant la plupart des fonctionnalités nécessaires au déroulement de l'expérience, ainsi que des cartes pour la lecture de capteurs magnétiques (fluxgate). Enfin, un nouveau software permettant le contrôle global de l'expérience et intégrant la nouvelle carte d'acquisition a été produit par le service Informatique.

Pour en savoir plus

- Test of Lorentz invariance with spin precession of ultracold neutrons. I. Altarev *et al.*, PRL 103, 081602 (2009).