

# Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

Le Modèle Standard de la physique des particules est la théorie qui décrit les interactions électromagnétique, faible et forte entre fermions élémentaires (quarks et leptons) dans le contexte formel de la théorie quantique des champs. Chaque interaction résulte de l'invariance des propriétés physiques sous les transformations d'un groupe  $SU(2) \times U(1) \times SU(3)$  qui se traduit par l'existence de bosons vecteurs véhiculant les interactions : les gluons pour l'interaction forte, les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$  pour l'interaction faible et le photon pour l'électromagnétisme. Dans ce mécanisme d'invariance de jauge les bosons sont nécessairement sans masse. Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs vise à faire apparaître les masses des bosons  $W$  et  $Z$ . Pour ce faire, un nouveau champ scalaire est introduit dans le modèle. La brisure spontanée de la symétrie électrofaible par ce nouveau champ résulte d'une part en des masses pour les bosons de jauge  $W$  et  $Z$ , d'autre part en une nouvelle particule le boson de Higgs.

Depuis les années 50, de nombreuses avancées théoriques et expérimentales ont contribué à l'élaboration de ce Modèle Standard. Son mérite 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 du quark top qui est la particule élémentaire 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 terminées 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) au CERN, ce dernier faisant collisionner des protons de très grande énergie avec une luminosité toujours plus importante. C'est au LHC qu'a été mise en évidence en 2012 la dernière brique manquante du Modèle Standard, le boson de Higgs. Cette découverte a permis aux théoriciens Peter Higgs et François Englert de recevoir le prix Nobel de Physique 2013, près de cinquante ans après leur travaux.

Le Modèle Standard est une théorie prédictive qui possède une vingtaine de paramètres libres, qui ont tous été mesurés aujourd'hui. Néanmoins, ce modèle ne saurait être la théorie ultime. 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, la fraction de l'univers formée de particules standard semble n'être composée très majoritairement que de particules alors que les interactions du Modèle Standard impliquent toujours particules et antiparticules, soit autant de matière que d'antimatière. De fait, le Modèle Standard autorise une faible asymétrie entre matière et antimatière, mais insuffisante pour justifier le déséquilibre observé. 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 accélérée de l'espace-temps et les anisotropies 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 son incapacité totale à inclure l'interaction gravitationnelle qui nécessiterait une modélisation de la gravité quantique.

Plusieurs extensions du Modèle Standard ont été proposées pour résoudre ces problèmes. Parmi celles-ci figurent la supersymétrie, les théories de grande unification, les théories avec des dimensions supplémentaires. Ces différentes extensions supposent l'existence de nouvelles particules ou de nouvelles interactions : partenaires supersymétriques des constituants élémentaires actuels, bosons de Higgs chargés, nouveaux bosons de jauge ( $Z'$ ,  $W'$ , leptokuarks), etc.

Les groupes du LPSC contribuent à l'effort de recherche de cette 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 qui vont aborder ces questions de manière différente et complémentaire : des hautes énergies, auprès des collisionneurs de particules du Fermilab et du CERN (plusieurs TeV), aux très basses énergies avec la physique des neutrons ultra-froids (de l'ordre du neV), en passant par la physique des neutrinos.

La première partie de ce rapport présente le dernier né de ces projets, l'expérience STEREO qui vise à observer l'oscillation des neutrinos issus du réacteur de l'ILL vers une quatrième saveur dite stérile, car elle n'interagit aucunement avec les particules du Modèle Standard. Cette expérience est motivée par un déficit observé dans le flux d'antineutrinos électroniques produit par les fissions dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

La seconde partie présente le programme de recherche de nouvelle physique basé sur des expériences utilisant des neutrons de très basse énergie : modification de la gravité à courte portée et recherche de nouvelles interactions dans le domaine micrométrique avec l'expérience GRANIT à l'ILL, ainsi que la recherche de nouvelles sources de violation de CP via la mesure du moment dipolaire électrique du neutron avec l'expérience nEDM à l'Institut Paul Scherrer, près de Zürich.

La fin de ce chapitre est consacrée à la physique des collisionneurs. La troisième partie présente d'abord les contributions finales du LPSC à l'expérience DØ qui a enregistré le résultat des collisions de protons et d'antiprotons à une énergie de 1,96 TeV produites par le Tevatron jusqu'à son arrêt définitif en 2011. La masse du W a été mesurée avec précision, ce qui, combiné avec les mesures de masse du quark top et du boson de Higgs, permet de contraindre certaines extensions du Modèle Standard.

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 physique du quark top dans le secteur électrofaible dans le Modèle Standard et au-delà, notamment via la recherche d'un boson de Higgs chargé, la recherche de nouvelles particules se manifestant comme une résonance dans les spectres de masse invariante di-lepton, di-photon et top-antitop et les recherches de particules supersymétriques. Les premiers résultats obtenus à partir des données de collisions proton-proton enregistrées par ATLAS aux énergies de 7 TeV (2010-2011) puis de 8 TeV (2012) de même que l'évolution du détecteur pour améliorer la prise de données dans les années à venir ainsi que les contributions du LPSC aux infrastructures de calcul nécessaires à l'analyse des données sont décrits dans la quatrième partie de ce rapport.

Enfin, 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 cinquième et dernier chapitre de ce rapport.

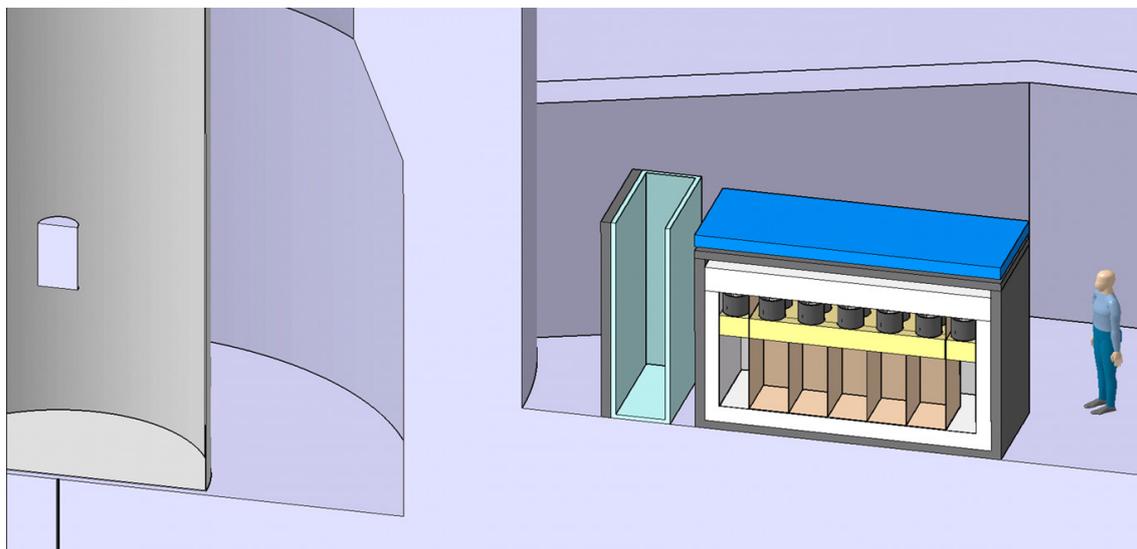
# STEREO

A. Stutz, S. Kox, J. Lamblin, F. Montanet, J.-S. Réal  
C. Bernard, M. Chala, M. Heusch, Service Détecteurs et Instrumentation  
C. Vescovi, G. Bosson, O. Bourrion, D. Tourres, Service Électronique

*The goal of the STEREO experiment is to answer the question of the existence of a sterile neutrino with a mass around 1 eV. The proposed measurement will take place at short distance from the research reactor of ILL in Grenoble. If a sterile neutrino exists then one should observe a distortion of the energy spectrum of the reactor electron antineutrinos induced by the mixing with the new sterile state. The LPSC team is in charge of the muon veto, the data acquisition and the slow control of the experiment.*

L'activité de recherche du groupe porte sur la recherche de neutrino stérile par la mise en évidence d'une oscillation de neutrinos à très courte distance du réacteur de recherche de l'ILL. Le groupe fait partie d'une collaboration de 6 laboratoires, dont 2 laboratoires Grenoblois, l'ILL et le LPSC et 2 laboratoires du labex ENIGMASS le LAPP et le LPSC. Les autres partenaires sont le CEA/Irfu de Saclay, le MPIK d'Heidelberg et l'Université de Casablanca.

Le point de départ de l'hypothèse du neutrino stérile est une réévaluation des spectres d'émission des neutrinos émis par la fission des isotopes de l'uranium et du plutonium conduisant à une augmentation de quelques pour cent du flux de neutrinos émis par un réacteur. Une nouvelle analyse des 19 expériences publiées sur les neutrinos de réacteurs à courte distance (10-100 m) conduit à un déficit moyen de 7% par rapport à cette nouvelle prédiction. C'est ce qu'on appelle l'anomalie des neutrinos de réacteur, qui pourrait s'expliquer par l'existence d'un nouvel état du neutrino, dit stérile.



L'objectif de l'expérience STEREO est la recherche de ce neutrino stérile par l'observation d'une oscillation auprès du réacteur de recherche de l'ILL. Le principe de détection des antineutrinos est la décroissance bêta inverse. La cible du détecteur est un scintillateur dopé au gadolinium afin de signer la capture du neutron par la cascade de gammas associée (8 MeV). Le volume est segmenté en 6 cellules de 0,9 m x 0,9 m x 0,4 m alignées dans la direction du cœur du réacteur et entourées par une couronne externe remplie d'un scintillateur liquide

non dopé permettant de détecter les gammas qui s'échappent. La signature de l'oscillation est une diminution du nombre d'interactions d'antineutrinos variable selon l'énergie des neutrinos et la distance du cœur à laquelle ils sont détectés. Le détecteur sera protégé du flux résiduel de muons cosmiques ainsi que des neutrons et gammas en provenance du cœur par une succession de blindages actifs et passifs. Les moyens nécessaires à la réalisation des détecteurs et à l'aménagement du site ont été obtenus de l'ANR dans le cadre de l'appel à projet blanc 2013. Le LPSC a la responsabilité du détecteur de muons cosmiques, de l'électronique et de l'acquisition de données ainsi que du système d'injection de lumière nécessaire à la calibration du détecteur.

Durant l'année 2013, des mesures de bruit de fond ont été réalisées sur le site de l'ILL avec un compteur Ge et un détecteur  $^3\text{He}$  associé à un blindage neutron modulaire réalisé par le Service Détecteur et Instrumentation (SDI). Les résultats des mesures combinés aux simulations GEANT4 ont permis d'optimiser les blindages passifs et l'aménagement de la casemate. Une simulation GEANT4 a également permis de valider le principe du détecteur Cherenkov à eau pour le veto muon et un prototype a été réalisé par le SDI. La conception de l'électronique dédiée à STEREO est en cours de développement au Service Électronique. Elle est basée sur la lecture rapide des signaux des photomultiplicateurs par des convertisseurs analogique-numérique rapides et un FPGA moderne offrant un traitement en ligne rapide. Le premier démonstrateur a été réalisé à l'automne 2013.

## Groupe UCN

D. Rebreyend, B. Clément, M. Guigue, Y. Kermaïdic, G. Pignol, K. Protasov  
D. Grondin, Y. Carcagno, E. Perbet, F. Vezzu, Service Études et Réalisations Mécaniques  
C. Vescovi, O. Bourrion, E. Lagorio, J.-P. Scordilis, Service Électronique  
R. Faure, O. Zimmermann, Service Détecteurs et Instrumentation  
G. Dargaud, Service Informatique  
C. Martin, Service Administratif et Financier  
Collaborations GRANIT, nEDM

*Our group conducts a program at the interface of particle physics and cosmology, looking for new physics with low energy experiments using Ultra Cold Neutrons (UCN). Over the past two years, important steps have been achieved on our two principal activities: the GRANIT instrument at the Laue Langevin Institute (ILL, Grenoble, France) to study the transitions between quantum states of UCNs trapped in the earth's gravitational field; the nEDM (neutron Electric Dipole Moment) experiment at the Paul Scherrer Institute (PSI, Villigen, Switzerland) to search for new sources of CP violation. For GRANIT, the setup is completed and we are in the commissioning phase whereas data taking has started mid-2013 for the nEDM experiment. During this period, we have also launched a new activity based on the polarized  $^3\text{He}$  TYREX facility at the ILL. Finally, original results on the phenomenology of cosmological models (chameleons) aiming at resolving the dark energy puzzle have been obtained by one of us.*

### Étude des niveaux quantiques d'UCN dans le champ de pesanteur de la Terre

GRANIT est un projet mené en étroite collaboration entre le LPSC et l'ILL depuis 2006, avec la contribution du Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) pour les traitements de surface et l'appui de laboratoires russes (JNIR et PNPI) et américains (VSU et URI). Il vise à induire des transitions entre les niveaux quantiques de neutrons piégés par le champ gravitationnel terrestre à la surface d'un miroir afin de mesurer leurs énergies. Il s'agit d'un des très rares dispositifs expérimentaux permettant l'étude de la gravité dans le contexte de la mécanique quantique.

Comme pour la période 2010-2011, la majeure partie de notre activité a été consacrée à des tests sur la source d'UCN basée sur le principe du ralentissement de neutrons froids (8,9 Å) dans un bain d'hélium superfluide. Grâce à l'ajout d'une nouvelle tête froide sur l'extraction fin 2011, la température requise du bain d'hélium ( $T \leq 1$  K) a pu être de nouveau atteinte de façon routinière. Au cours de 2012, nous avons ainsi pu opérer la source dans les conditions nominales pendant plusieurs mois sans interruption. Ces périodes ont été mises à profit pour mesurer les performances du volume de conversion et les propriétés du faisceau de neutrons extraits (flux, spectre de vitesses) avant connexion de la source au spectromètre. Lors du dernier cycle du réacteur de l'ILL en 2013 (25/06-09/08 avant arrêt pour presque un an) nous avons pu tester pour la première fois le dispositif complet avec l'ensemble des miroirs et mesurer le flux de neutrons derrière une fente de 100  $\mu\text{m}$ . Le flux mesuré (de l'ordre de  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) s'est avéré malheureusement très inférieur à nos attentes, empêchant de commencer le programme de physique. Un diagnostic pour identifier l'origine des pertes et proposer des solutions est en cours. À cette fin, nous utilisons un nouvel outil de simulation développé dans notre groupe qui combine la puissance et la

facilité d'utilisation des outils graphiques du logiciel Root du CERN à des calculs analytiques et donc rapides des trajectoires d'UCN (Fig. 1).

Le Service Études et Réalisations Mécaniques (SERM) du LPSC a continué à jouer un rôle déterminant au cours de cette période. Il a assuré la coordination technique du projet et été le maître d'œuvre dans la conception, la réalisation et l'implémentation des modifications sur la source d'UCN. Le SERM a également participé aux premières étapes du « commissioning » et pris en charge l'essentiel des opérations de maintenance de l'instrument GRANIT. Le Service Électronique (SE) a poursuivi le délicat problème de la fabrication du système de fils (128 fils de section  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  séparés de 0,25 mm) destiné à induire les transitions. Après de nombreux essais infructueux, une technique permettant d'assurer le transfert des fils d'un support intermédiaire au définitif sans créer de court-circuit a été mis au point mi-2013. Le système complet et opérationnel a été livré fin 2013. Une partie des logiciels contrôle-commande et l'acquisition de données du détecteur UCN ont été réalisés par le Service Détecteurs et Instrumentation (SDI) et le SE.

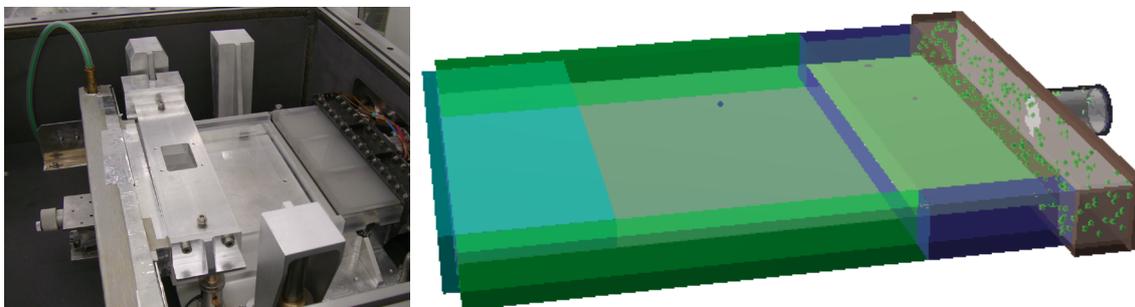


Fig. 1 : Vue de l'intérieur de la chambre à vide de l'expérience GRANIT (photo de gauche) et simulation (à droite). Sont visibles (de droite à gauche) le guide de neutrons, le volume intermédiaire de stockage, la fente d'extraction, le miroir de transport, l'absorbeur et le détecteur UCN.

### La mesure du moment dipolaire électrique du neutron

La mesure du moment dipolaire électrique du neutron (nEDM) est une des expériences phare dans la recherche de nouvelle(s) source(s) de violation de CP. Elle permet d'obtenir des contraintes complémentaires des recherches concurrentes dans les décroissances des mésons B et K sur les extensions du Modèle Standard. Il est à noter que l'absence de nouvelle physique dans les résultats du LHC, et son corollaire qui est de repousser au-delà du TeV l'échelle de la nouvelle physique, lève les contraintes fortes apportées par la limite actuelle sur l'EDM du neutron ( $d_n < 2,9 \times 10^{-26} \text{ e cm}$ ) sur les phases des extensions du Modèle Standard.

Après trois années de tests suite au déménagement du spectromètre nEDM de l'ILL au PSI en 2009, l'année 2012 a marqué le début des prises de données avec un dispositif complet et proche de la configuration définitive. Ces premiers résultats, correspondant à un mois de prise de données fin 2012, ont permis de valider l'ensemble des modifications apportées au dispositif expérimental mais aussi de mettre en évidence quelques difficultés, notamment au niveau du transport de la polarisation des UCN. Le long arrêt hivernal (janvier-mai 2013) a été mis à profit pour effectuer une campagne de cartographie (indispensable pour l'estimation précise de certaines erreurs systématiques) et pour corriger les problèmes identifiés en 2012. Depuis juillet 2013, la prise de données en mode continu a démarré avec une sensibilité par jour d'environ  $2 \times 10^{-25} \text{ e cm}$ . Cette valeur est en-deçà de celle attendue et vient des performances toujours médiocres de la nouvelle

source d'UCN. En effet, malgré les nombreux efforts et vérifications effectués par l'équipe de PSI, la densité fournie reste environ 30 fois inférieure à celle initialement prévue. Dans ce contexte, nous espérons atteindre une limite proche de  $2 \times 10^{-26}$  e cm après 3-4 ans de prises de données.

Dans la prolongation de nos engagements, notre groupe a contribué activement aux points suivants :

- Co-magnétomètre Hg : participation au fonctionnement et à l'amélioration des performances; étude sur les méthodes d'extraction de la fréquence de précession; contribution à la conception du co-magnétomètre Hg pour le futur spectromètre.
- Source de courant pour le champ magnétique principal: caractérisation in situ de la stabilité.
- Analyse de données et systématiques: analyse de mesures corrélant le rapport des fréquences neutron/mercure avec les gradients verticaux mesurés par des magnétomètres Cs. En plus d'un contrôle des erreurs systématiques, cette étude a permis d'aboutir à une mesure du moment magnétique du neutron d'une précision comparable à la meilleure mesure actuelle; poursuite du développement des théories décrivant la dynamique du spin en présence de gradients de champs magnétiques.

Nous avons naturellement pris part assidûment au démarrage et à la mise en route de l'installation, en participant régulièrement aux shifts à PSI. De plus, l'un d'entre nous a passé une année complète au PSI (09/2011-08/2012).

Au cours de ces deux années, la contribution des services techniques du laboratoire a été limitée et a consisté pour l'essentiel à la finalisation de tâches. Le SE a ainsi finalisé l'intégration de la nouvelle version du module central de contrôle de l'expérience qui se trouve maintenant en phase de test avant intégration. Le SE a également démarré une étude préliminaire sur un nouveau type de source de courant ultra-stable. Le software assurant l'interface entre le firmware du module de contrôle et l'interface utilisateur a été fourni par le Service Informatique, et le SDI a participé au développement du logiciel de contrôle-commande d'un polarimètre UV en encadrant un stage de DUT.

### Recherche de nouvelles forces de courte portée

Dans un article publié récemment, Pethukov *et al* ont démontré la très grande sensibilité du taux de relaxation longitudinal de l' $^3\text{He}$  polarisé à des forces pseudo-magnétiques dans le domaine submillimétrique. À partir d'une expérience de démonstration réalisée début 2010 à l'ILL, ils ont pu extraire une limite compétitive sur le couplage scalaire-pseudoscalaire d'une interaction de type axion pour des portées comprises entre  $10^{-6}$  et  $10^{-2}$  m.

Étant partie prenante de cette première mesure, nous avons décidé de poursuivre notre implication en participant au développement d'un nouveau dispositif en collaboration avec A. Pethukov de l'ILL. Celui-ci sera bien sûr basé sur l'équipement TYREX de production d' $^3\text{He}$  polarisé (utilisant la technique MEOP: Metastable Exchange Optical Polarization) avec comme objectif d'atteindre la limite ultime avec cette technique. La principale amélioration par rapport au dispositif de 2010 consiste à obtenir une homogénéité très améliorée du champ magnétique. Pour ce faire, une partie du blindage magnétique de l'expérience n-nbar

qui s'est déroulée dans les années 90 à l'ILL a été récupérée, et un solénoïde interne de dimensions adaptées (5 m x 1 m) a été commandé à Sigmaphi. Notre groupe s'est impliqué dans la conception et le contrôle-commande de l'expérience.

Après réception du solénoïde en août 2013, l'ensemble du dispositif a pu être mis en place dès septembre à proximité de l'équipement TYREX. Les premières mesures de caractérisation dont la car-



Fig. 2: Installation du solénoïde dans le blindage.



Fig. 3: Vue du blindage de l'expérience de recherche de nouvelle force avec l' $^3\text{He}$  polarisé dans son emplacement définitif. L'extrémité du solénoïde générant le champ magnétique est aussi visible.

tographie du champ magnétique ont pu commencer en octobre et l'optimisation du « spin-flipper » par la technique FAP (Fast Adiabatic Passage) optimisée en fin d'année. Les toutes premières prises de données devraient débuter début 2014.

Il est à noter que cette expérience ponctuelle ne nécessite pas un gros investissement technique. La plupart des tâches ont été réalisées par Mathieu Guigue dans le cadre de sa thèse, seul le SDI ayant contribué par du consulting pour la réalisation du logiciel de contrôle-commande avec LabView.

### **Pour en savoir plus**

*Polarized  $^3\text{He}$  as a probe for short-range spin-dependent interactions, A. Pethukov et al, Phys. Rev. Lett. 105, 170401 (2010).*

## **Phénoménologie avec les modèles de caméléon**

La compréhension de l'origine et de la nature de l'énergie noire est un des enjeux majeurs de la physique actuelle. Une solution crédible à cette énigme est fournie par les modèles dits de caméléons où l'énergie noire a pour source un champ scalaire couplé à la matière. En 2011, P. Brax et G. Pignol ont montré que de tels modèles pourraient créer une force à l'échelle micrométrique, mesurable dans des expériences comme GRANIT, et fourni une limite améliorée pour les forts couplages. Plus récemment, ils ont pu montrer que des expériences d'interférence avec des neutrons froids ont une sensibilité encore plus grande. Une expérience utilisant l'instrument S18 de l'ILL a été réalisée au printemps 2013 à l'ILL.

### **Pour en savoir plus**

*Strongly coupled chameleons and the neutronic quantum bouncer, P. Brax and G. Pignol, Phys. Rev. Lett. 107, 111301(2011).*

*Probing strongly coupled chameleons with slow neutrons. Phys. Rev. D. 88 083004 (2013) arXiv:1306.6536 [quant-ph].*

## Expérience DØ auprès du TeVatron

G. Sajot, H. Li, J. Stark  
Collaboration DØ

*DØ is one of the two experiments at the TeVatron collider at Fermilab (Chicago, USA). Data taking at DØ was completed in september 2011. One of the main goals of the DØ experiment is a precise measurement of the W boson mass. This measurement is a key ingredient for indirect constraints (from internal consistency of the standard model) on the mass of the Higgs boson. The Grenoble group is the leader of the W boson mass measurement in DØ. In 2012, DØ has published a new measurement of the W boson mass. This new result represents a major improvement in precision compared to previous measurements. And it has become available at just the right time: together with a comparable result published by the CDF experiment at the same time, it allows us to test if the new Higgs-like particle discovered at CERN in July 2012 does indeed have the mass that is expected for the Higgs boson of the standard model. The mass of the newly discovered boson is indeed found to be consistent with the standard model expectation for Higgs boson as derived from our measurement of the W boson mass.*

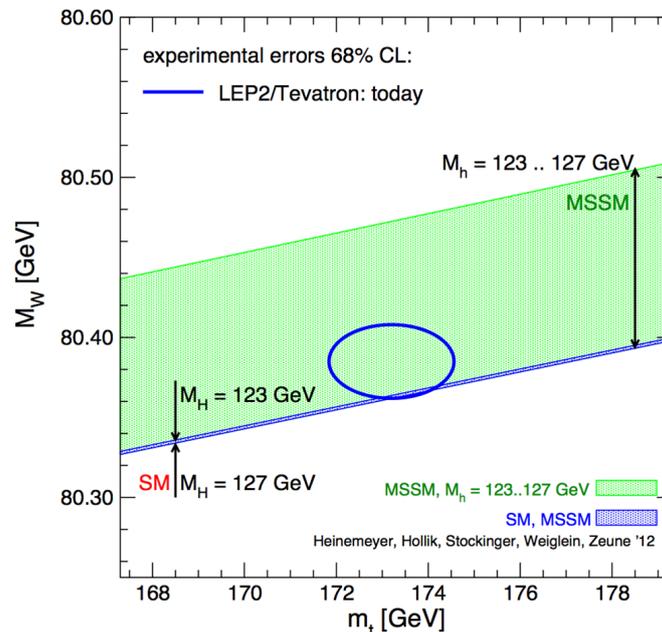
Les expériences CDF et DØ sont installées auprès du TeVatron, le collisionneur du Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) près de Chicago (États-Unis). Le TeVatron a été arrêté en septembre 2011. Le TeVatron produisait des collisions entre des faisceaux de protons et d'antiprotons à une énergie dans le centre de masse de 1,96 TeV. 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 380 physiciens répartis dans 72 institutions et 18 nations. Le groupe du LPSC participe à DØ depuis mi-1998. Dans la période 2010-2013, avec la migration naturelle des physiciens du TeVatron vers le LHC, l'activité DØ du LPSC a été significativement réduite. 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.

### 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. 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 du Modèle Standard. Cette prédiction peut ensuite être comparée à la mesure directe de la masse de la nouvelle particule qui a été découverte, en 2012, par les expériences ATLAS et CMS auprès du collisionneur LHC au CERN pour vérifier si cette nouvelle particule a bien la masse qui est attendue pour le boson de Higgs du Modèle Standard.

Les contraintes indirectes sur la masse du boson de Higgs discutées ci-dessus nécessitent une connaissance très précise de la masse du boson W. Pour arriver à une telle précision expérimentale, les performances du détecteur doivent être excellentes, et elles doivent être très précisément quantifiées. Pour la mesure de DØ, ceci concerne en particulier les performances du calorimètre, car la mesure de la masse du boson W repose sur les mesures calorimétriques des produits de désintégration des bosons W. Les membres du groupe DØ du LPSC travaillent

depuis 2003 sur l'amélioration et la quantification des performances du calorimètre, ainsi que sur la mesure de la masse du boson W. Une première mesure, basée sur 10% des données, a été publiée en 2009. Une nouvelle mesure publiée en 2012 a apporté une amélioration significative en termes de précision : DØ a en effet mesuré la masse du boson W avec une précision de 0,3 pour mille. Ce résultat est le fruit de dix ans de travail d'une équipe de dix personnes environ qui a été dirigée par les physiciens du LPSC. Avec une mesure publiée en même temps par l'expérience CDF, elle permet d'obtenir des contraintes indirectes fortes sur la masse du boson de Higgs. Ces nouvelles contraintes sont arrivées juste au bon moment, c'est-à-dire quelques mois avant la découverte au LHC de la nouvelle particule qui pourrait être le boson de Higgs. En effet, l'une des questions principales de la physique des particules est maintenant de savoir si cette nouvelle particule présente l'ensemble des propriétés qui sont attendues pour le boson de Higgs. La mesure de la masse du boson W de DØ permet d'apporter une pièce du puzzle, par la vérification de la valeur de la masse de la nouvelle particule : la comparaison des contraintes indirectes et directes sur la masse du boson de Higgs est discutée sur la figure 1 qui montre que la masse de la nouvelle particule est compatible avec la masse attendue pour le boson de Higgs du Modèle Standard. Pour cette raison, notre nouvelle mesure de la masse du boson W était très attendue par les physiciens des particules, et elle a reçu beaucoup d'attention depuis sa publication (les figures 2 et 3 en montrent deux exemples).



La figure 1 ci-dessus montre la comparaison entre les contraintes directes et indirectes sur la masse du boson de Higgs. Représentées dans le plan [masse du quark top, masse du boson W], les iso-masses du boson de Higgs (lignes bleues et verte en biais), ainsi que les mesures actuelles de la masse du quark top et celle du boson W (ellipse bleue). Dans le cadre du Modèle Standard, la nouvelle particule découverte par ATLAS et CMS se situe dans la zone bleue qui est définie par les deux lignes bleues en biais. La zone verte correspond à la zone permise dans le cadre du modèle supersymétrique minimal. Le recouvrement entre l'ellipse bleue et la zone bleue montre que la masse de la nouvelle particule est compatible avec la masse attendue pour le boson de Higgs du Modèle Standard.

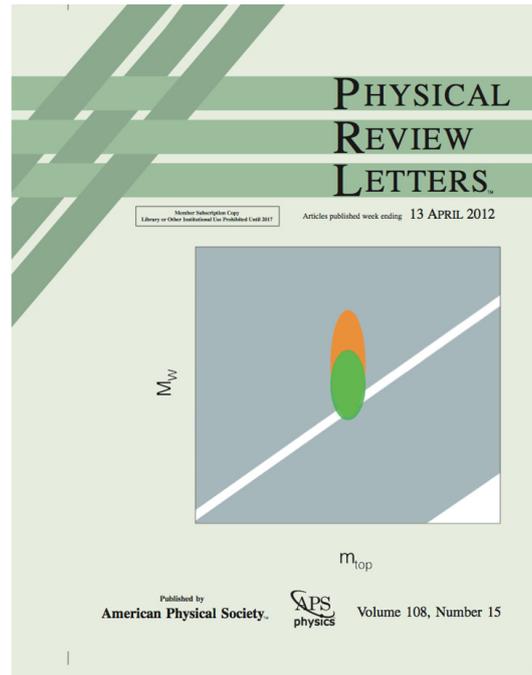


Fig. 2: Couverture de l'édition de la revue *Physical Review Letters* dans laquelle sont publiées les dernières mesures de la masse du boson  $W$  par les collaborations CDF et  $D\emptyset$ .



Fig. 3: Retransmission à la conférence ICHEP 2012 du séminaire au CERN lors duquel les collaborations ATLAS et CMS ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule compatible avec le boson de Higgs. Les contraintes indirectes sur la masse du boson de Higgs obtenues via la mesure précise du boson  $W$  sont discutées sur le transparent qui est visible sur la partie gauche de la photo.

### 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).

“Measurement of the  $W$  boson mass with the  $D\emptyset$  detector”, Collaboration  $D\emptyset$  (V.M. Abazov et al.), *Physical Review Letters* 108, 151804 (2012).

“Measurement of the  $W$  boson mass with the  $D\emptyset$  detector”, Collaboration  $D\emptyset$  (V.M. Abazov et al.), envoyé pour publication à *Physical Review D*, <http://arxiv.org/abs/1310.8628> (2013).

## Expérience ATLAS auprès du LHC

*F. Ledroit-Guillon, J. Brown, Q. Buat, B. Clément, J. Collot, S. Crépe-Renaudin, B. Dechenaux, T. Delemontex, P.-A. Delsart, C. Gabaldon-Ruiz, M.-H. Genest, J.-Y. Hostachy, E. Laisné, B.-T. Le, A. Lleres, A. Lucotte, F. Malek, C. Monini, G. Sajot, J. Stark, X. Sun, B. Trocmé, M. Wu S. Albrand, C. Biscarat, C. Gondrand, J. Fulachier, F. Lambert, J. Odier, Service Informatique D. Grondin, Y. Carcagno, J.-C. Malacour, D. Marchand, J. Menu, Service Études et Réalisations Mécaniques J. Bouvier, D. Dzahini, L. Eraud, L. Gallin-Martel, F. Rarbi, Service Électronique Collaboration ATLAS*

*ATLAS is one of the four main experiments at the Large Hadron Collider (LHC) located at CERN. Its physics purpose is the study of the elementary constituents of matter and their interactions. After a long period of development, building and commissioning, data taking has started at the end of November 2009, and the first physics analyses have been carried out on the data registered in 2010-2011 at a centre of mass energy of 7 TeV. The energy was then increased to 8 TeV in 2012 while the integrated luminosity reached  $20 \text{ fb}^{-1}$ , to be compared to the  $5 \text{ fb}^{-1}$  recorded at 7 TeV. The LPSC physicists have analysed these data in two main directions: top quark physics and search for new particles beyond the standard model. The LHC being shutdown in 2013, they have started to prepare the future running at 13-14 TeV at very high luminosities.*

L'expérience ATLAS est l'une des quatre principales expériences de physique des particules auprès du grand collisionneur de protons et d'ions du CERN : le LHC. Situé à la frontière franco-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. Les premières collisions pour les études de physique ont eu lieu à partir de mars 2010 à une énergie dans le centre de masse de 7 TeV. Les prises de données se sont ensuite poursuivies à cette énergie jusqu'en 2012, année pendant laquelle les données ont été enregistrées à une énergie de 8 TeV, avant un long arrêt du collisionneur en 2013-2014 afin de préparer la montée en énergie à l'énergie nominale de 14 TeV.

Les objectifs scientifiques de l'expérience sont la mise en évidence et l'étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. Le Modèle Standard de la physique des particules décrit notre compréhension actuelle de ces éléments. Le premier objectif a été atteint dès juillet 2012 lorsque les collaborations ATLAS et CMS ont annoncé simultanément la découverte d'un boson de Higgs à une masse d'environ 125 GeV. Ce dernier, associé au processus qui permet aux particules d'acquérir une masse, était la dernière particule du Modèle Standard non encore observée. Le Modèle Standard est donc confirmé une fois de plus aux échelles d'énergie accessibles aux expériences passées et en cours. Il laisse cependant un grand nombre de questions encore ouvertes, de « Pourquoi le boson de Higgs est-il si léger ? » à « Qu'est-ce que la matière sombre qui constitue un quart de l'univers ? ». Il est donc nécessaire de rechercher de la nouvelle physique, au-delà du Modèle Standard, pour répondre à ces interrogations.

Le groupe ATLAS du LPSC appartient à la collaboration ATLAS depuis qu'elle s'est formée. Il a initialement participé à la conception et à la construction d'une partie du calorimètre électromagnétique. Cette implication se poursuit par la certification de la qualité des données du calorimètre et par une activité dans les logiciels de reconstruction des jets. Le LPSC contribue également aux améliorations présentes et futures du détecteur dans deux domaines. Premièrement

nous contribuons au projet IBL, une couche supplémentaire de détecteurs à pixels dans le trajectomètre, qui est installée pendant l'arrêt long de 2013-2014. Deuxièmement, nous sommes engagés dans l'amélioration de l'électronique du calorimètre destinée à lui permettre de conserver ses performances lorsque la luminosité instantanée augmentera d'un facteur quatre à cinq, c'est-à-dire vers 2018, lors de la « phase I de l'upgrade » du LHC. Ces activités sont décrites dans les deux premières parties de ce chapitre.

Les activités des équipes du LPSC se poursuivent également dans le développement d'applications dédiées à la gestion des logiciels et des données d'ATLAS, et dans la gestion de la grille de calcul tant au niveau local (Tier-2) qu'au niveau national (LCG-France). Elles sont décrites dans la partie suivante de ce chapitre.

Finalement, le groupe du LPSC s'investit dans les analyses de physique proprement dites. Deux thématiques principales sont étudiées : la physique du quark top et la recherche de nouvelles particules (boson de Higgs chargé, excitations de Kaluza-Klein du graviton, bosons de jauge lourds, particules supersymétriques). Ce travail d'analyse est décrit dans les dernières parties de ce chapitre.

### Détecteurs

#### **Calorimétrie électromagnétique**

Depuis 1991, le groupe ATLAS du LPSC contribue à la calorimétrie électromagnétique à argon liquide à travers une large palette d'activités. Après plus de 15 ans dévolus à la conception et la construction du détecteur, le groupe s'est réorienté vers la compréhension du détecteur et le processus de certification des données, puis depuis deux ans, dans des développements en vue de l'amélioration du détecteur prévue à l'horizon 2018.

À partir de 2006, un effort important a été mené dans la conception d'algorithmes de contrôle en ligne de différents paramètres : intégrité des données, performances de la chaîne de lecture... Cette implication a trouvé un prolongement dans la certification des données pour l'ensemble de la calorimétrie à argon liquide, dont la coordination a été confiée à un membre du groupe entre 2008 et 2013. Cette responsabilité recouvre principalement deux domaines d'activité connexes :

- La compréhension et le traitement des phénomènes pouvant affecter les performances du détecteur. En l'occurrence, il s'agissait principalement d'instabilité d'alimentations haute tension, de bouffées de bruit cohérent affectant une grande partie du calorimètre et de bruit intermittent affectant une cellule isolée du pré-échantillonneur.
- La mise en place d'une infrastructure informatique de contrôle qualité des données, incluant des actions automatiques permettant de corriger des données potentiellement dégradées. En raison du modèle de traitement des données d'ATLAS, ces actions doivent être proposées dans un intervalle de temps de 48 heures suivant leur acquisition. Si une action requise vient à faire défaut, les données affectées seront indisponibles pour analyse pendant plusieurs mois.

Une implication continue d'un petit groupe de personnes dévouées à ces deux aspects a permis une amélioration constante du taux de données considérées comme de bonne qualité, et ce en dépit de la progression spectaculaire de la

luminosité instantanée à l'origine de nombreux problèmes observés. Ainsi, en 2010, 91% des données étaient certifiées comme bonnes; en 2011, ce taux était de 97% avant de finalement atteindre en 2012 une valeur supérieure à 99%.

En 2018, la luminosité instantanée du LHC devrait atteindre la valeur de  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , soit le double de la valeur nominale. À ce moment, les performances de la chaîne de déclenchement de premier niveau vont se trouver limitées, affectant sensiblement le potentiel de physique de l'expérience. Pour pallier cela, il est prévu de remplacer la chaîne de déclenchement calorimétrique actuellement analogique par un nouveau système totalement digital et de granularité affinée. Ces améliorations ont pour but de préserver les capacités d'identification des électrons tout en permettant un meilleur rejet du bruit de fond hadronique. Pour cela, il est prévu de produire une nouvelle carte électronique de déclenchement comportant notamment un convertisseur analogique-numérique de haute performance : fréquence de 40 millions d'échantillons par seconde, gamme dynamique de 12 bits, faible latence ( $< 200 \text{ ns}$ ), consommation électronique inférieure à 145 mW par canal et haute tenue aux radiations.

Avec une expertise éprouvée en matière de conception de convertisseur (notamment dans le cadre de la collaboration ILC), le service électronique du laboratoire a proposé de développer un circuit intégré de conception novatrice : il s'agit en l'occurrence d'un convertisseur de type SAR (Successive Approximation Register) présentant la particularité de générer localement l'horloge haute fréquence de 640 MHz nécessaire à la conversion. Cette innovation a notamment été rendue possible par l'utilisation de la technologie IBM CMOS8RF (130 nm). Un premier prototype a été produit au printemps 2013 validant le principe de cette génération interne d'horloge, les performances finales demeurant cependant limitées par la présence d'une source de bruit au sein de l'alimentation du circuit. Une nouvelle version de ce circuit a été conçue afin d'apporter une solution à ces problèmes, les dernières simulations laissant espérer des performances très prometteuses bien au-delà des spécifications. Cette nouvelle version de circuit devrait être testée début 2014 avant d'être passée en revue par la collaboration qui prendra sa décision quant au choix final du circuit dans le courant 2014. Enfin, il convient de souligner que ces efforts de conception nourrissent également la réflexion en vue de l'amélioration prévue en 2022, où l'intégralité des cartes de lecture du calorimètre devra être remplacée.

### **Projet IBL (Insertable B-Layer)**

C'est en 2008 que la collaboration ATLAS a décidé d'ajouter à son détecteur de vertex à pixels actuel une quatrième couche active située à un rayon moyen de 34 mm à partir de l'axe du faisceau. Elle sera constituée d'environ 12 millions de pixels de silicium ( $50 \times 250 \mu\text{m}^2$  par pixel) réalisés pour 2/3 de sa surface en technologie planaire et 1/3 en technologie 3D. 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 voûte 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 durant 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  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  alors que l'on pourrait dépasser le double de cette valeur après le long arrêt de 2018. Les études par simulation ont montré que l'ajout d'IBL permettra de gagner un facteur 2 à 2,5 sur le rejet des jets de quarks légers à efficacité d'étiquetage de quarks b constante. IBL permettra également de tester in situ la technologie de pixels 3D qui pourrait fonctionner jusqu'à une luminosité de  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  et ainsi être employée pour la construction d'un nouveau détecteur de pixels pour la phase à haute luminosité du LHC.

Le LPSC participe à ce projet depuis la fin de l'année 2009. Le service mécanique du laboratoire a conçu et réalisé les outillages qui seront utilisés pour insérer IBL directement dans le détecteur ATLAS (Fig. 1). Ces réalisations sont décrites plus longuement dans le chapitre consacré au service mécanique du laboratoire. Par ailleurs, le service électronique du LPSC coordonne la conception, la documentation et l'installation des services d'IBL ainsi que la production des câbles de type III et IV. Il intervient sur les différents points de connexion

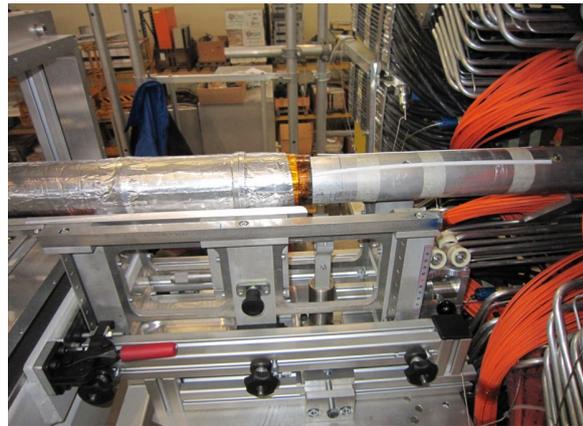


Fig. 1: Test des outillages d'insertion automatique d'IBL dans le détecteur ATLAS mené avec l'université de Genève dans le hall 180 du CERN.

d'IBL (Fig. 2). Le groupe de micro-électronique a conçu un comparateur à très faible consommation pour un convertisseur analogique-numérique SAR 10 bits

utilisé dans la partie de contrôle lent de l'ASIC de lecture FE-I4. Ce circuit est le plus gros ASIC jamais produit pour les besoins de la physique des particules dans le monde.



Fig. 2: Le point de connexion PP2 (Patch Panel 2).

IBL est actuellement en phase d'intégration et de test dans un local en surface au CERN (SR1). Son installation dans ATLAS est prévue à partir du printemps 2014. Le service mécanique pourrait participer à cette opération.

### Calcul scientifique LHC et développements logiciels

Depuis le démarrage du LHC en 2010, les données accumulées par les expériences ont été stockées et traitées avec succès par la grille de calcul et de stockage du LHC, mise en œuvre par la collaboration W-LCG<sup>1</sup>. La grille a su s'adapter à l'évolution des flux et des quantités de données à traiter mais aussi à l'évolution des technologies et des modèles de calcul des expériences. Ainsi, des centaines de péta-octets de données issus des détecteurs ou produits par

<sup>1</sup> WLCG (World wide LHC Computing Grid): <http://lcg.web.cern.ch/lcg/>.

simulation ont été stockés et traités et des milliers de chercheurs, quelle que soit leur situation géographique, ont eu accès à ces données pour les analyser. La réussite du traitement des données du Run 1, la première période de fonctionnement du LHC (2010-2013) qui a permis la publication de nombreux résultats parmi lesquels la découverte d'un boson de Higgs, démontre la solidité, la fiabilité et les très bonnes performances de la grille.

Le groupe ATLAS du LPSC est fortement impliqué à plusieurs niveaux dans cet aspect de nos recherches puisqu'il comprend le responsable scientifique W-LCG pour la France et une personne qui assure le suivi de la grille pour le nuage (Cloud) français<sup>2</sup> d'ATLAS et la responsabilité scientifique du nœud de grille du LPSC. De plus, plusieurs membres du groupe participent à l'élaboration des programmes de reconstruction d'ATLAS et des programmes d'analyse. Enfin d'autres ont contribué à la coordination ou à la gestion du traitement des données pour des groupes de physiques ou pour la collaboration dans son ensemble.

Le service informatique du LPSC contribue également activement à la collaboration ATLAS en développement et maintenant différents outils de base de données, AMI et TagCollector.

### **La grille de calcul LHC**

La grille W-LCG est un ensemble de centres de calcul et de stockage appelés sites. Elle a été conçue selon un modèle hiérarchique en quatre niveaux: les « Tier » en anglais. Le Tier-0 ou T0 est le centre du CERN, les 11 Tier-1 (T1) sont de grands centres nationaux et les Tier-2 et 3 (T2 et T3) sont des sites d'importance très diverse. On compte plus de 200 sites répartis sur cinq continents. L'appartenance d'un site à un niveau donné fixe la nature et la qualité des services qu'il doit fournir. La quantité de ressources qu'un site propose aux expériences est à la discrétion des agences de financement.

Une composante essentielle de la grille est le réseau qui relie les sites entre eux. Ainsi, un réseau privé spécialement conçu pour le LHC et de haut débit (10 Gbit/s ou plus), LHCOPN (LHC Optical Private Network), connecte le T0 aux T1. Il assure le transit des données venant des expériences et des données de physique traitées à un taux de l'ordre de 2 Go/s. Les T2 sont connectés aux T1 par des réseaux de l'ordre du Gbit/s. Le modèle pyramidal et hiérarchique (T0, T1 et T2) des premières années a été remplacé par un modèle en maillage qui estompe peu à peu les différences entre les niveaux. Cette évolution s'appuie en particulier sur la fiabilité du réseau et l'amélioration des taux de transfert qui se poursuit actuellement par le développement d'un réseau privé entre les T2s à 10 Gbit/s appelé LHCONE.

Pour traiter l'ensemble des données enregistrées par les expériences du LHC, les besoins en capacité de calcul atteints en 2012 sont de plus de 1 million kHEP-SPEC06-heure/mois<sup>3</sup> (plus de 2 millions de tâches par jour ou l'équivalent de 500 000 ordinateurs de bureau modernes) et plus de 200 Po de disque.

<sup>2</sup> Le nuage français pour ATLAS comprend l'ensemble des sites français, japonais, chinois et roumains qui proposent des ressources pour le traitement des données de l'expérience ATLAS.

<sup>3</sup> Le HEP-SPEC06 est une unité de référence utilisée en physique des hautes énergies permettant d'évaluer la puissance de calcul d'un processeur indépendamment de ses caractéristiques techniques; pour donner une idée, une machine de 2010 avec 8 cœurs représente environ 100 HEP-SPEC06.

La France héberge au centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne dans la région lyonnaise, l'un des 11 T1 de W-LCG. Elle dispose également de T2s à Annecy, Clermont-Ferrand, Grenoble, Marseille, Nantes, Strasbourg et en Ile-de-France et d'un T3 à Lyon. 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>4</sup> et dont la responsabilité scientifique est assurée par le LPSC.

### **La grille de calcul et l'expérience ATLAS**

L'ensemble des données enregistrées par ATLAS pendant le Run 1 représente quelques 5 milliards de collisions réelles auxquelles il faut ajouter les collisions simulées (environ 4 milliards en 2012 à un rythme d'environ 50 millions par jour). Environ 800 utilisateurs différents ont utilisé la grille qui pour ATLAS correspond à 130 sites. L'ensemble a fonctionné avec un très bon niveau de performance et la grille a su s'adapter à des demandes et des conditions qui n'avaient pas toutes pu être anticipées : grands taux de déclenchement (le double de ce qui avait été initialement prévu) et d'événements d'empilement, une production Monte Carlo intense et une forte demande des utilisateurs pour l'analyse.

Depuis 2010, le nombre de tâches simultanées en exécution n'a cessé d'augmenter pour dépasser 140 000 tâches en 2012 (Fig. 3). La consommation en CPU en 2012 a été de 3000 milliards d'heures HEP-SPEC06 (ou 4 millions d'années de calcul sur une machine actuelle). L'analyse représente un peu plus de 50% des tâches et 22% du CPU total. Le tout a fonctionné avec un taux d'efficacité remarquable (90% de succès et d'efficacité CPU pour la production).

Fin 2012, les données toutes catégories confondues sur disque et sur bande représentent environ 130 Po (Fig. 4) et environ 400 millions de fichiers. Le taux d'accès aux fichiers est de l'ordre de 5 millions par jour et le taux de transfert du T0 vers les T1 est autour de 2 Go/s en moyenne sur une journée, le taux de transfert global entre tous les sites étant de 10 Go/s. Environ 20 Po de données transitaient par mois sur la grille fin 2012.

Un peu plus de 2% des tâches d'ATLAS ont été traitées sur le nuage français soit plus de 15000 tâches en continu. L'efficacité moyenne du nuage est similaire à celle de l'ensemble des sites. En ce qui concerne les données, le nuage français accueille environ 10% des données de l'expérience.

Ces très bonnes performances globales et au niveau du nuage français sont le fruit du travail de nombreuses personnes qui assurent le suivi de l'ensemble de la grille, son bon fonctionnement et son évolution. On notera en particulier l'importance du développement et de l'amélioration des outils de surveillance nécessaires à la compréhension du fonctionnement du système et à la mise en évidence et au diagnostic des problèmes et de leur fréquence. Ceci permet en effet d'améliorer la fiabilité de la grille en sortant au plus vite tout système défaillant de la production et en mettant en place des solutions efficaces (automatisées si possible).

Parmi les évolutions qui ont accompagné le fonctionnement de l'expérience, les plus importantes sont liées à la qualité du réseau qui a permis de faire tomber les frontières entre nuages. Ainsi les données peuvent transiter directement d'un T2 à un autre sans passer par deux T1 comme il était prévu à l'origine. Ceci permet

<sup>4</sup> Le site Web du projet LCG-France : <http://lcg.in2p3.fr/>.

d'économiser du disque dans les T1, de diminuer les sources d'erreurs en éliminant les intermédiaires et de mieux répartir la charge des différents sites puisque des T2 peuvent dorénavant faire de la production pour les T1 en dehors de leur nuage. La distribution des logiciels d'ATLAS dans les sites a aussi été améliorée ainsi que l'accès aux bases de données qui a été élargi à l'ensemble des T2.

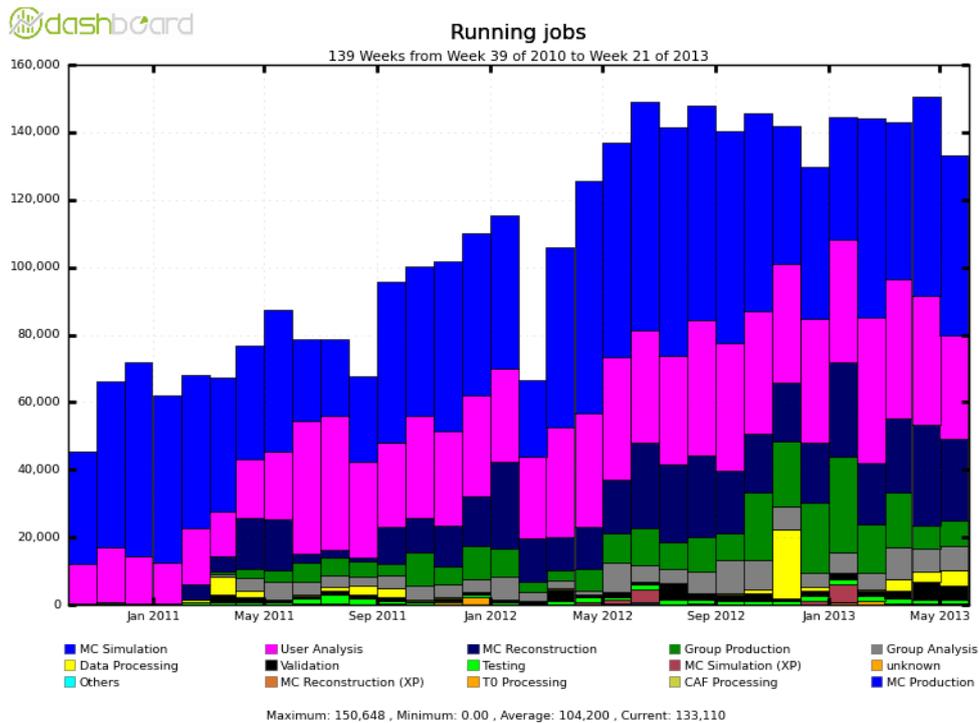


Fig. 3: Nombre de tâches simultanées exécutées sur l'ensemble des sites de la grille pour l'expérience ATLAS depuis octobre 2010.

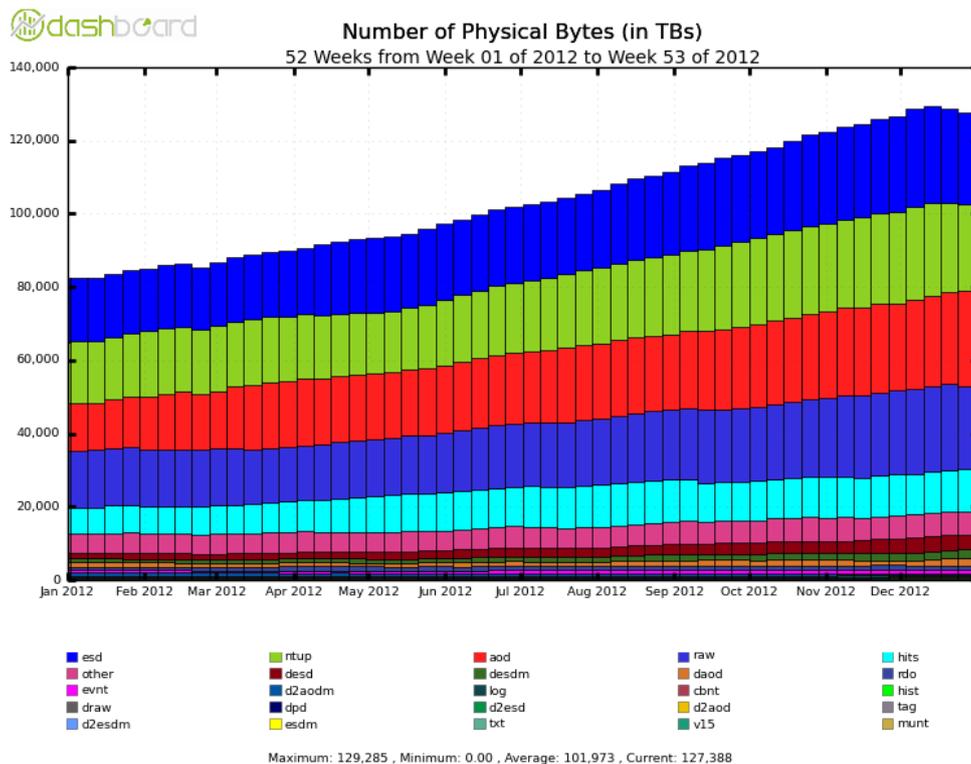


Fig. 4: Quantité de données enregistrées sur la grille pour l'expérience ATLAS en fonction du temps pour l'année 2012.

### **La participation du site de grille du LPSC**

Le nœud de grille du LPSC est décrit dans la partie plateforme de ce document. Son activité a représenté en 2012 environ 1% de l'activité de l'ensemble des T2 et 10% de celle des T2 français hors CC-IN2P3 pour ATLAS. 600 tâches de cette expérience tournent en moyenne et en continu ce qui représente environ 1 500 000 tâches sur l'année soit 2 900 ans HEP-SPEC06. Environ 60% des tâches traitées sont des tâches d'analyse, les 40% restant se partagent pour moitié en tâches de production et de test. La répartition en terme de CPU utilisé est très différente: l'analyse représente 25% du CPU consommé, les tests 3% et la production 70%. Ces pourcentages sont similaires à ceux de la moyenne des T2 d'ATLAS sauf en ce qui concerne les tâches de reconstruction qui représentent 15% des tâches au LPSC et un peu moins en moyenne sur l'ensemble des sites car ces opérations exigeantes ne sont pas distribuées à tous les sites.

Côté stockage, environ 540 To sont disponibles et utilisés par l'expérience. Le LPSC, étant classé comme un site fiable, reçoit 2,6% des données d'ATLAS dont une grande fraction de données primaires (données dont on assure aux utilisateurs la présence sur la grille). Chaque mois 100 To (50 To) sont transférés vers (depuis) le LPSC.

Les performances du site sont très bonnes: sa disponibilité pour la production et l'analyse est de 95% sur l'année 2012 et le pourcentage des tâches de production correctement exécutées sur le site est supérieur à 90%. Les erreurs les plus fréquentes sont liées au système de gestion des tâches et à l'accès aux données.

### **AMI et TagCollector**

Depuis plusieurs années une équipe du service informatique du LPSC développe deux applications essentielles pour ATLAS. Une partie conséquente du code est commune aux deux logiciels.

- AMI: ATLAS Metadata Interface est le point d'entrée pour les physiciens afin de consulter les données disponibles pour l'analyse. Cette application permet la recherche par métadonnées.
- Tag Collector: Gestion de packages et releases du logiciel hors-ligne d'ATLAS. L'enjeu principal est de gérer quelles versions de quels packages doivent être dans quelle release et d'imposer la politique de la coordination.

Ces deux dernières années ont vu l'addition de plusieurs nouvelles fonctions dans les deux applications. Signalons en particulier le « Dataset Browser », une recherche de données où le choix se fait progressivement par sélection des valeurs des paramètres disponibles. À tout moment le nombre de datasets, fichiers et événements dans la sélection est mis à jour.

Nous avons travaillé avec la coordination « Data Preparation » pour améliorer et étendre notre interface de définition des périodes de données, sur la base des « good run lists », et le regroupement de données dans des containers prêts pour l'analyse.

Une autre fonction, définie à l'origine pour vérification du « reprocessing », a été étendue pour permettre la coordination des groupes de physique de vérifier que le nombre d'événements dans leurs fichiers est correct.

Notre collaboration avec le groupe Monte Carlo a abouti à l'entrée dans AMI de nouveaux paramètres de métadonnées, enrichissant ainsi les possibilités de recherche des données simulées.

Quant à TagCollector, il a fallu suivre l'évolution de la gestion des « releases » dans ATLAS. Une métrique de « Software Quality » a été implémentée par le moyen d'un lien vers le traceur de bogues d'ATLAS. Plus récemment le code a été modifié pour pouvoir intégrer un nouveau type de release, dédié à l'analyse.

Il y a eu en outre une refonte de notre client python, pyAMI. Ce dernier est commun à nos deux applications. Nous avons bénéficié de la participation d'un utilisateur, qui a implémenté une couche très spécifiquement orientée vers la physique.

Plus de détails concernant les améliorations de technologie et d'infrastructure se trouvent dans le chapitre *Service Informatique* de ce rapport.

### **Pour en savoir plus**

*W-LCG Memorandum Of Understanding: protocole d'accord de collaboration WLCG, CERN-C-RRB-2005-01.*

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

Sabine Crépe-Renaudin, *Habilitation à diriger des recherches, Université de Grenoble, 2013.*  
<https://ami.in2p3.fr>.

## **Reconstruction, analyses et résultats de physique**

### **Reconstruction des jets hadroniques**

Un jet (ou gerbe) hadronique est le produit des phénomènes de fragmentation et d'hadronisation initiés par les émissions de partons. Ces gerbes sont abondamment produites dans les collisions de protons et concernent toutes les analyses dans ATLAS : comme caractéristiques d'un état final, bruits de fond ou objets d'étude en soi. Le groupe ATLAS du LPSC est fortement impliqué dans la reconstruction expérimentale de ces objets.

- Le groupe a contribué aux études portant sur la calibration des constituents des jets mesurés dans le calorimètre : les « clusters » topologiques. Il s'agit de pré-calibration visant à tenir compte des réponses différentes du calorimètre vis-à-vis des particules hadroniques ou électromagnétiques.
- Le LPSC a la responsabilité du sous-groupe en charge des logiciels dédiés à ces objets. Le travail technique a plusieurs volets : maintenance des logiciels, adaptation aux contraintes techniques (utilisation CPU, espace disque, environnement logiciel) et expérimentales (empilement) et validation. Un autre aspect de cette tâche consiste en l'implémentation de nouvelles techniques d'analyses en lien avec les jets hadroniques : celles-ci sont devenues cruciales pour étudier les objets de haute impulsion et réduire le bruit d'empilement. Il s'agit par exemple de calculs de sous-structure de jet ou d'utilisation combinée des traces du détecteur interne. La dernière part du travail est la coordination des efforts logiciels avec les nombreux autres analystes travaillant sur les jets.
- Enfin une activité plus récente consiste en la préparation de la prochaine phase du LHC : la collaboration va changer de modèle d'analyse. Ceci implique une réécriture et une réorganisation considérable des logiciels de jets qui s'étalera jusqu'à la reprise des collisions.

### **Physique du quark top**

Depuis la découverte du quark top au TeVatron du Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF, un programme ambitieux a démarré au LHC visant à des mesures de précision des propriétés de production et de décroissance du quark top et

à la recherche de signes de nouvelle physique via l'observation de déviations par rapport aux prédictions du Modèle Standard. Dans les collisionneurs hadroniques, les quarks top sont principalement produits sous forme de paires par l'intermédiaire de l'interaction forte. Ils peuvent également, mais dans une proportion nettement moindre, être produits par interaction faible sous forme de quarks célibataires, cette production impliquant un vertex  $Wtb$ . Trois états finals se différenciant par la virtualité du boson  $W$  échangé contribuent à la production électrofaible de quark top : la voie  $t$  ( $Q^2 < 0$ ), la voie  $s$  ( $Q^2 > 0$ ) et la production associée du quark top avec un boson  $W$  (réel). Quel que soit son mode de production, le quark top décroît par interaction faible en un boson  $W$  et un quark de type down, lequel, d'après les valeurs prédites par le Modèle Standard pour les éléments de la matrice de mélange CKM, est de façon prédominante un quark- $b$ . Le boson  $W$  peut quant à lui décroître par la suite soit leptoniquement soit hadroniquement. Les trois modes de production électrofaible, ainsi que la désintégration du quark top sont susceptibles d'être sensibles à des manifestations différentes de nouvelle physique : couplages  $Wtb$  anormaux, existence de nouveaux bosons vecteur ( $W'$ ) ou scalaire ( $H^+$ ). En particulier, du fait de la masse élevée du quark top, un boson scalaire chargé pourrait se substituer au boson  $W$  dans les processus de production faible du quark top ainsi que dans sa désintégration, pour un boson scalaire léger.

C'est dans le cadre de l'étude de la production de quark top par interaction électrofaible que s'insèrent les activités du groupe du LPSC depuis presque dix ans avec, au cours des dernières années, la participation de trois chercheurs permanents, d'un post-doctorant et de quatre étudiants en thèse. Une cinquième thèse, en co-tutelle avec Uppsala se focalise sur la désintégration du top en Higgs chargé.

### **Recherche de production single top en voie $t$ et polarisation du top**

Pour la production électrofaible de quark top en voie  $t$ , une section efficace de  $97,3 \pm 30,5$  pb, en accord avec la prédiction du Modèle Standard, a été obtenue avec l'analyse basée sur des arbres de décision et en utilisant  $1,04$  fb $^{-1}$  de données enregistrées par le détecteur ATLAS à 7 TeV. La section efficace a été mesurée en utilisant une sélection sur la valeur d'un discriminant construit avec les arbres de décision stimulés afin de réduire significativement la contribution des événements de bruit de fond. La valeur de la force du couplage  $Wtb$  a ensuite été extraite de la section efficace et la valeur  $|V_{tb}| = 1,23 \pm 0,20$  a été obtenue. Cette analyse effectuée par le groupe du LPSC a permis de valider les résultats obtenus en utilisant des réseaux de neurones. Ces résultats ont été publiés par la collaboration ATLAS, un des membres du groupe ayant été l'un des responsables de l'édition de cette publication.

Contrairement à la production par interaction forte, les quarks top produits par interaction électrofaible sont très fortement polarisés. La mesure des observables de polarisation  $W$  permettront en particulier d'avoir des contraintes supplémentaires pour la détermination des limites sur les couplages  $Wtb$  anormaux. Les différentes observables de polarisation sont extraites des distributions angulaires des produits de décroissance (lepton chargé ou jet étiqueté  $b$ -quark) reconstruites par rapport à des axes de spin choisis de façon appropriée pour le quark top et le boson  $W$  (Fig. 5). Un travail très important a été mené par le groupe pour le développement, la validation et la comparaison de différentes méthodes de dé-

convolution/convolution nécessaires afin de corriger les distributions angulaires mesurées à partir des objets détectés et reconstruits des effets de résolution et d'acceptance du détecteur et des sélections des événements. Des études ont également été effectuées en parallèle afin d'étudier à partir de simulations l'impact de couplages  $Wtb$  anormaux sur les différentes observables de polarisation. De premiers résultats expérimentaux ont également été obtenus, en particulier pour la mesure de la polarisation du quark top, à partir des données collectées par ATLAS à 7 TeV. Ces différentes études et mesures ont fait l'objet d'une thèse soutenue au laboratoire en octobre 2013. Une valeur de  $0,90 \pm 0,24$  a été mesurée pour le degré de polarisation des quarks top produits en voie  $t$ . L'utilisation de deux analyseurs de spin, lepton chargé et b-jet, a également permis d'extraire le rapport de leurs pouvoirs d'analyse et la valeur  $\alpha_b/\alpha_t = -0,31 \pm 0,24$  a été obtenue. Ces deux résultats sont en accord avec les prédictions du Modèle Standard.

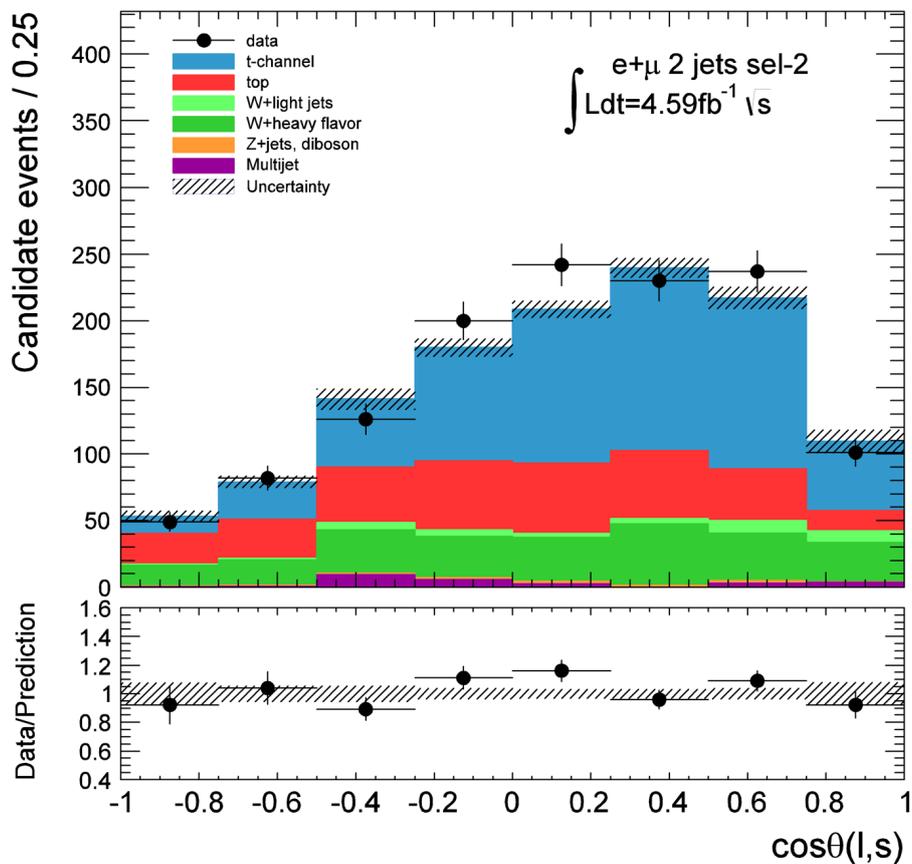


Fig. 5: Distribution angulaire du lepton chargé pour la mesure du degré de polarisation du quark top dans la production en voie  $t$  à 7 TeV.

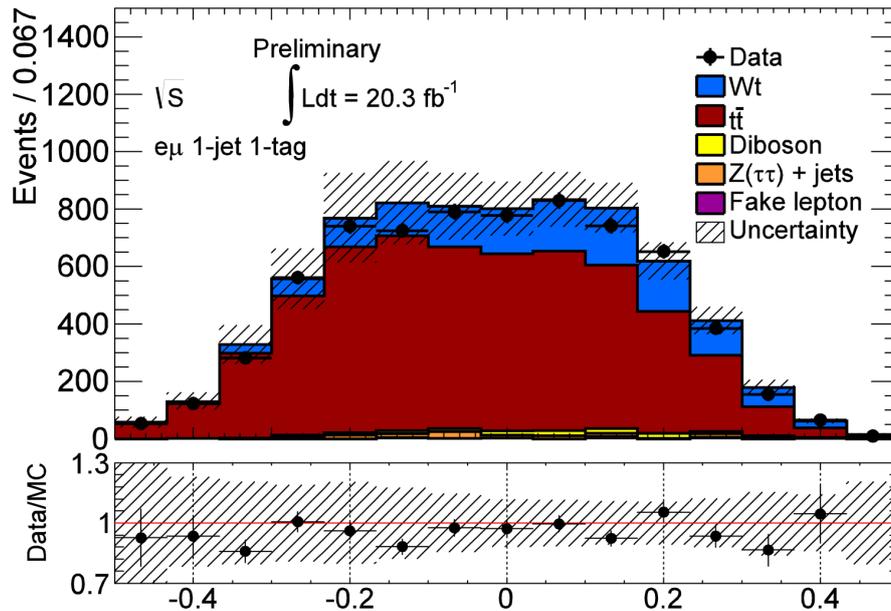


Fig. 6 : Distribution du classificateur des arbres de décision pour la mesure de la section efficace de production associée  $Wt$  à 8 TeV.

### Pour en savoir plus

« Mesure de la section efficace de production de single top en voie- $t$  en utilisant des arbres de décision avec ATLAS à  $\sqrt{s}=7$  TeV », Jin Wang, Université de Grenoble, juin 2012.

The ATLAS collaboration, *Phys. Lett. B* 717 (2012) 330.

“Top polarization measurement in single top quark production with the ATLAS detector”, Xiaohu Sun, Université de Grenoble, octobre 2013.

### Production associée d'un top et d'un boson W

Concernant la production associée de quark top ( $Wt$ ), le travail d'analyse du groupe du LPSC a conduit à la publication de la première preuve de l'existence de ce mode de production, publication dont un des membres du groupe a été le responsable d'édition. Cette analyse est basée sur la sélection des états finals à deux leptons chargés couplée à un ajustement des distributions du classificateur des arbres de décision afin d'extraire la section efficace. En utilisant  $2,05 \text{ fb}^{-1}$  de données collectées à 7 TeV, une significativité de 3,3 fois la déviation standard a été observée et la section efficace de production correspondante est de  $16,8 \pm 5,7 \text{ pb}$ , valeur en bon accord avec la prédiction du Modèle Standard. À partir de ce résultat, l'élément de matrice CKM  $|V_{tb}| = 1,03 \pm 0,19$  a été dérivé en supposant que la production  $Wt$  via les couplages  $|V_{ts}|$  et  $|V_{td}|$  est petite. Le groupe du LPSC a également contribué à la mesure de la section efficace de production associée à 8 TeV en analysant de façon similaire l'ensemble des données disponibles à cette énergie ( $20,3 \text{ fb}^{-1}$  de luminosité intégrée), cette première analyse étant cependant restreinte au seul état final constitué d'un électron et d'un muon. Une section efficace de  $27,2 \pm 5,8 \text{ pb}$  a été mesurée à partir de l'ajustement de la distribution du classificateur des arbres de décision (Fig. 6). Cette valeur correspond à une significativité de 4,2 fois la déviation standard et une limite inférieure de 0,72 à un niveau de confiance de 95% a été dérivée pour l'élément de matrice  $|V_{tb}|$ . Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus à 7 TeV et avec les prédictions du Modèle Standard.

## **Pour en savoir plus**

« Mesure de la section efficace de production électrofaible de quark top dans le mode associé  $W+t$  dans le canal di-lepton auprès de l'expérience ATLAS au LHC », Thomas Délémontex, Université de Grenoble, octobre 2012.

The ATLAS collaboration, *Phys. Lett. B* 717 (2012) 330.

The ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2013-100.

## **Recherche de production single top en voie s**

Des résultats préliminaires sur la recherche de la production de quark top célibataire en voie s ont également été fournis par le groupe. Une limite supérieure à un niveau de confiance de 95% de 20,7 pb a été obtenue pour la section efficace de production à 7 TeV ; cette limite est en accord avec la section efficace calculée dans le cadre du Modèle Standard ( $4,63 \pm 0,20$  pb). Cette première mesure est basée sur l'analyse des événements contenant un lepton chargé, de l'énergie transverse manquante et deux jets étiquetés comme venant d'un quark-b. Pour cette mesure, deux types de classificateurs d'arbres de décision ont été utilisés afin d'optimiser la discrimination du signal par rapport aux bruits de fond principaux et de minimiser l'impact des incertitudes systématiques dominantes.

## **Recherche d'un boson de Higgs chargé léger**

Après la découverte d'un boson de Higgs neutre et léger, la question de l'existence d'autres particules scalaires fondamentales mais de masse plus élevée pouvant être neutres ou chargées se pose. Nombre d'extensions du Modèle Standard, telle la supersymétrie, font apparaître un nouveau doublet de champs de Higgs, qui se manifestent par l'ajout de 4 nouveaux bosons de Higgs dont deux sont neutres et deux autres chargés.

S'il possède une masse inférieure à celle du quark top, un boson de Higgs chargé peut être produit dans la décroissance d'une paire top-antitop selon le canal :  $t \rightarrow bH^+$ . La décroissance leptonique la plus probable du boson de Higgs chargé est alors en une paire constituée d'un lepton tau et de son neutrino associé. Ceci conduit aux états finals observés suivants :  $t \rightarrow bH^+ \rightarrow b\tau^+ \nu_\tau \rightarrow b l^+ \nu_l \nu_\tau \nu_\tau$ . Puisque le rapport de branchement leptonique d'un Higgs chargé ( $H^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau \rightarrow l^+ \nu_l \nu_\tau \nu_\tau$ , 35%) est légèrement supérieur à celui d'un boson W ( $W^+ \rightarrow l^+ \nu_l (\nu_\tau \nu_\tau)$ , 25%), la présence d'un boson de Higgs chargé léger devrait produire un petit excès d'événements à un ou deux leptons dans les désintégrations de paires de quark top, comparativement aux prédictions du Modèle Standard.

Une analyse en variables discriminantes a été réalisée pour distinguer, dans ce type d'événements, les leptons provenant de la décroissance de taus de ceux, cinématiquement plus durs, produits directement par la désintégration de bosons W. La production d'un boson de Higgs chargé conduirait à l'observation d'une petite baisse d'événements leptoniques du fait que les leptons provenant de la décroissance de taus sont plus mous.

En raison de sa sensibilité limitée, l'analyse précédente a été abandonnée au profit d'une méthode mettant en jeu la violation de l'universalité leptonique dans la décroissance de paires top-antitop en présence de bosons de Higgs chargés. En effet si des bosons de Higgs chargés sont produits dans la désintégration de quarks top, et sachant que ceux-ci décroissent de façon prédominante en paires tau-neutrino, violant ainsi l'universalité leptonique (équiprobabilité de

décroissance dans les trois types de leptons), les rapports de nombres d'événements  $N(e+\tau)/N(e+\mu)$  et  $N(\mu+\tau)/N(e+\mu)$  devraient être supérieurs aux prédictions du Modèle Standard. Dans tous ces événements les taux sont identifiés par leur décroissance hadronique. Cette technique qui fait appel à un rapport de mesures permet de réduire notablement les erreurs systématiques communes, mais elle repose sur une puissante identification des décroissances hadroniques des leptons taus. Nous nous sommes concentrés sur la mesure des décroissances hadroniques de taus et plus particulièrement sur leur reconnaissance dans un environnement de jets produits dans la désintégration de quarks top. Cette analyse a été conduite sur les  $4,6 \text{ fb}^{-1}$  de donnée à 7 TeV. Cette activité a donné lieu à deux articles. En supposant que le rapport de branchement  $H^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$  est de 100%, une limite supérieure de 3,2%-4,4% peut être placée sur le rapport de branchement  $t \rightarrow bH^+$  dans un domaine de masse du boson de Higgs chargé allant de 90 à 140 GeV. Cette étude se poursuit avec l'analyse des données de collision accumulées en 2012.

Dans la seconde moitié de 2012, nous nous sommes également attelés à la préparation de la recherche d'un boson de Higgs lourd dont la production est analogue au processus  $Wt$ , avec un état final composé d'une paire de quarks  $t$  et  $b$ . Cette analyse sera un objectif important du LHC à partir de 2015. Ce canal est difficile à mesurer, du fait de la présence d'un bruit important dû aux paires top-antitop qui sont très difficiles à discerner du signal. Nous nous sommes concentrés sur des méthodes de reconstruction d'événements qui font appel à des arbres de décision stimulés ou des fonctions de vraisemblance. Cette étude est toujours en cours.

### **Pour en savoir plus**

*The ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2011-151.  
JHEP 1206 (2012) 039 et JHEP 03 (2013) 076.*

### **Recherche de production résonante de nouvelles particules**

Le Modèle Standard semble désormais complet avec la découverte en 2012 d'une particule compatible avec le boson de Higgs. Pourtant, les motivations restent fortes pour chercher d'autres phénomènes non décrits dans cette théorie. En particulier, de nombreuses extensions du Modèle Standard prédisent l'existence de nouvelles particules pouvant être produites de manière résonante au LHC. Notre groupe participe à leur recherche à travers trois analyses correspondant à différents états finals: di-lepton, di-photon et top-antitop. Cette diversité nous permet d'une part d'exploiter l'expertise technique du groupe sur le calorimètre électromagnétique et les jets hadroniques. D'autre part, en cas de découverte, seule la combinaison de plusieurs canaux d'analyse permettrait de discriminer les modèles physiques sous-jacents et le groupe serait ainsi en bonne position pour comprendre les implications de ces découvertes.

### **Recherche de résonances lourdes dans le canal di-lepton**

Dans le précédent rapport d'activité, nous avons décrit les résultats obtenus avec les données enregistrées en 2010, à savoir l'exclusion d'un  $Z'$  du Modèle Standard Séquentiel plus léger que 1,64 TeV. L'analyse des données enregistrées en 2011 a été effectuée durant l'année 2012. L'augmentation d'un facteur 5 de la luminosité intégrée (de  $1 \text{ fb}^{-1}$  à  $5 \text{ fb}^{-1}$ ) permettant seulement une amélioration

quantitative des résultats, nous avons amélioré la qualité scientifique de la publication (dont nous avons eu la responsabilité de l'édition) en élargissant considérablement le nombre de modèles de nouvelle physique testés. En complément du  $Z'$  (exclu pour une masse inférieure à 2,22 TeV), qui a fait l'objet d'une thèse soutenue dans le groupe en octobre 2012, une excitation de Kaluza-Klein du graviton plus légère que 2,16 TeV a été exclue pour un couplage  $k/M_{\text{Pl}} = 0,1$ . Ont également été exclus un  $Z^*$  de moins de 2,20 TeV et un boson de torsion en dessous de 2,29 TeV. Nous avons aussi donné une interprétation de nos résultats dans deux modèles de technicolor différents : le LSTC (Low Scale Technicolor) et le MWT (Minimal Walking Technicolor). Par ailleurs, nous avons effectué deux analyses dans lesquelles l'interférence entre la production de la résonance et la production de  $Z$  standard (le Drell-Yan) est prise en compte. Tout d'abord nous avons interprété les données en termes d'excitation de Kaluza-Klein du  $Z/\gamma$  dans un modèle à une dimension supplémentaire de taille environ  $1 \text{ TeV}^{-1}$ ; nous avons également utilisé un paramétrage assez général des modèles de  $Z'$  pour mettre des limites sur le couplage du  $Z'$  aux fermions en fonction de sa masse et d'un angle de mélange  $\theta$ .

### **Pour en savoir plus**

*Search for high-mass resonances decaying to di-lepton final states in pp collisions at  $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration, JHEP 1211 (2012) 138.*

### **Étude des événements di-photon de haute masse invariante**

Le canal di-photon représente une signature expérimentale relativement claire dans laquelle la recherche de nouvelles particules est prometteuse. La comparaison des données aux prédictions du Modèle Standard permet de tester des extensions de ce modèle prévoyant la présence de résonances étroites mais aussi de déviation non résonante à très haute masse. L'étude du canal di-photon permet de chercher le graviton dans le cadre de modèles prévoyant l'existence de dimensions supplémentaires tels que les modèles Randall, Sundrum (RS) et Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (ADD).

L'étude du lot complet des données enregistrées en 2011 a permis d'imposer des contraintes importantes sur les paramètres de ces deux modèles. À titre d'exemple, il a été montré que le premier graviton de Kaluza-Klein du modèle RS doit être plus massif que 2,23 TeV, améliorant d'environ 1 TeV la contrainte des expériences du TeVatron, l'accélérateur le plus puissant au monde avant le démarrage du LHC. Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs publications de la part de la collaboration ATLAS et ont également été mis en valeur dans le numéro d'octobre 2012 du *Courrier du CERN*. Le dernier résultat publié par la collaboration ATLAS est illustré sur la figure 10. Le LPSC a joué un rôle majeur dans l'obtention de ce résultat. En particulier, des membres du laboratoire ont effectué les tâches de coordination du groupe d'analyse et de documentation de l'analyse. Cette recherche a également fait l'objet d'une thèse de doctorat au laboratoire soutenue en juillet 2013.

Un des aspects les plus importants de l'analyse est l'estimation de la production d'événements di-photon par interaction forte. Une bonne connaissance de cette production est cruciale pour interpréter la possible présence dans les données de nouveaux phénomènes apportant une contribution supplémentaire. L'estimation de cette production nécessite l'utilisation d'outils de simulation tels que le généra-

teur DIPHOX. Ces outils fournissent une prédiction au second ordre de la théorie des perturbations de la production des événements di-photon. Cependant leur utilisation requiert une puissance de calcul importante. Un effort conséquent a été effectué au laboratoire pour utiliser les ressources du mésocentre grenoblois CIMENT afin d'effectuer ces calculs.

Les résultats obtenus par la collaboration ATLAS reposent sur l'étude des données récoltées en 2011. L'augmentation de l'énergie des collisions proton-proton en 2012 permet d'atteindre des valeurs de masse invariante encore plus élevées. Le LPSC poursuit donc son effort sur l'analyse des données récoltées en 2012.

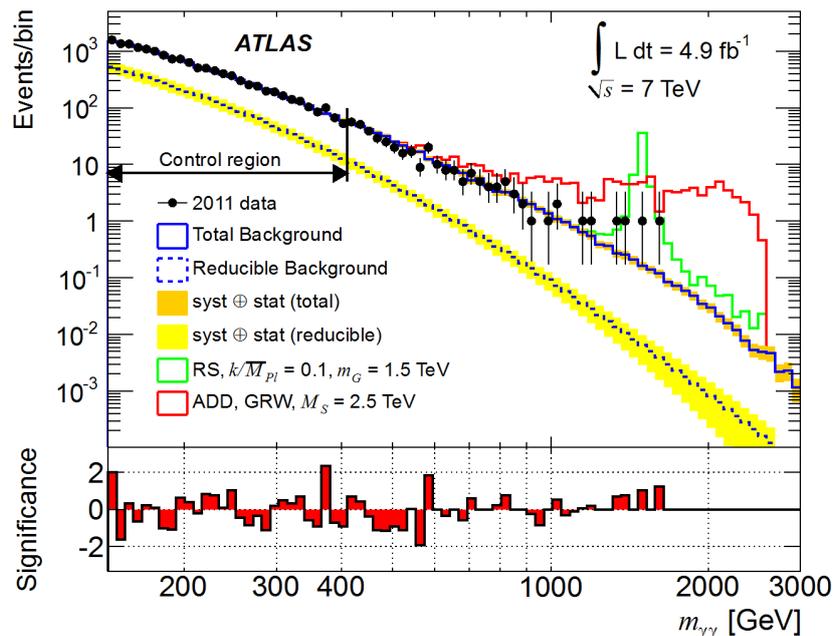


Fig. 7 : (Haut) Distribution de la masse invariante di-photon, comparée avec la somme des bruits de fond prédits par le Modèle Standard. Des exemples de signaux RS et ADD sont superposés à la prédiction du Modèle Standard. (Bas) Significane statistique par intervalle de masse invariante di-photon.

### Pour en savoir plus

*New Journal of Physics* 15 (2013) 043007.

« Recherche de nouveaux phénomènes dans les événements di-photon avec le détecteur ATLAS », Thèse de Quentin Buat, Université de Grenoble, juillet 2013.

C. Biscarat et al., article préparé pour les « Journées Scientifiques mésocentres et France Grilles 2012 », Paris - France (2012), hal-00766069.

### Recherche de résonances lourdes dans le canal top-antitop

Le physique du quark top est un domaine privilégié pour la recherche de nouvelle physique : masse élevée du quark, proche de l'échelle de brisure électrofaible, et contraintes expérimentales moindres sur ses caractéristiques. Plusieurs extensions du Modèle Standard prédisent ainsi l'existence d'une résonance top-anti-top. Le LPSC participe à l'analyse des données d'ATLAS portant sur ce canal. L'analyse utilise deux modèles de référence : un modèle de technicouleur où la résonance est celle d'un boson  $Z'$  du groupe de jauge étendu et un modèle avec dimension supplémentaire de type Randall-Sundrum dans lequel la résonance est un gluon de Kaluza-Klein. Ces deux modèles servent de référence à deux situations typiques : une résonance étroite (environ 3% de la masse) ou une résonance large (environ 15% de la masse).

L'analyse porte sur le sous-canal « semi-leptonique » où un W issu d'un top se désintègre en muon ou en électron et l'autre W se désintègre en quarks. Notre groupe s'est concentré sur l'analyse dans le régime dit « boosté » dans lequel une résonance de haute masse ( $> 1$  TeV) produit des quarks top à haute impulsion transverse. De ce fait, les produits de désintégration des quarks top sont fortement collimatés : les trois jets issus du top hadronique sont fusionnés en un seul gros jet. La première de nos tâches fut de mettre en place l'infrastructure logicielle de l'analyse et d'implémenter la sélection des données. Cette sélection consiste à exiger pour chaque événement la présence d'un unique lepton identifié, des valeurs minimales d'énergie transverse manquante et de masse transverse, l'identification d'au moins un jet issu d'un quark b. Enfin dans le cadre du régime boosté on demande la présence d'un jet de grand rayon correspondant au top hadronique. Ce jet doit avoir une grande impulsion transverse ( $> 300$  GeV) et une grande masse ( $> 100$  GeV). Le groupe a travaillé en particulier sur l'utilisation de la sous-structure du gros jet (Fig. 8) pour améliorer le rejet du bruit de fond (multijet, W+jets).

Finalement un critère essentiel pour rejeter les bruits de fond QCD produisant un tel jet est d'imposer une coupure sur une variable caractérisant la sous-structure du jet.

Les bruits de fonds principaux au signal recherché sont le processus de production top-antitop du Modèle Standard (bruit irréductible) et les processus W+jets (où les jets additionnels sont reconstruits comme un gros jet et un jet de b). Les distributions de ces bruits de fond sont obtenues par des simulations et leur normalisation par des calculs NNLO dans le premier cas et à partir des données elles-mêmes dans le second.

L'observable finale est la masse invariante du système top-antitop : la présence d'un excès dans sa distribution est recherchée grâce à des outils statistiques spécifiques.

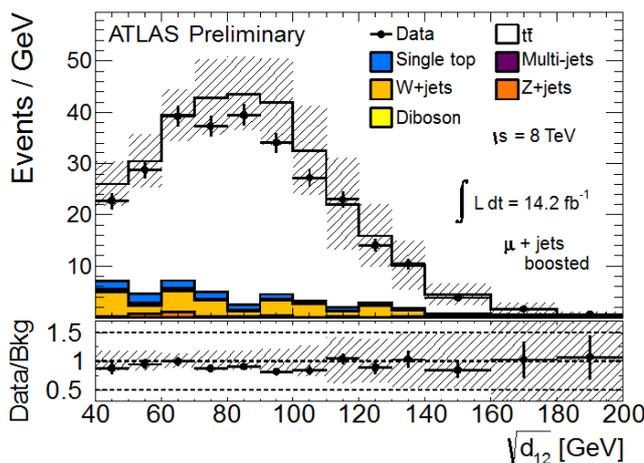


Fig. 8 : Exemple de variable de sous-structure de jet utilisée pour identifier les jets de top, pour les données et les simulations.

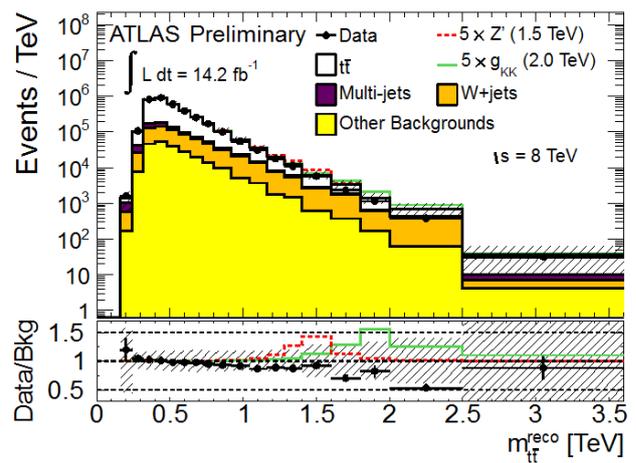


Fig. 9 : Masse invariante du système top-antitop, pour les données et les simulations.

Cette analyse a été menée d'abord avec les données de 2011 (7 TeV, luminosité de  $4,7 \text{ fb}^{-1}$ ) et a été publiée. Elle a ensuite été répétée avec les données de 2012 (8 TeV, luminosité de  $14,2 \text{ fb}^{-1}$ ) et a été rendu publique (une publication doit être soumise prochainement). Dans les deux cas, aucun excès n'a été observé

comme illustré sur la figure 10. Des limites ont donc été imposées sur les modèles de référence : le modèle de technicouleur est exclu pour des masses inférieure 1,8 TeV et celui à dimensions supplémentaires pour des masses inférieure 2 TeV. Ceci est illustré sur la figure 9.

Cette analyse a fait l'objet d'une thèse soutenue en octobre 2013 qui a permis d'approfondir l'étude de la sous-structure des jets. En examinant plusieurs variables, elle a montré que l'on peut remplacer judicieusement trois coupures de l'analyse actuelle par une seule variable. On gagne ainsi sur l'incertitude systématique tout en maintenant l'efficacité de rejet, améliorant donc la sensibilité de l'analyse. Ces développements originaux sont prometteurs pour les prochaines phases de prise de données du LHC car les objets boostés y seront encore plus fréquemment produits.

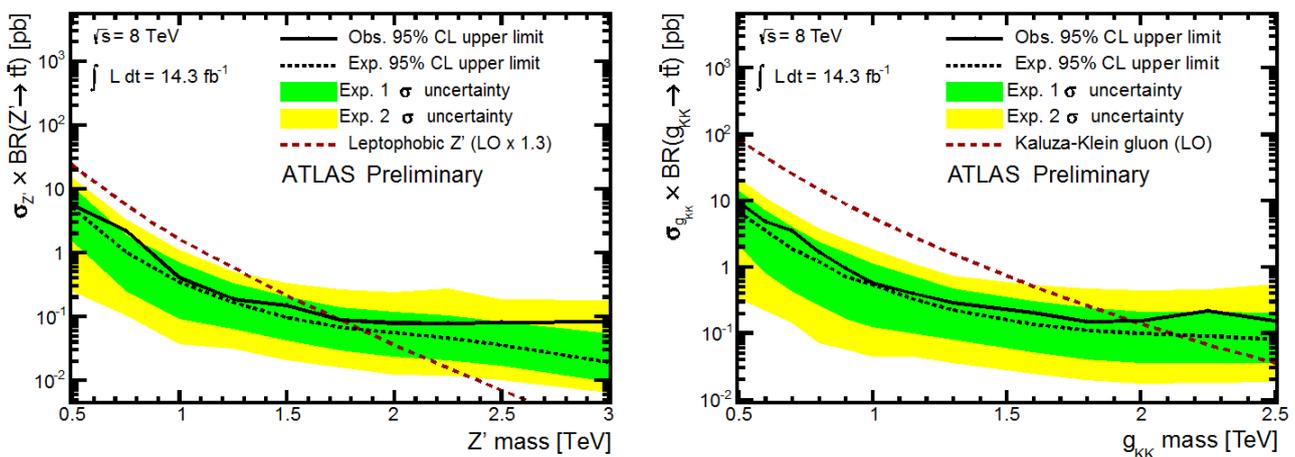


Fig. 10 : Limites observées et attendues sur la section efficace de production top-anti-top en fonction de la masse de la résonance pour deux modèles (grande unification à gauche, dimensions supplémentaires à droite).

### Pour en savoir plus

A search for  $t\bar{t}$  resonances in lepton plus jets events with ATLAS using 14/fb of proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV (ATLAS-CONF-2013-052).

A search for  $t\bar{t}$  resonances in the lepton plus jets final state with ATLAS using 4,7 fb<sup>-1</sup> of pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV (PRD 88, 012004 (2013)).

### Recherche de la supersymétrie et de la matière noire

Une théorie intéressante de physique au-delà du Modèle Standard des particules est la supersymétrie, une symétrie liant les bosons aux fermions. Cette théorie prédit de nouvelles particules, les sparticules, qui pourraient être produites au LHC et dont certaines pourraient permettre de résoudre le problème de la matière noire de l'univers. La production et la désintégration de ces particules au LHC peut mener à diverses signatures dans le détecteur; le groupe du LPSC se concentre sur deux types de recherche.

Le premier type de recherche concerne la production de squarks et/ou de gluinos (les partenaires supersymétriques des quarks et gluons) avec émission de lepton(s) dans la chaîne de désintégration. Cette analyse sélectionne les événements comprenant un ou des leptons, des jets et une grande énergie transverse manquante (MET). La présence d'au moins un lepton permet d'utiliser un critère de déclenchement différent et des coupures moins strictes sur les jets par rapport aux analyses sans lepton, ce qui permet de sonder un espace des para-

mètres différent et d'avoir un bruit de fond QCD réduit par rapport aux analyses jets + MET. L'analyse combine de nombreuses régions de signal différant par le nombre de jets et/ou de leptons requis, par les coupures sur la MET, sur l'impulsion des jets ou des leptons, etc. Cette combinaison permet d'explorer un vaste espace de paramètres (production de squarks ou de gluinos, différentes masses des squarks et des gluinos, spectres de sparticules plus ou moins comprimés...).

Le deuxième type de recherche s'intéresse à la production de particules de matière noire au LHC. Afin de détecter ces particules qui n'interagissent que faiblement, l'analyse s'appuie sur la présence d'un photon énergétique qui serait émis par les quarks impliqués dans les collisions produisant ces particules. Le signal recherché est donc de type monophoton, c'est-à-dire des événements pour lesquels on ne trouve qu'un photon énergétique accompagné d'une grande MET. Cette analyse peut aussi être utilisée pour rechercher d'autres modèles de physique au-delà du Modèle Standard. En supersymétrie, elle permet par exemple de rechercher la production de squarks si le spectre en masse des sparticules est très comprimé, c'est-à-dire si la différence de masse entre le squark et la sparticule la plus légère dans laquelle il se désintègre est très faible. Ce scénario n'est pas contraint par les analyses de type (lepton) + jets + MET car les produits de désintégration sont trop peu énergétiques pour être identifiés. Les résultats peuvent aussi être interprétés dans le cadre d'une théorie stipulant la présence de dimensions supplémentaires: les particules non-détectées pourraient alors être des gravitons.

Le groupe du LPSC est en charge de l'édition de ces deux analyses pour les données accumulées en 2012. Les responsabilités concernent la coordination des groupes de travail, l'écriture des publications et le suivi des résultats à travers les différents processus d'évaluation par des pairs (internes ou externes à ATLAS).

En 2012/2013, le groupe du LPSC a également été en charge des logiciels pour le groupe de supersymétrie d'ATLAS, ce qui implique la coordination du développement et de la maintenance du code servant à mettre en forme les données et les Monte Carlo pour toutes les analyses du groupe de supersymétrie.

Finalement, le groupe est aussi impliqué dans le projet ANR DMAstroLHC, la nature de la matière noire: des astroparticules au LHC. Ce projet est une collaboration entre diverses expériences et les groupes de théories du LAPP, du LAPTh et du LPSC visant à mieux cerner la nature de la matière noire à travers une approche multi-disciplinaire.

### **Pour en savoir plus**

*Search for squarks and gluinos in events with isolated leptons, jets and missing transverse momentum at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS detector, Collaboration ATLAS, <http://cds.cern.ch/record/1557779> (2012).*

*Search for supersymmetry at  $\sqrt{s}=8$  TeV in final states with jets, missing transverse momentum and one isolated lepton, Collaboration ATLAS, <https://cdsweb.cern.ch/record/1472673> (2013).*

## Le projet ILC

J.-Y. Hostachy

D. Grondin, Y. Carcagno, G. Freche, J. Giraud, J.-C. Malacour, J. Menu, 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 1000 GeV. The LPSC-Grenoble is involved in the R&D activities for the International Large Detector (ILD) and in particular in the electromagnetic calorimeter: design of the fastening and cooling systems, design of the mechanics of the end-caps and test of the prototype.*

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 les événements produits 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.

La découverte récente du boson de Higgs au LHC et la proposition du Japon de construire l'ILC sur son territoire dans les années à venir, a ravivé l'entrain de la communauté scientifique engagée dans ce projet. Néanmoins les restrictions budgétaires ont limité ou retardé nos travaux. Les études R&D en micro-électronique (voir rapport d'activité du LPSC des années 2011 et 2012) ont été temporairement arrêtées et les tests « de physique » sous faisceau du module EUDET ont été reportés à une date ultérieure.

Dans ce cadre, notre contribution a été essentiellement orientée sur des activités de Recherche et de Développement en mécanique, en accord avec l'historique et le savoir faire du groupe en matière de calorimétrie électromagnétique.

Nous sommes membre de la collaboration internationale CALICE (CALorimeter for the LInear Collider Experiment) qui regroupe 57 instituts de 17 pays différents provenant de quatre continents : Afrique, Amérique, Asie et Europe.

### **Mécanique: travaux de R&D**

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

#### **Architecture générale des bouchons du calorimètre électromagnétique: dessins avancés et simulations numériques.**

La masse du tungstène dans chaque bouchon du calorimètre est d'environ 16 tonnes. Des travaux de simulation numérique ont été entrepris afin d'étudier le comportement mécanique de ce sous-détecteur subdivisé en 12 modules de 3 types différents pour chaque bouchon (Fig. 1). La structure alvéolaire (tungstène plus fibres de carbone) sera remplie de plaques de tungstène prises en « sandwich » entre deux 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. La réalisation de composants comme les plaques épaisses de composite avec inserts métalliques pour l'accrochage des modules et la rigidification de la structure a permis de

tester le système d'interface composite/métallique du ECAL. Une nouvelle architecture qui permettrait d'éviter certaines zones mortes 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. Après la réalisation d'une première cellule de composite longue, la fabrication d'une première couche de trois cellules de composite a révélé en 2012 la difficulté de réalisation et la nécessité de faire évoluer le moulage de ces grandes alvéoles. Des améliorations sur les moules, les noyaux, le type et la mise en œuvre du préimprégné ont été réalisées. Le problème de contrainte en flexion des parois inter-alvéolaires ayant influé sur la modification de l'épaisseur des plis extérieurs entourant chaque module, une campagne de tests de cisaillement a été entreprise en 2012 sur des éprouvettes représentatives. Les résultats initiaux valident dans un premier temps le modèle théorique des structures collées. Ces tests vont ainsi permettre d'adapter les paramètres de simulation par éléments finis afin de simuler toute la structure. Des tests complémentaires de fatigue, sur la résine en particulier, vont être conduits afin de valider définitivement le modèle.

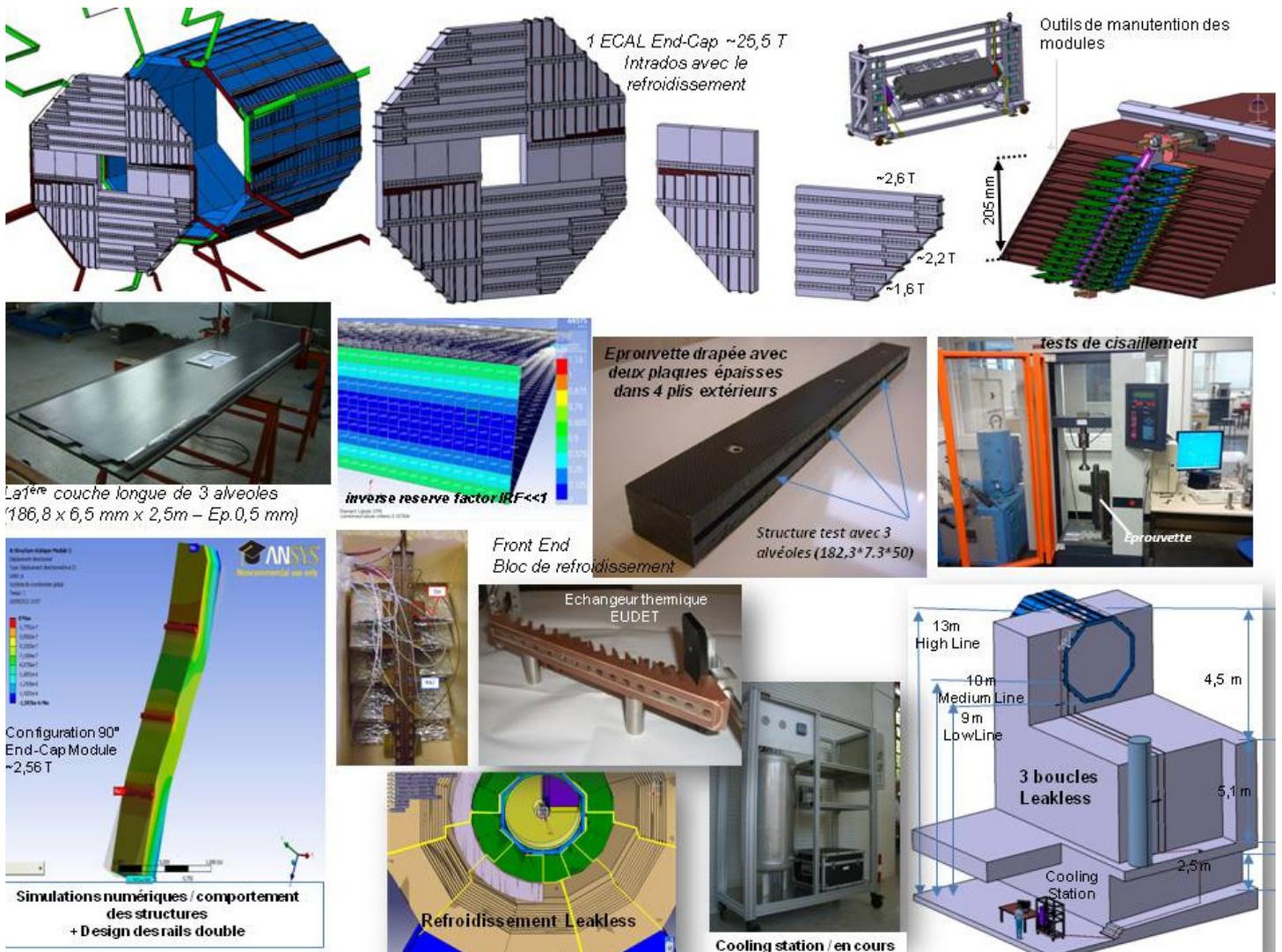


Fig. 1 : Mécanique dédiée au calorimètre électromagnétique Si-W.

### **Assemblage et positionnement du calorimètre électromagnétique**

Seulement environ 3 cm étant disponibles entre le tonneau et les bouchons des calorimètres électromagnétique et hadronique, pour le passage des fluides et commandes, le système d'accrochage constitue aussi un défi. Nous y apportons des solutions par la réalisation de prototypes de rails (composite structurel ou aluminium) ainsi que par l'optimisation des modèles numériques. Des travaux concernant l'optimisation de l'implantation des rails ont été réalisés afin de minimiser la déformation globale des différents modules. Ceci a mené à la réalisation de rails à double rangée et de faible section, permettant de sécuriser la charge sur deux rails pour la majorité des 12 modules. De même, la tenue à l'arrachement des rails et des inserts de support a été optimisée afin de réduire la matière morte à l'arrière des modules. Après la conception en 2012, un outillage lourd de manutention, transport et de positionnement des modules (1,5 à 2,6 t) est en cours de réalisation. Il permettra en outre de tester le système d'accrochage et l'intégration des premiers réseaux de refroidissement sur l'intrados des modules. L'évolution du système d'assemblage et de positionnement a été présentée à la collaboration.

### **Définition du système de thermalisation**

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 électromagnétique doit rester le plus compact possible) est évidemment source de difficultés. Après le test d'un système à caloducs, le design optimisé d'un échangeur à eau, du point de vue de l'encombrement et des résistances thermiques, a été réalisé comme élément représentatif de thermalisation locale, proche du détecteur. Pour la thermalisation globale du ECAL, un système de circulation fluide sous-atmosphérique « leakless » est en cours de réalisation après le test en grandeur réelle en 2010. L'étude détaillée de l'installation globale se termine (circuits, capteurs, actionneurs) et l'intégration du réseau de canalisations ainsi que la centrale de refroidissement sont en cours de réalisation. Ce système de test composé de trois lignes leakless est représentatif des trois types de cheminement réels spécifiques (9 m, 10 m et 13 m) par lequel serait refroidi le détecteur, en intégrant les pertes de charge dues notamment à la traversée des autres détecteurs.

### **Démonstrateur**

Un premier prototype appelé « demonstrator » (1,30 m de long, trois couches alvéolaires) a été réalisé par la collaboration. Le SERM du LPSC 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 prototype de refroidissement conçu au LPSC 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 a été réalisé. Comme pour le démonstrateur, le SERM a pris activement part à sa construction (« couvercles » interne et externe, système d'accrochage). La nouvelle version optimisée de l'échangeur thermique Grenoblois a

été réalisée et équipera le prototype. Les tests du système de refroidissement connecté avec une colonne « chargée » thermiquement du démonstrateur se dérouleront dans le futur.

### **Le projet AIDA**

Ce projet, répondant à l'appel FP7-INFRASTRUCTURES-2010-14 de la Commission Européenne, a pour but de fournir un « design » de calorimètre électromagnétique proche de celui proposé pour l'ILC. Il nécessite la réalisation de prototypes validant les différentes technologies utilisées. Pour la partie mécanique, le SERM développe le système opérationnel de refroidissement devant assurer une bonne thermalisation de l'électronique embarquée; cela implique la construction de la centrale de refroidissement pour le prototype de boucle sous-atmosphérique. Le SERM a également développé le système optimisé d'accrochage des modules par rails.