

RAPPORT D'ACTIVITÉ
2013 - 2018



Laboratoire d'Anecy de Physique des Particules

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
FAITS MARQUANTS	8
PRIX & DISTINCTIONS	11
FOCUS : LES ONDES GRAVITATIONNELLES	12
LES THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES	18
MODÈLE STANDARD ET NOUVELLE PHYSIQUE	18
ATLAS	19
LHCb	30
FLC	39
PHYSIQUE DES NEUTRINOS	46
SUPERNEMO	47
STEREO	53
OPÉRA	60
WA105 / DUNE	66
ASTROPARTICULES ET COSMOLOGIE	72
AMS	73
H.E.S.S. / CTA	80
LSST / DESC	94
VIRGO	100

INSTRUMENTATION & INNOVATION	110
ACCÉLÉRATEURS DES PARTICULES & TECHNOLOGIES ASSOCIÉES	110
FLC R&D	111
FCC	119
CALCUL SCIENTIFIQUE & DONNÉES	124
GEANT 4 - ASTERICS - CALCUL HAUTE PERFORMANCE - DEEP LEARNING - BIG DATA	125
PLATEFORME MUST	130
ORGANISATION, FONCTIONNEMENT, MOYENS	140
ORGANISATION	141
PROJETS COLLABORATIFS	145
QUALITÉ	148
HYGIÈNE & SÉCURITÉ	151
LES SERVICES	156
ÉLECTRONIQUE	157
ADMINISTRATION	163
INFORMATIQUE	168
MÉCANIQUE	176
LA DIFFUSION DU SAVOIR	182
COMMUNICATION	183
SCIENCE & SOCIÉTÉ	185
VIE SCIENTIFIQUE	189
ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR	192



AVANT-PROPOS

ÉDITO ET PROLOGUE

Cet ouvrage témoigne de l'ensemble des recherches menées au Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules (LAPP) de 2013 à 2018 mais aussi de son organisation et de l'articulation de son projet à l'horizon 2020.

Au LAPP, environ 150 personnes, chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens, personnels administratifs et visiteurs participent à des recherches ayant pour objet l'étude des constituants ultimes de la matière et de leurs interactions fondamentales ainsi que l'exploration des connexions entre l'infiniment petit et les grandes structures de l'Univers.

C'est au sein de collaborations internationales, regroupant des milliers de chercheurs, que les équipes du LAPP poursuivent des programmes expérimentaux auprès des grands accélérateurs du CERN ou des grands instruments dédiés à l'observation des signaux en provenance du cosmos.

Le programme scientifique du laboratoire s'articule selon trois thématiques principales.

1) Les mesures effectuées par les accélérateurs de particules pour l'étude du Modèle Standard et pour la recherche de nouvelles particules. Le LAPP se consacre principalement aux expériences ATLAS et LHCb auprès du collisionneur LHC (Large Hadron Collider) du CERN tant dans l'analyse des données que dans l'exploitation et la mise à niveau des détecteurs. L'élaboration d'une vision prospective de physique et le développement de détecteurs pour l'élaboration de nouveaux collisionneurs, tels que le projet de collisionneur linéaire LC (Linear Collider, ILC ou CLIC) et du futur collisionneur circulaire (FCC), complètent les travaux sur cette thématique.

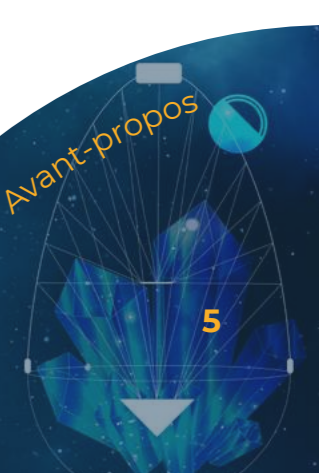
2) La physique des neutrinos, particules élémentaires, dont les propriétés restent à saisir. Le laboratoire coordonne trois expériences, STEREO, SuperNemo et DUNE, pour répondre respectivement à ces trois questions fondamentales non encore résolues : combien existe-t-il de saveurs de neutrinos ? Le neutrino est-il sa propre antiparticule ? Existe-t-il des différences de comportement entre neutrinos et antineutrinos ?

3) L'observation du cosmos. Pour déterminer sa composition et percer les mystères de notre Univers, le LAPP est impliqué dans dans plusieurs projets allant de l'imagerie de l'Univers à l'observation des rayons cosmiques et des ondes gravitationnelles. L'expérience spatiale Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) étudie ainsi l'absence d'antimatière et la nature de la matière noire. L'expérience High Energy Stereoscopic System (HESS) et l'observatoire Cherenkov Telescope Array (CTA) permettent de mieux comprendre l'origine du rayonnement cosmique et les phénomènes astrophysiques violents mais aussi de sonder la matière noire et de tester certaines lois fondamentales de la physique. L'observation des ondes gravitationnelles générées lors de cataclysmes cosmiques, comme la fusion de deux trous noirs ou d'étoiles à neutrons, participent à l'investigation multi-messagers du cosmos. L'observation de ces ondes grâce à l'interféromètre Virgo, instrument scientifique géant développé en partie par le LAPP, apporte d'ores et déjà une nouvelle façon de comprendre l'Univers. Cette collaboration permettra non seulement de mieux appréhender le phénomène de gravité mais contribuera également à répondre aux questions fondamentales de cosmologie. Ces dernières sont à l'origine de l'implication du LAPP dans le projet de Large Synoptic Survey Telescope (LSST), qui vise à déterminer la nature de l'énergie noire.

Entre nouveaux projets, réalisations techniques d'envergure, résultats scientifiques importants ou encore événements, prix et distinctions, la période 2013-2018 a été particulièrement riche. Deux prix Nobel de physique ont notamment récompensé la découverte en 2013 du boson de Higgs, la clé de voûte du modèle standard de physique des particules, et les premières détections en 2017 de signaux d'ondes gravitationnelles. Des résultats majeurs auxquels femmes et hommes du LAPP ont largement participé. C'est par sa contribution à l'expérience ATLAS que le laboratoire a eu une implication majeure dans la découverte du boson de Higgs. Isabelle Wingerter-Seez qui a joué un rôle crucial dans la conception, la construction et le fonctionnement du calorimètre à argon liquide de l'expérience ATLAS du LHC s'est ainsi vu décerner la médaille d'argent du CNRS en 2013 et l'insigne de Chevalier de la Légion d'Honneur en 2014. Cette découverte a ouvert la voie aux études du boson de Higgs et à de plus amples recherches de Nouvelle Physique à des énergies et à une luminosité du LHC de plus en plus importantes. Un programme intense de mise à niveau du détecteur de traces et du calorimètre électromagnétique a également été mis en place.

Le LAPP a par ailleurs été récompensé pour ses vingt-sept ans d'engagement dans la conception et la réalisation de composantes majeures de l'interféromètre Virgo mais aussi dans son exploitation et dans l'interprétation des mesures. Les développements apportés dans le cadre d'Advanced Virgo plus ont renouvelé cette prise de responsabilités parmi les plus importantes au niveau international et de premier plan au niveau national. La médaille d'argent du CNRS, qui récompense en 2017 Frédérique Marion, témoigne de la contribution du LAPP à la découverte des ondes gravitationnelles et au début de l'astronomie d'onde gravitationnelle.

Une excellence en recherche confirmée en 2012 par l'attribution du laboratoire d'excellence (LabEx) ENIGMASS « l'énigme de la masse ». ENIGMASS associe quatre laboratoires, le LAPP (Annecy), le LAPTh (Annecy), le LPSC (Grenoble) et le LSM (Modane) et aide à consolider la collaboration en physique fondamentale dans le sillon Alpin dans le cadre de la Communauté Université Grenoble-Alpes et pour la structuration de l'Initiative d'excellence de l'Université Grenoble-Alpes. Durant ces six dernières années, le programme d'ENIGMASS s'est déroulé avec succès. ENIGMASS a apporté des ressources et a généré une impulsion primordiale, plus particulièrement pour les analyses de physique et le démarrage du projet de développement du détecteur de traces d'ATLAS. Par ailleurs, le programme neutrino au sein de notre laboratoire a pris forme et s'est articulé grâce au soutien spécifique du LabEx. En 2018, ces quatre laboratoires ont proposé un nouveau projet scientifique pour le renouvellement d'ENIGMASS, afin de renforcer les liens entre eux et en vue de fédérer la recherche régionale en physique.



AVANT-PROPOS

SUITE

Les engagements d'ampleur dans la construction de nouvelles infrastructures de recherche ainsi que les avancées importantes et les concepts innovants développés au LAPP sont notamment le fruit des capacités et des savoir-faire des services techniques de notre laboratoire en particulier en mécanique, mécatronique, informatique et microélectronique. Ces services constituent autant d'avantages pour la structuration d'actions transverses autour de l'instrumentation et de l'innovation dédiées aux études de nouvelles solutions techniques pour les accélérateurs du futur mais aussi pour répondre aux défis du calcul scientifique. Le laboratoire valorise son savoir-faire par des actions interdisciplinaires au sein de l'université, par des accords de collaboration avec le monde industriel et par des projets d'envergure financés par la commission européenne dans le cadre du programme H2020, tels que ASTERICS et ESCAPE. Le LAPP est engagé dans le domaine du numérique et est devenu une référence dans le domaine du stockage et de l'analyse des données scientifiques. A travers son centre de calcul et de stockage de données MUST, au cœur de la grille de calcul européenne, et également grâce à des développements de logiciels d'intelligence artificielle, le LAPP répond à de multiples besoins autour du calcul et du stockage scientifiques aussi bien en interne que dans le cadre de collaborations internationales. Labellisée plateforme de recherche par le CNRS, MUST s'ouvre également aux entreprises en coopération avec la Fondation de l'Université Savoie Mont-Blanc. L'attribution de la médaille de cristal 2017 du CNRS à Nadine Neyroud, à l'origine de la concrétisation de MUST, salue la contribution remarquable de cette plateforme à la gestion à grande échelle du calcul et du stockage de données.

Depuis toujours, le LAPP est fortement impliqué dans la diffusion de la culture scientifique auprès du grand public et des scolaires. Pendant la période 2013-2018, en collaboration avec l'Université Savoie Mont-Blanc et l'Université Grenoble Alpes, le LAPP a également développé différentes actions en faveur de l'enseignement supérieur : implication dans l'organisation de formations et des écoles d'été, encadrement de nombreux doctorants et stagiaires, accueil d'élèves du secondaire et initiation à nos thématiques de recherche.

2016 a été l'année du quarantième anniversaire du LAPP. L'occasion pour tout le personnel de l'unité de s'investir pleinement pour enrichir la ponctuelle Fête de la Science d'une cérémonie officielle d'anniversaire et portes ouvertes. Cette célébration a permis au LAPP d'accueillir près de 2500 visiteurs. Un succès inédit qui témoigne de l'importance du laboratoire dans le bassin annécien tant que de sa position notoire dans le tissu socio-économique local et départemental.

Le LAPP entretient en outre des liens étroits avec l'Agence économique départementale de la Haute-Savoie et la Fondation de l'Université Savoie Mont-Blanc et est partenaire de nombreuses industries locales pour la réalisation des expériences. Il entretient également des partenariats avec les collectivités locales (Grand Annecy, Département de la Haute-Savoie, Région Auvergne-Rhône-Alpes) dans le cadre de l'innovation, de la recherche et de la diffusion de la culture scientifique. Dans ce contexte, les collectivités ont notamment soutenu en 2017 le projet de réalisation de l'Espace Découvertes du LAPP. Ce lieu de visite et d'échanges avec le personnel du laboratoire, est destiné au grand public, aux scolaires et aux délégations diverses.

En conclusion durant ces six dernières années, le LAPP a poursuivi son programme de recherche autour des questions fondamentales de physique des particules, d'astroparticules et de cosmologie. C'est grâce à l'implication et aux compétences de l'ensemble des femmes et des hommes du LAPP, qu'il se confirme et rayonne en tant qu'acteur majeur de la recherche scientifique expérimentale sur la scène internationale, en tant qu'unité de prestige du CNRS au niveau national ainsi qu'institution de référence au niveau régional et local.

Je tiens à les remercier toutes et tous.

Giovanni Lamanna
Directeur du LAPP



FAITS MARQUANTS

- **Dépôt du brevet de capteur sismique LAVISTA**
L'invention concerne un capteur sismique pour ondes sismiques de fréquences comprises entre 0,05 Hz et 500 Hz comprenant une masse, au moins un élément de suspension (16A, 16B) de la masse relié à un corps de capteur et un dispositif de mesure du déplacement de la masse par rapport au corps de capteur, l'ensemble formé par la masse et l'élément de suspension ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz.
- **Première contribution à un détecteur silicium : Détecteur Pixel IBL de l'expérience Atlas**
Lors de l'arrêt du LHC (2013-2014), la collaboration ATLAS a installé une nouvelle couche de détecteur Pixel, appelée IBL, pour améliorer ses performances dans l'identification des jets 'beau'. A cette occasion, le LAPP a eu la responsabilité de construire des services électriques et de refroidissement compacts pour ce détecteur et de les y intégrer. Depuis lors, ils remplissent leur tâche avec succès.
- **Un trio extrêmement puissant dans le Grand Nuage de Magellan**
La collaboration H.E.S.S. a publié dans la revue Science la découverte de l'émission de rayons gamma depuis le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine satellite de la Voie lactée. Cette émission, identifiée pour la première fois dans une autre galaxie, provient de trois objets d'origine stellaire : une nébuleuse à vent de pulsar, un vestige de supernova, ainsi qu'une "superbulle".
- **Financement du projet ASTERICS par la commission européenne (15M€)**
La Commission européenne a signé un accord de financement de 15 millions d'euros pour le projet Astronomy ESFRI and Research Infrastructure Cluster (ASTERICS) dont le CNRS est un acteur majeur. Ce soutien permet aux astronomes et astrophysiciens européens de relever le défi du big data. Il s'agit de traiter et stocker des masses de données de plus en plus importantes issues des expériences et de les rendre publiques et exploitables par le plus grand nombre.
- **Démarrage du LHC à la plus haute énergie jamais atteinte (13 TeV)**
Avec 400 milliards de collisions à une énergie de 13 Tera-electronvolt, 2015 a été une année record pour le LHC. L'expérience ATLAS, installée autour d'un des points de collision de protons, a sélectionné et enregistré 10 millions de ces collisions.
- **Mesure des propriétés du boson de Higgs par ATLAS et CMS**
En septembre, les deux collaborations ont présenté pour la première fois des mesures combinées de nombreuses propriétés du boson de Higgs.

2013

2014

2015



2016



2017

- **OPERA : découverte de l'apparition de neutrinos tau dans un faisceau de neutrinos mu**
L'expérience OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) au laboratoire du Gran Sasso, rattaché à l'Institut national italien de physique nucléaire (INFN), en Italie, a détecté la cinquième occurrence d'un neutrino tauique dans le faisceau de neutrinos muoniques produit au CERN. Cela signifie qu'une particule qui a quitté le CERN sous la forme d'un neutrino muonique est arrivée sous la forme d'un neutrino tauique au laboratoire du Gran Sasso, après avoir subi une « oscillation » durant son voyage de 730 kilomètres.
- **Les ondes gravitationnelles détectées 100 ans après la prédiction d'Einstein**
Les collaborations LIGO et Virgo ont annoncé l'observation d'ondes gravitationnelles provenant d'une collision de deux trous noirs situés à 1,3 milliards d'années-lumière.
- **Une source de rayonnement cosmique d'énergie inégalée découverte au centre de notre Galaxie**
En Namibie, les télescopes de l'expérience H.E.S.S. à laquelle contribue le LAPP, détectent indirectement le rayonnement cosmique depuis plus de dix ans et ont dressé une cartographie, en rayons gammas de très haute énergie, des régions centrales de notre Galaxie.
- **Le LAPP rejoint Large Synoptic Survey Telescope (LSST) au Chili**
Dix unités de l'IN2P3 dont le LAPP participent à l'expérience LSST, un télescope en cours de construction qui permet, depuis le Chili, de réaliser le relevé du ciel le plus rapide, le plus profond et le plus vaste jamais entrepris.
- **Le LAPP fête ses 40 ans**
Afin de célébrer ces 40 années de recherches et de découvertes, le laboratoire, accompagné du LAPTh, a ouvert ses portes à plus de 2500 visiteurs lors de la Fête de la Science !
- **Démarrage de l'expérience STEREO**
En novembre, l'expérience STEREO est entrée en phase de prise de données, à la recherche d'un quatrième neutrino !
- **Première lumière et premières traces observées par WA105 au CERN**
Le détecteur prototype WA105 a enregistré ses premières traces de particules issues de rayonnement cosmique, un pas important vers le futur détecteur de neutrinos géant DUNE !
- **Publication des flux d'électrons et de positons par AMS**
L'expérience AMS installée sur la station spatiale en orbite autour de la Terre a publié une mesure phare pour le rayonnement cosmique. L'expérience montre qu'un excès de positons est détecté à haute énergie. Cet excès pourrait être expliqué par la matière noire, mais l'origine la plus probable reste les pulsars proches.
- **Le LAPP au sein d'un projet sélectionné par la commission européenne**
Le projet XDC (eXtreme DataCloud), piloté au CNRS par l'IN2P3, a été sélectionné avec succès en juillet par la Commission Européenne (Horizon 2020).

FAITS MARQUANTS

SUITE

- **Première détection d'ondes gravitationnelles avec Advanced Virgo**
LIGO et Virgo ont annoncé l'observation d'ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux trous noirs. Pour la première fois, cette observation a été faite par trois détecteurs simultanément grâce au démarrage de l'instrument Advanced Virgo, qui s'est joint aux détecteurs LIGO le 1er août. Cette triple observation a ouvert la voie à une localisation bien plus précise des sources d'ondes gravitationnelles dans le ciel.
- **Un nouveau record atteint par le LHC !**
Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) a délivré au total une luminosité intégrée de 100 fb⁻¹ (ce qui correspond à une grande quantité de données délivrées) aux expériences généralistes ATLAS et CMS.
- **Le plus grand catalogue de sources de rayons gamma publié par H.E.S.S.**
La collaboration internationale H.E.S.S., à laquelle contribuent le CNRS et le CEA, a publié le bilan de quinze années d'observations en rayons gamma de la Voie Lactée. Ses télescopes installés en Namibie ont permis d'étudier des populations de nébuleuses à vent de pulsar, des restes de supernovæ, mais aussi des micro-quasars, jamais détectés en rayons gamma.
- **Observation ttH, quand le Higgs s'accompagne de deux quarks top**
La collaboration ATLAS a annoncé avoir observé la production simultanée du boson de Higgs et de deux quarks top, appelée familièrement "production ttH" par les experts.
- **Fin de la production des feuilles sources de SuperNEMO et installation dans le détecteur au LSM**
Il s'agit là d'une étape essentielle pour le programme scientifique et technologique de la collaboration internationale SuperNEMO impliquant six laboratoires de l'IN2P3. SuperNEMO est un détecteur de 4^e génération pour l'étude de la double désintégration bêta sans neutrino installé dans le laboratoire souterrain de Modane (LSM).
- **Construction et inauguration du 1er grand télescope de CTA (LST) à La Palma**
Le projet CTA (Cherenkov Telescope Array), une très grande infrastructure de recherche (TGIR) pour la partie française (des équipes de recherche de l'IN2P3, INSU et du CEA sont engagées dans la construction de CTA), constitue le projet d'avenir du premier observatoire pour l'astronomie gamma de très haute énergie.
- **Observations de la diffusion de deux bosons vecteurs WW ou WZ**

2017
(suite)



- **Projet européen ESCAPE retenu**
Le LAPP assure pour la période 2019-2022, la coordination internationale du projet H2020 ESCAPE. Il s'agit d'un cluster d'organismes scientifique internationaux et d'entités légales en charge de projets majeurs en physique des particules et Astrophysique.
- **LHCb : détection à 40 MHz**
Première version complète du microcode générique pour la carte d'acquisition de données à 40 MHz du détecteur LHCb, dont le LAPP coordonne le développement
- **La géométrie Alpine proposée par le LAPP est retenue pour le détecteur de l'ITK d'ATLAS**
En 2012, Théodore Todorov, physicien au LAPP, a proposé un concept novateur de modules inclinés pour le remplacement du détecteur à pixels d'ATLAS. L'équipe pixels du LAPP, grâce à sa contribution majeure dans le développement des simulations de détecteurs pixels, a démontré la supériorité de ce concept par rapport à ses concurrents, et mené ainsi la collaboration ATLAS à choisir ce détecteur pour la phase à haute luminosité du LHC dont le démarrage est prévu en 2027.
- **Premiers résultats de STEREO**
L'expérience STEREO publie de nouveaux résultats basés sur la détection d'environ 65 000 neutrinos à une distance proche du réacteur de recherche de l'ILL-Grenoble. La précision améliorée permet de rejeter l'hypothèse d'un 4^{ème} neutrino dans une grande partie du domaine prédit par « l'anomalie neutrino des réacteurs ».

2018

2013

- **Médaille d'argent du CNRS décernée à Isabelle Wingerter-Seez**

2014

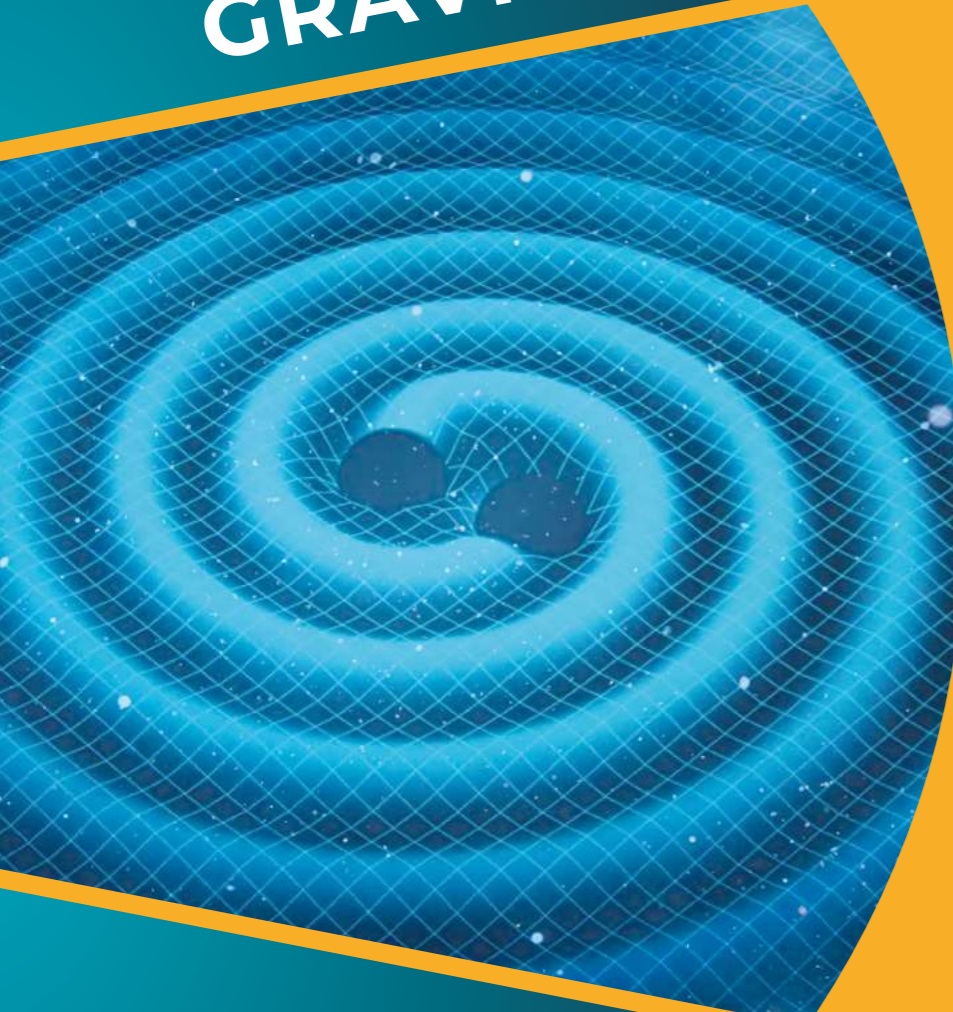
- **Légion d'honneur attribuée à Isabelle Wingerter-Seez**

2017

- **Prix Joliot-Curie décerné à Sylvie Rosier-Lees**
- **Médaille d'argent du CNRS décernée à Frédérique Marion**
- **Médaille de cristal du CNRS décernée à Nadine Neyroud Giglieux**

PRIX & DISTINCTIONS

FOCUS : LES ONDES GRAVITATIONNELLES



NAISSANCE DE L'ASTRONOMIE GRAVITATIONNELLE

Les évènements du 14 septembre 2015 et du 14 août 2017

Le 14 septembre 2015, pour la première fois, des ondes gravitationnelles ont été détectées directement en mesurant les déformations de l'espace-temps [réf. 1]. Cette détection, réalisée grâce aux deux détecteurs interférométriques de l'expérience LIGO et grâce aux analyses de données réalisées conjointement par la collaboration Virgo et la LSC, était aussi la première détection d'un système binaire de trous noirs stellaires, dont les masses étaient de plus très élevées (environ 30 fois la masse du soleil).

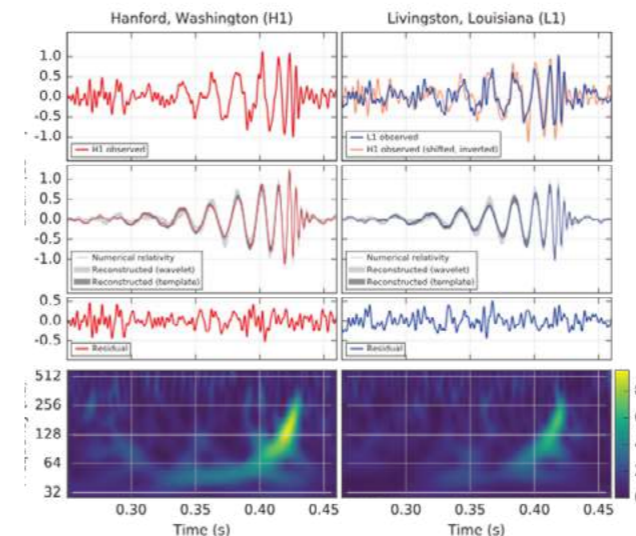


Figure 1 : Les signaux détectés par les deux interféromètres de LIGO le 14 septembre 2015

Le 14 août 2017, l'interféromètre Virgo a détecté pour la première fois une onde gravitationnelle en coïncidence avec les deux détecteurs LIGO [réf. 2]. Grâce à cette triple détection, la source a pu être localisée dans le ciel avec une précision de 60 degrés carrés (à comparer aux 1160 degrés carrés obtenus avec seulement les deux détecteurs de LIGO).

RÉSUMÉ

Une onde gravitationnelle, ou ondulation de l'espace-temps, voyage à la vitesse de la lumière et est extrêmement difficile à observer. Le 14 septembre 2015, des ondes gravitationnelles ont été détectées directement grâce aux deux détecteurs interférométriques de l'expérience LIGO et grâce aux analyses de données réalisées conjointement par la collaboration Virgo et la LSC (LIGO Scientific Collaboration).

Deux ans plus tard, le 17 août 2017, les interféromètres de LIGO et Virgo ont détecté les ondes gravitationnelles issues de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Ce phénomène par lequel deux substances identiques, mais dispersées, ont tendance à se réunir, a été observé également dans le domaine électromagnétique par plusieurs télescopes ou satellites, marquant ainsi l'aube d'une nouvelle astronomie, dite multi-messagers. L'équipe Virgo du LAPP a participé à cette aventure et aux nombreux articles scientifiques associés à ces détecteurs.

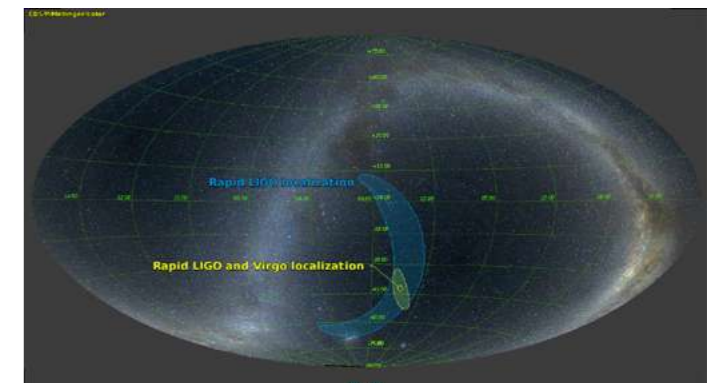


Figure 2 : Localisation de GW170814 par LIGO (en bleu) et par LIGO+Virgo (en jaune)

Cette détection et celles qui ont suivi ont été possibles grâce au travail acharné, depuis de nombreuses années, des membres des deux collaborations pour construire et faire fonctionner des interféromètres kilométriques extrêmement sensibles, capables de détecter des déformations de l'espace inférieures à 10^{-18} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ dans la bande de fréquence 20Hz-10kHz.

Les détecteurs avancés et le prises de données O1 et O2

Depuis la signature d'un accord en 2007 entre Virgo et la LSC pour réaliser toutes les analyses de données en commun, les simulations et les programmes d'analyse se sont perfectionnés, tandis que de nombreux développements techniques et de longues années de mise au point (commissioning) ont permis d'aboutir aux détecteurs Advanced Virgo et aLIGO et aux prises de données O1 (septembre 2015 – janvier 2016) et O2 (janvier 2017 – août 2017).

Le premier catalogue des sources d'ondes gravitationnelle

Ces prises de données ont offert un ensemble de onze détections dont le catalogue [réf. 3] a été rendu public le 1er décembre 2018. Chacune de ces détections, et plus particulièrement celles d'août 2017, ont bénéficié du travail réalisé par le groupe Virgo au LAPP. Ce catalogue représente un pas essentiel dans l'étude des populations de trous noirs stellaires et devrait s'enrichir considérablement avec les détections qui seront réalisées pendant la prise de données O3 prévue en 2019.

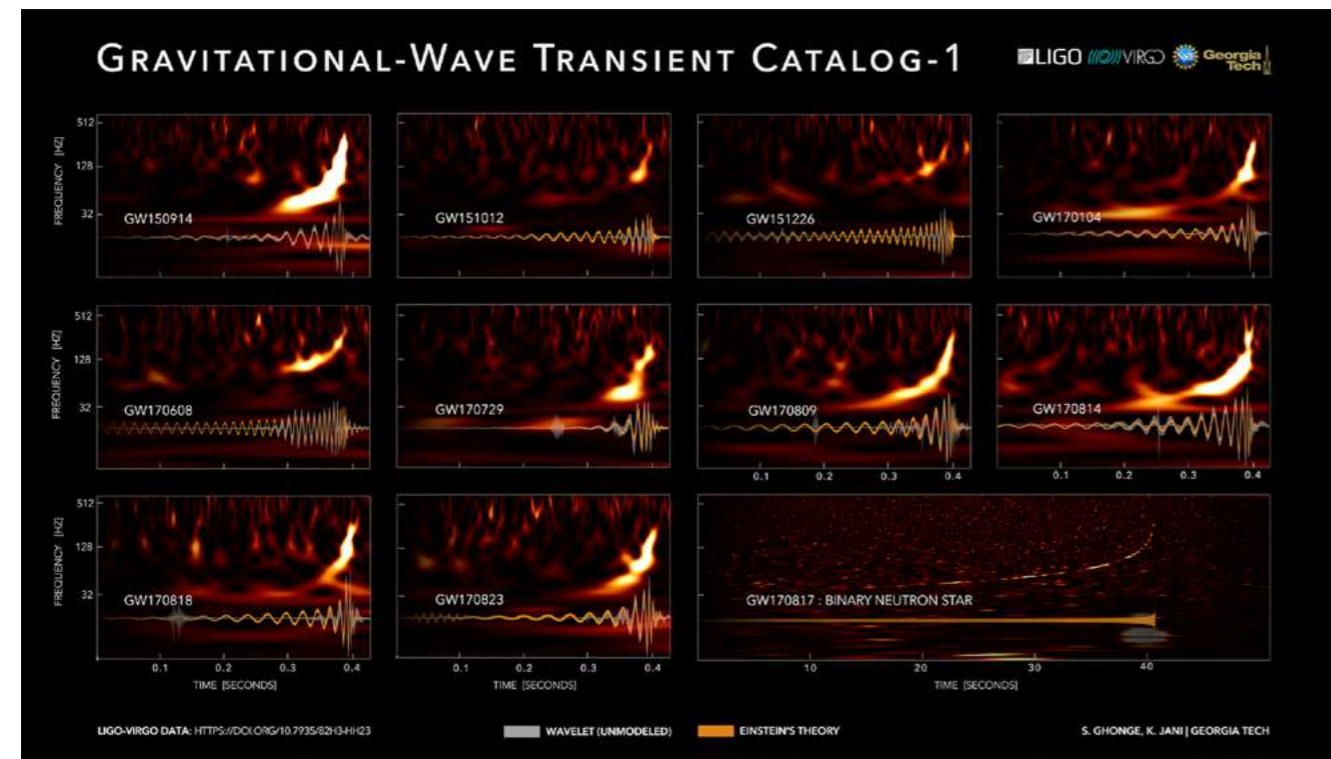


Figure 3 : Visualisation dans le plan temps-fréquence des 11 signaux d'onde gravitationnelle détectés par LIGO et Virgo pendant les prises de données O1 et O2

De nombreux résultats de physique issus de ces détections

D'autre part, des résultats de physique importants ont commencé à émerger de ces premières détections. Par exemple, la Relativité Générale a pu être testée avec succès dans des conditions de champ gravitationnel intense et de vitesse élevée d'objets astrophysiques, encore jamais observées. Autre exemple : des études sont menées sur l'évolution des étoiles massives de faible métallicité et sur la formation de couples de trous noirs de plusieurs dizaines de masses solaires. Enfin, on a pu estimer le taux de coalescences de systèmes binaires de trous noirs (entre 9.7 et 101 par an et par Gpc³) et vérifier qu'il correspondait aux prévisions des modèles les moins pessimistes.

NAISSANCE DE L'ASTRONOMIE MULTI-MESSAGERS

Bien sûr, l'astronomie en dehors du spectre visible (radioastronomie, détection des rayons X ou gamma) ou bien la détection de neutrinos lors de l'explosion de la supernova SN1987A étaient déjà une forme d'astronomie multi-messagers. Mais, avec la détection des ondes gravitationnelles provenant de la coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817) en coïncidence avec des détecteurs électromagnétiques, nous avons participé à la naissance d'une véritable nouvelle astronomie.

La détection de GW170817

Le 17 août 2017, une nouvelle détection a eu lieu (nommée GW170817) [réf. 4]. La source était cette fois un couple d'étoiles à neutrons, dont la coalescence finale a généré l'émission d'ondes électromagnétiques, qui, au fil des jours, ont couvert un large spectre, des photons gamma jusqu'aux ondes radios. L'alerte déclenchée par la détection coïncidente des ondes gravitationnelles par LIGO et Virgo et des photons gamma par le satellite Fermi a permis à plusieurs télescopes de repérer, dans les heures qui ont suivi, la contrepartie optique de GW170817. La détection de GW170817 a signé les débuts d'une nouvelle astronomie, dite multi-messagers, à laquelle le groupe Virgo du LAPP participe pleinement.

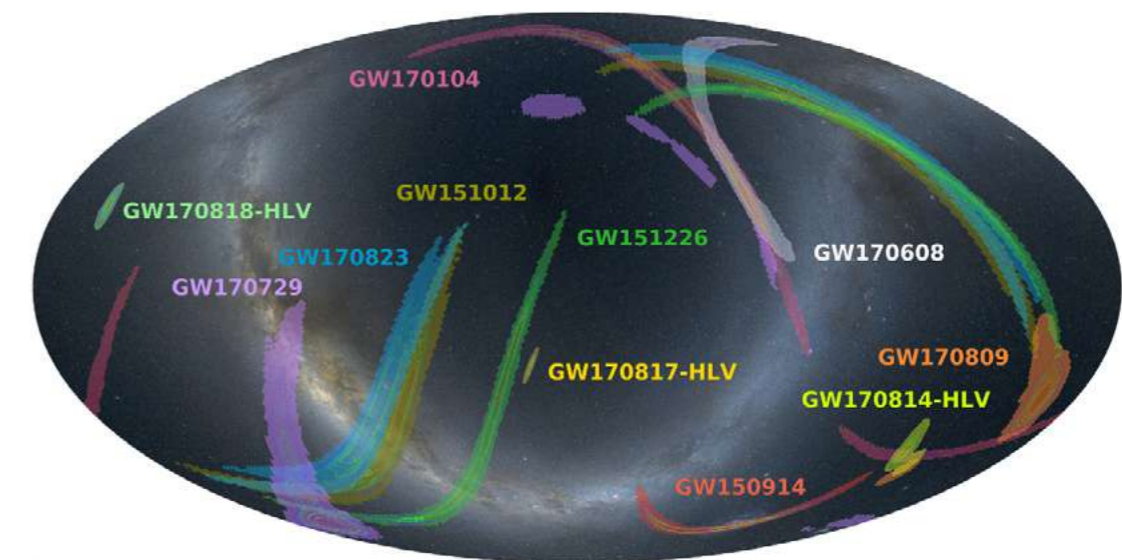
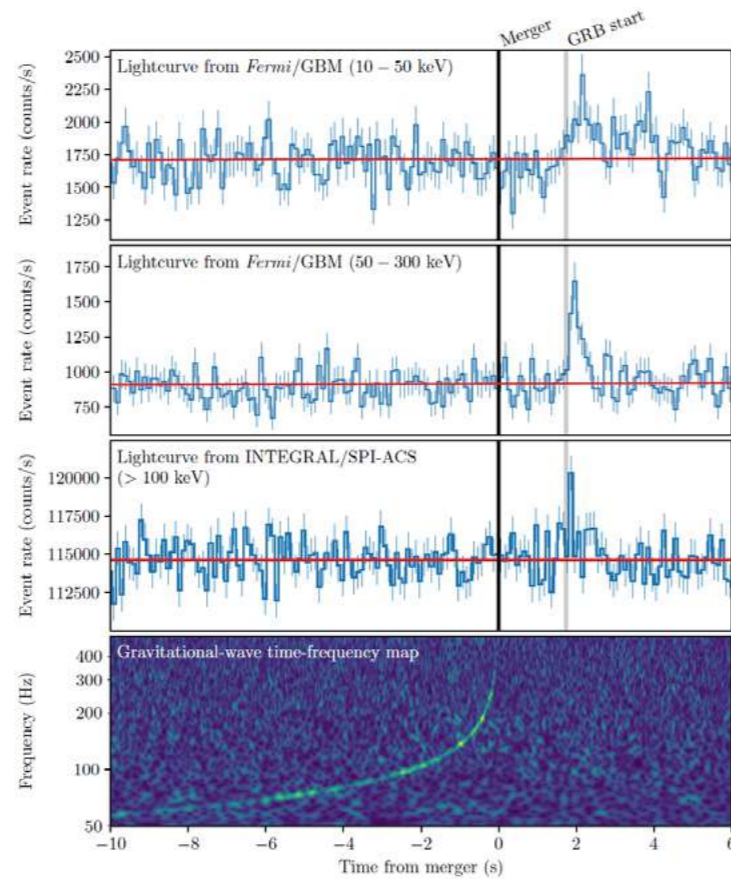


Figure 4 : estimation de la localisation des sources des 11 signaux d'onde gravitationnelle détectés par LIGO et Virgo

La physique extraite de cette détection

Le signal d'onde gravitationnelle de GW170817, visible par aLIGO et Advanced Virgo pendant près de 100 secondes, et les nombreuses observations réalisées ensuite pendant plusieurs mois dans tout le spectre électromagnétique [réf. 5] ont permis d'obtenir des résultats de physique importants. Par exemple, la confirmation que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière, la validation du caractère quadrupolaire des ondes gravitationnelles, des tests précis de la Relativité Générale, des informations supplémentaires sur l'origine des kilonovae et de certains sursaut gamma courts, l'étude de la nucléosynthèse d'éléments lourds lors de ces rencontres d'étoiles à neutrons, l'étude de la déformation des étoiles à neutrons en champ fort, une nouvelle estimation de la constante de Hubble, etc...

Figure 5 : Signal de GW170817 vu par LIGO et Virgo (visualisé dans le plan temps-fréquence) et signaux vus par les satellites Fermi et INTEGRAL, 1,7 seconde plus tard.



LES PROCHAINES ANNÉES

Une prise de données O3, qui devrait durer toute une année, commencera en 2019 et offrira, grâce aux améliorations apportées aux détecteurs aLIGO et Advanced Virgo, une riche moisson estimée à une détection par semaine (coalescence de trous noirs ou d'étoiles à neutrons), à laquelle s'ajouteront peut-être des signaux issus de supernova ou de pulsars.

D'autres améliorations de la sensibilité du détecteur Virgo (notamment l'utilisation d'états comprimés de la lumière, appelé « squeezing », ou le recyclage de la lumière en sortie de l'interféromètre) sont prévues en 2020 avant une nouvelle prise de données O4 qui viendra enrichir le catalogue de trous noirs et apportera peut-être aussi son lot de surprises.

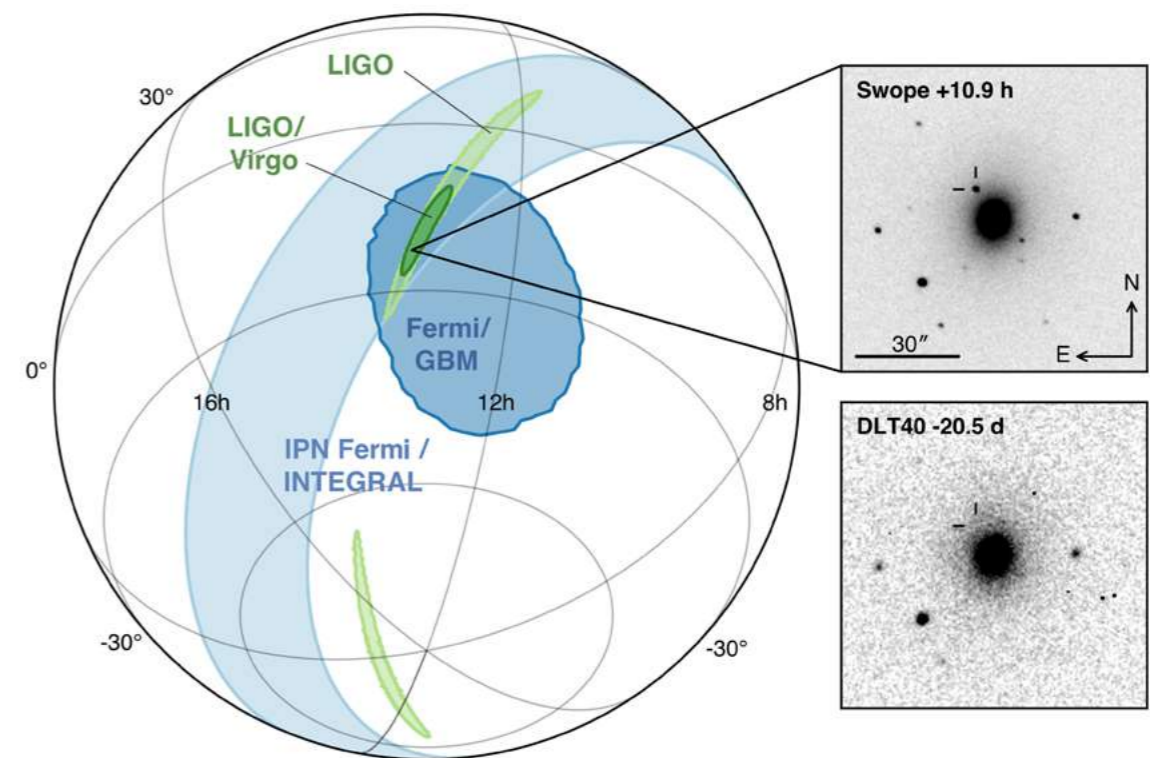


Figure 6 : Localisation de GW170817 par le satellite Fermi (bleu foncé) et par LIGO+Virgo (vert) puis localisation par les télescopes Swope et DLT40

RÉFÉRENCES

- [réf. 1] «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)
- [réf. 2] GW170814: A Three-detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, Phys. Rev. Lett. 119, 141101 (2017)
- [réf. 3] GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs (<https://arxiv.org/abs/1811.12907> or <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1800307/public>)
- [réf. 4] GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017)
- [réf. 5] Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)

LES THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES



Modèle standard et nouvelle physique

ATLAS



LA QUÊTE DE NOUVELLE PHYSIQUE

RÉSUMÉ

L'annonce, en juillet 2012, par les collaborations ATLAS et CMS, de la découverte du boson de Higgs, ingrédient fondamental du Modèle Standard introduit dans les années 1960, a couronné vingt années de travail dans lequel le groupe ATLAS du LAPP a eu une part active. Avant 2009, il a contribué aux phases de R&D et à la construction du détecteur ATLAS. Entre 2009 et 2012, il a été un acteur majeur de la découverte du boson de Higgs. Pour la période 2013-2018, le groupe a été au cœur des recherches menées pour tenter de mettre en évidence des signaux de Nouvelle Physique avec une participation à l'analyse des données et au suivi opérationnel du détecteur ATLAS de 2015 à 2018. Trois grands axes d'analyse ont été développés : les recherches directes de Nouvelle Physique, la caractérisation détaillée du boson de Higgs et l'exploration du secteur électrofaible du Modèle Standard. Enfin, le groupe a travaillé sur les prochaines améliorations du détecteur qui sont nécessaires dans les conditions à plus haute luminosité des prises de données à venir.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration ATLAS est riche de 3000 physiciens (dont 1000 étudiants) issus de 231 laboratoires et universités répartis dans 38 pays sur les cinq continents. Parmi ces laboratoires, six sont français (CPPM (Marseille), IRFU (Saclay), LAL (Orsay), LPC (Clermont-Ferrand), LPNHE (Paris), LPSC (Grenoble), en plus du LAPP. A travers ses diverses activités, le LAPP collabore avec des laboratoires étrangers dont le CERN, le Rutherford Appleton Laboratory (Royaume-Uni), les universités de Genève (Suisse), de Cracovie (Pologne), de Victoria (Canada), de Thessalonique (Grèce), de Stony Brook (USA) et de Tokyo (Japon).

Physiciens : N. Berger, M. Delmastro, L. Di Ciaccio, C. Goy, T. Guillemain, T. Hryn'ova-Berger, S. Jézéquel, I. Koletsou, N. Lorenzo Martinez, R. Lafaye, J. Levêque, E. Sauvan, T. Todorov, I. Wingerter-Seez, H. Przysiezniak (départ en octobre 2013)

Equipe technique : N. Allemandou, S. Cap, E. Chabanne, N. Chevillot, P.-Y. David, N. Dumont-Dayot, R. Gaglione, N. Massol, J.-M. Nappa, G. Perrot, J. Prast, N. Letendre, S. Villalte, G. Balik, J.-P. Baud, J.-M. Dubois, P. Delebecque, N. Geoffroy, D. Kiteze, O. Prevost, T. Rambure, F. Bellachia, T. Bouedo, J. Fragnaud, L. Gantel, S. Elles, C. Bombar, C. Jacob, A. Bazan et L. Fournier (départs en 2014), F. Chollet

Post-docs : F. Costanza, O. Kivernyk, P. Mastrandrea, A. Rummler, O. Simard, B. Smart, S. Todorova, A. Vallier, E. Yatsenko

Doctorants : Z. Barnovska, P. Barroca, A. Burger, O. Dartsji, P. Falke, S. Falke, K. Grevtsov, H. Keoshkerian, S. Raspopov, M. Schwoerer, Z. Zhang

Thématiques scientifiques
Modèle standard &
nouvelle physique

INTRODUCTION

La première période de prise de données du LHC, le run 1, avec des collisions proton-proton d'énergie dans le centre de masse de 7 à 8 TeV s'est achevée fin 2012 en ayant permis la découverte du boson de Higgs, mais sans pour autant donner d'indication de nouveaux effets physiques non prédits par le Modèle Standard (MS).

Le but essentiel de la nouvelle période de prise de données, le run 2, de 2015 à 2018, avec une énergie de collisions de 13 TeV jamais encore atteinte était donc de mettre en défaut le Modèle Standard. Durant cette période le LHC a fonctionné de façon optimale, dépassant les prévisions. L'expérience ATLAS a pu enregistrer une luminosité intégrée record de 140 fb^{-1} de données, à disposition pour les analyses de physique.

Durant cette période l'équipe ATLAS du LAPP s'est donc concentrée sur trois thèmes de mesures de physique, complémentaires pour la recherche de signaux de Nouvelle Physique : la mesure de processus rares du secteur électrofaible du Modèle Standard, dont certains restaient encore à observer, la caractérisation fine des propriétés du boson de Higgs et de ses couplages aux autres particules, et enfin la recherche de manifestations directes de nouvelles résonances.

Fort d'une grande expertise en mécanique et électronique acquise lors de la conception, de la construction et de l'installation du calorimètre électromagnétique à argon liquide d'ATLAS (1995-2005), le groupe du LAPP a participé à sa remise en route pour le redémarrage du LHC en 2015, puis au suivi constant de son bon fonctionnement entre 2015 et 2018, jusqu'à l'optimisation de la reconstruction des électrons et photons.

En particulier, les différents éléments fabriqués et installés par le groupe ont parfaitement fonctionné durant toute cette période.

Le groupe est également fortement impliqué dans les différents programmes d'améliorations du détecteur. En 2013 et 2014 il a participé à la construction et à l'installation du détecteur à pixel IBL (Insertable B-Layer) avec entre autre, la responsabilité de la distribution de CO_2

diphase. Il participe à l'amélioration de l'électronique du calorimètre, dans un premier temps pour 2021, afin de garder un taux de déclenchement constant malgré la montée en luminosité du LHC. Dans un deuxième temps, pour 2027, l'électronique complète du calorimètre devra être remplacée et le groupe travaille au développement de nouvelles solutions pour les parties étalonnage et électronique digitale de lecture du calorimètre. Enfin, le groupe participe à la conception et aux études de prototypage d'un nouveau détecteur de traces internes à pixel pour la phase à très haute luminosité du LHC (HL-LHC), en 2027. Le groupe a proposé puis participé à démontrer la faisabilité d'une géométrie innovante du détecteur avec des senseurs inclinés.

Enfin, en liens avec ces programmes de développements détecteur, le groupe est impliqué dans les études du potentiel de mesures de physique attendu au HL-LHC, et de l'impact des améliorations du détecteur ATLAS sur ces mesures futures.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Performances dans la sélection et la reconstruction des particules électrons et photons

Les engagements du groupe envers le fonctionnement optimal du système de calorimétrie LAr ont naturellement été complétés par l'optimisation et l'étude des performances de la reconstruction et de l'identification d'électrons et photons dans ATLAS.

Dans la période 2013-2014, pour les données à 7 et 8 TeV enregistrées lors du Run 1 du LHC, le groupe a focalisé ses activités sur l'étalonnage de précision de la réponse en énergie du calorimètre à Argon liquide à des électrons et photons ainsi que sur la mesure de l'efficacité de sélection des photons. Ces travaux ont été à la base de la mesure de la masse du boson de Higgs à partir de ces désintégrations en quatre leptons et en deux photons avec les données du Run 1, et un ingrédient fondamental pour la mesure des couplages du boson de Higgs dans le canal de désintégration $H \rightarrow \gamma\gamma$.

En même temps, le groupe a été impliqué dans la préparation de la prise de données pp à 13 TeV démarrée en 2015. Pour cela, de nouveaux critères de sélection et étalonnage en énergie des électrons et photons étaient nécessaires. Ainsi, entre 2015 et 2018 le groupe a participé aux mesures de l'efficacité de sélection des électrons avec les données à 13 TeV et à l'optimisation des critères de sélection des photons en fonction de leur impulsion transverse. Il a également contribué au développement d'une procédure améliorée d'étalonnage en énergie des électrons et photons prenant en compte le développement latéral des gerbes électromagnétiques ainsi qu'à l'étalonnage en énergie final des électrons et photons à partir des données en utilisant des événements $Z \rightarrow ee$.

Pour ce dernier point, l'accroissement important du niveau d'empilement des événements proton-proton dans les données à 13 TeV du Run 2 du LHC a introduit de nouvelles difficultés dans l'échantillonnage de l'énergie des électrons et photons. Avec les nouvelles corrections développées par le groupe, l'impact de l'empilement sur l'échelle d'énergie transverse a été réduit à $\pm 10 \text{ MeV}$, correspondant à une incertitude d'environ 0.075% pour les électrons et photons d'énergie transverse $E_T = 10 \text{ GeV}$, et se réduisant à environ 0.02% pour des électrons et photons de plus de haute énergie transverse [fig. 1].

Le groupe a aussi travaillé sur l'utilisation d'une sélection basée sur l'énergie d'isolation pour améliorer le système de déclenchement diphotons, afin d'augmenter l'efficacité et la réjection du bruit dans la région de basse masse. Ce système a été mis en marche au début de la prise de donnée à 13 TeV de 2017, et il s'est avéré fondamental pour la recherche de nouvelles résonances se désintégrant en deux photons avec une masse inférieure à celle du boson de Higgs.

Dans le cadre de ces activités, plusieurs membres du groupe ont occupé ou occupent des positions à responsabilité au sein de la collaboration ATLAS : coordination de l'ensemble du groupe de la collaboration ATLAS en charge des études des électrons et photons, coordinations des sous-groupes en charge plus spécifiquement de la calibration de ces particules ou de la reconstruction des photons, respectivement. Egalement, un membre est actuellement responsable de la coordination des triggers pour les électrons et photons.

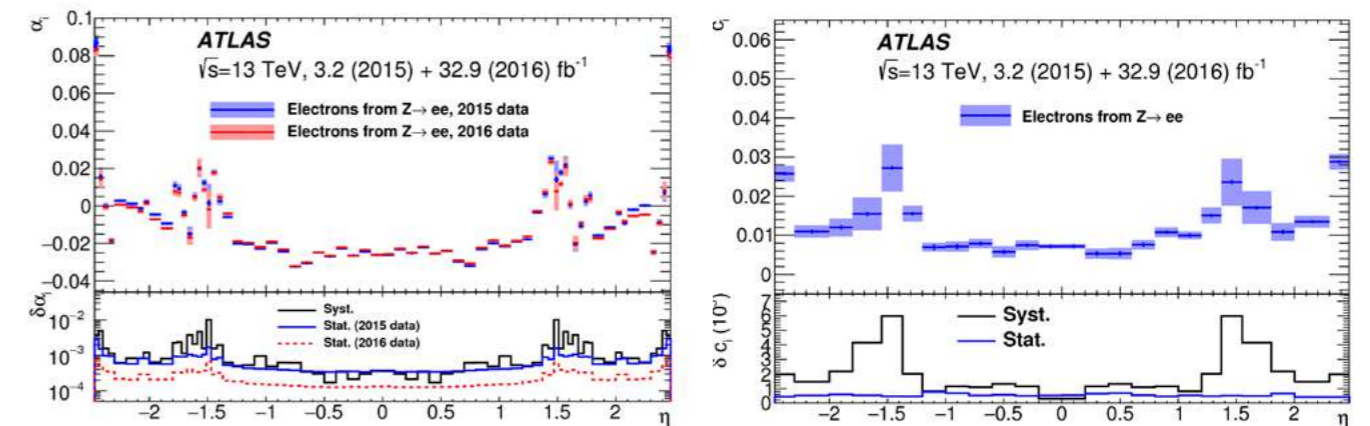


Figure 1 : Facteurs de correction déterminés à partir d'un lot d'événements $Z \rightarrow ee$ pour l'échelle absolue d'énergie (gauche) et pour la résolution en énergie (droite).

Tests du secteur électrofaible du Modèle Standard

Grâce aux mesures de la production de dibosons au LHC, d'une part la structure non-abélienne du Modèle Standard (MS) peut être testée à travers la mesure des couplages à trois et quatre bosons et d'autre part la cohérence du Modèle Standard peut être sondée à travers l'exploration directe du mécanisme de brisure de symétrie.

Compte-tenu que les sections efficaces de production de dibosons sont faibles, ces deux aspects restent encore largement inexplorés. Avec les données accumulées jusqu'à aujourd'hui au LHC, l'exploration systématique en est à ses prémices. Elle prendra encore plus de sens avec la prise de données à venir (Run 3) et avec la phase haute luminosité du LHC.

Le groupe ATLAS du LAPP, fort d'une expérience acquise avec des mesures relatives aux bosons W et Z, s'est intéressé à partir de 2013 à la production de dibosons dans le canal WZ avec des modes de désintégrations purement leptoniques. Une première analyse des données à 8 TeV a été dirigée par le groupe et publiée en 2016.

Le groupe est aussi à l'origine de la première mesure avec les données enregistrées à 13 TeV. Ces deux résultats ont permis de montrer l'importance des calculs théoriques de précision à l'ordre NNLO et au-delà [fig. 2].

Avec l'accumulation de la statistique, ces mesures ont été utilisées pour poser des limites sur les couplages anomaux à trois bosons WWZ. Enfin, avec les données cumulées jusqu'en 2016, soit 36 pb⁻¹, une première mesure de la polarisation des bosons dans l'état final a été présentée par l'équipe en 2018.

La production de deux bosons associés à deux jets donne accès plus spécifiquement aux processus de diffusion de bosons vecteurs (VBS) et ainsi aux couplages quartiques entre bosons de jauge. A la conférence internationale, ICHEP 2018 (Séoul), ATLAS a annoncé la première observation de ce type d'événements dans les canaux dibosons WZ et dibosons de même signe W[±]W[±]. Le groupe LAPP est à l'origine de la mesure dans le premier canal. Pour ce faire, un algorithme innovant, basé sur un arbre de décision boosté (BDT) a été développé pour permettre d'atteindre une signification statistique supérieure à 5σ. Les perspectives pour ce canal pour la phase HL-LHC sont aussi étudiées dans le groupe grâce à une simulation rapide. Les résultats de cette étude apparaîtront dans le document de référence pour les perspectives post-LHC.

En 2017, le LAPP a également rejoint l'effort d'analyse portant sur la mesure de VBS dans l'état final Zγ en contribuant à une première publication avec les données enregistrées à 8 TeV. En particulier des limites sur les couplages anomaux à quatre bosons ont été dérivées.

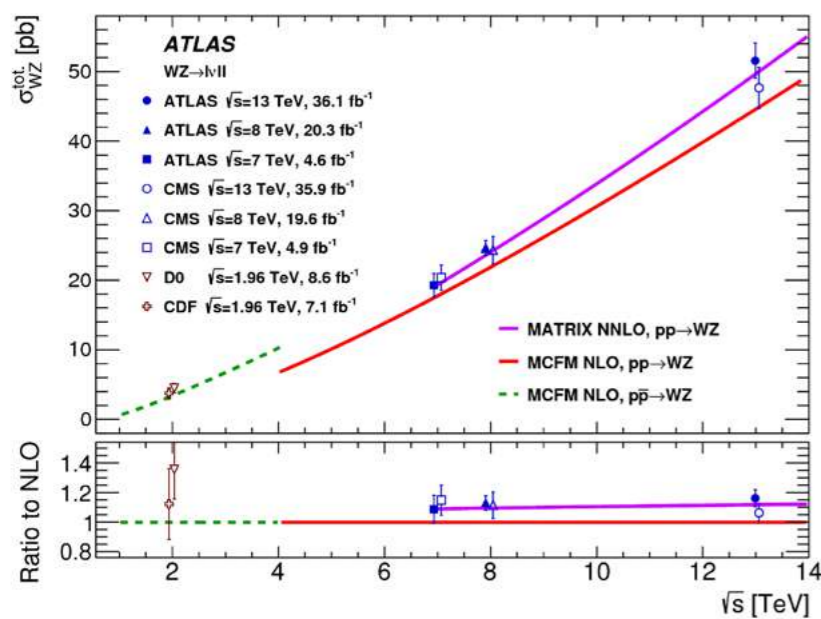


Figure 2 : Mesures de section efficaces de productions dibosons WZ, comparées aux prédictions théoriques aux ordres NLO et NNLO.

Etude du boson de Higgs

L'étude des propriétés du boson de Higgs est un des principaux objectifs de physique du LHC au Run 2, suite à sa découverte au Run 1. Suite à son implication dans l'analyse de découverte via le canal H → γγ, le groupe du LAPP s'est fortement investi dans ces études, en particulier dans la mesure de sa masse m_H, la mise en évidence des différents modes de production du boson de Higgs, et la combinaison des résultats obtenus dans différents états finaux.

Le LAPP a contribué à la mesure de m_H dans le canal H → γγ, en particulier via le travail effectué sur la calibration en énergie des photons et la détermination de la matière en amont du calorimètre. En combinaison avec le canal H → 4l, une incertitude de 240 MeV (0.2%) sur m_H a été obtenue.

La production du boson de Higgs du Modèle Standard est dominée au LHC par le processus de fusion de gluons (ggF), qui contribue à environ 87% de la production totale à une énergie de collision de 8 TeV mais souffre d'un faible rapport signal/bruit. Les productions par fusion de bosons électrofaibles (VBF, 7% du total) et par association avec un boson W ou Z (mode VH, 5% du total) présentent un rapport signal/bruit plus favorable et sont sensibles au couplage du boson de Higgs aux bosons de jauge. Enfin, la production en association avec une paire top-antitop (ttH, 1% du total) est un mode rare qui offre une sensibilité au couplage de Yukawa du quark top.

Le groupe du LAPP a contribué à l'optimisation de l'analyse pour la recherche du mode ttH dans le canal H → γγ, qui a donné lieu à l'observation de ce mode de production à l'été 2018. Du fait de l'observation du mode VH, auquel le LAPP a également contribué, et des observations antérieures des modes ggF et VBF, les principaux modes de production du boson de Higgs ont donc tous été observés, avec des taux de production en accord avec les prédictions du Modèle Standard [fig. 3].

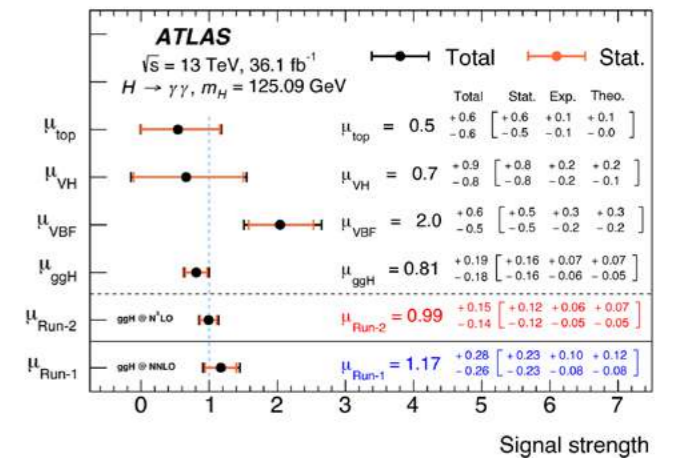


Figure 3 : Rapport aux prédictions théoriques des sections efficaces de production du boson de Higgs mesurées dans différents modes de production.

La poursuite de l'étude des propriétés du boson de Higgs passe par des mesures plus fines de la cinématique dans chaque mode de production. Ces mesures sont effectuées dans le cadre des Simplified Template Cross-Sections (STXS), une partition de l'espace de phase dans chaque mode de production optimisée pour la mesure des propriétés du boson de Higgs. Ces mesures peuvent ensuite être utilisées pour la mesure des couplages du boson de Higgs, ou pour quantifier des déviations vis-à-vis du MS dans le cadre de théories effectives (EFT). Le groupe a contribué à la mise en place de ce cadre ainsi qu'aux premières mesures dans le canal H → γγ, participant en particulier à l'analyse statistique et à la description des bruits de fond. Il a également pris part aux mesures combinées de ces propriétés en combinaison avec les autres principaux états finaux.

En parallèle, le groupe a démarré l'étude de la séparation des jets issus d'un quark et d'un gluon avec des techniques d'apprentissage automatique, qui seront utilisées pour mieux séparer dans les données les modes de production ggF et VBF, et visent la mesure des STXS avec tout le lot de données pp à 13 TeV collecté pendant le Run 2 du LHC.

Le LAPP a la responsabilité de la carte mezzanine de traitement digital, appelée LATOME (LAr Trigger prOcessing Mezzanine), qui reçoit les données digitales venant du front-end et calcule l'énergie transverse de chaque super-cellule avant transmission au système de déclenchement de niveau 1. Ces cartes mezzanines sont ensuite montées sur des cartes mères (quatre cartes LATOME par carte mères), fonctionnant dans des châssis ATCA. La figure [fig. 6] montre la carte LATOME équipée des divers composants électroniques (notamment le FPGA Arria10). Le LAPP est responsable de la totalité du projet LATOME, depuis sa conception jusqu'à la production actuellement en cours (150 cartes). Cette responsabilité couvre également les logiciels « online » associés.

Un membre du groupe a été responsable de la partie backend en 2013-2016. Un membre du groupe a été responsable d'un test complet du système effectué au CERN en 2017-2018, test qui a conduit au feu vert officiel pour la production des cartes LATOME en avril 2018. Un membre du groupe est co-responsable du firmware LATOME.

Le groupe contribue également à la préparation des améliorations pour la phase du LHC à haute luminosité (HL-LHC), où toute l'électronique de lecture du calorimètre LAr sera remplacée. Le groupe contribuera au remplacement de la partie back-end de traitement des données du LAr. Enfin, le groupe est aussi engagé pour la phase HL-LHC sur le développement de nouvelles cartes d'étalonnage, utilisées pour injecter des signaux en courant d'amplitude connue. Ce projet est effectué en collaboration avec le LAL et OMEGA, qui sont en charge de la conception de la puce ASIC. Le groupe du LAPP est responsable du dessin global de la carte (routage), puis sera responsable de la production, avec 150 cartes qui devront être produites en 2023-2024.

Le groupe a activement participé à la rédaction du Technical Design Report (TDR), pour la partie sur les cartes d'étalonnage mais également pour la partie liée aux nouvelles cartes d'électronique back-end, en s'appuyant sur l'expertise développée pour l'upgrade phase 1.

Améliorations du détecteur de traces : IBL (2014) et ITk pour HL-LHC (2014-2027)

Le projet IBL (Insertable B-Layer) a consisté à insérer une nouvelle couche de Pixel en 2014 à un plus petit rayon que le détecteur à pixels installé pour le démarrage de l'expérience. Son rôle principal est d'améliorer l'étiquetage en saveurs des jets, en particulier pour ceux initiés par des quarks b. Malgré un environnement dégradé par l'augmentation du nombre d'événements d'empilement, le taux de réjection des jets non-b a été amélioré d'un facteur 4 grâce à l'IBL pour une même efficacité de sélection des jets b.

L'équipe ATLAS a pris plusieurs responsabilités dans ce projet et les a remplies avec succès. Tout d'abord, il a eu la charge de la distribution de CO₂ diphasique depuis l'usine centrale jusqu'à chacune des 14 échelles de l'IBL. C'était la première fois qu'un tel système de distribution se faisait à grande échelle. Divers composants miniaturisés (raccord titane, isolateur céramique) ont été développés, qualifiés et installés sur les lignes de distributions de refroidissement et connectés aux échelles. Une autre ligne de développement a été la création de connecteurs électriques miniaturisés et robustes pour amener la puissance électrique sur le détecteur IBL. Pour ces deux activités, les phases de R&D et de production se sont faites en collaboration avec des industriels et d'autres laboratoires de la collaboration (CERN, LPSC, Genève, LPNHE, CPPM). L'installation de ces équipements dans la caverne s'est faite à l'été 2014. Ces composants qui sont critiques pour le bon fonctionnement du détecteur remplissent leur cahier des charges depuis leur démarrage et fonctionneront jusqu'en 2025.



Figure 6 : Carte mezzanine de traitement digital, appelée LATOME.

Une autre responsabilité a été l'intégration de la géométrie du détecteur IBL dans l'infrastructure de simulation d'ATLAS. Une description précise des éléments du détecteur est nécessaire pour minimiser les incertitudes systématiques dans l'étiquetage des jets b. Après une phase de collecte des plans de fabrication auprès des constructeurs du détecteur (support mécanique, services électriques), les éléments ont été entrés dans le software ATLAS puis validés en estimant la répartition de la quantité de matière dans le détecteur IBL à partir des déviations des particules chargées le traversant.

En 2012, le groupe a en parallèle proposé à la collaboration ATLAS un concept de détecteur à pixel totalement novateur, le détecteur « Alpin », comme candidat au remplacement du trajectographe pour la phase HL-LHC. Les échelles alpines [fig. 7] permettent d'incliner progressivement les modules de silicium le long de l'axe du faisceau pour minimiser la quantité de matière inerte traversée par les particules, et en même temps réduire le nombre de modules de silicium en couvrant un angle solide plus grand qu'un module horizontal.

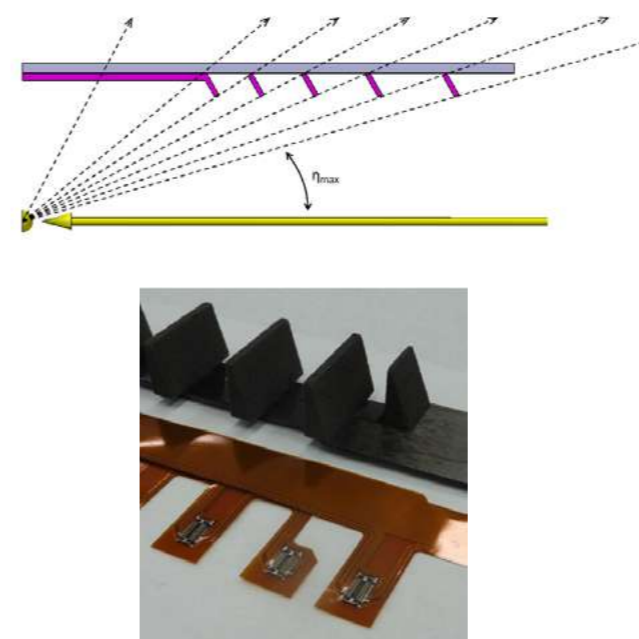
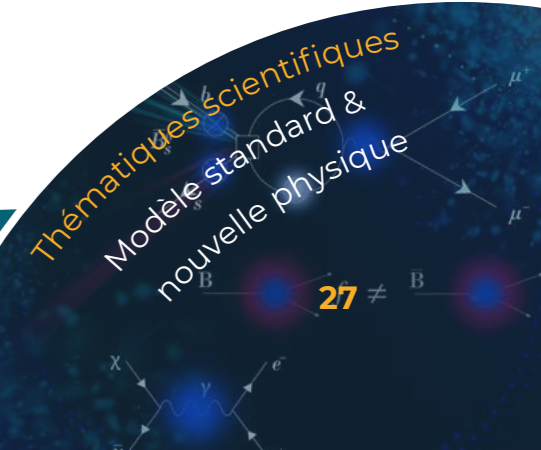


Figure 7: Les échelles alpines : illustration schématique (en haut) ; Prototype mécanique et prototype de transmission de signaux électriques (en bas).

De 2012 à 2014, le concept d'échelle Alpine a vu le jour, été développé, puis réalisé au LAPP. Cela a permis de démontrer la faisabilité du concept incliné : refroidissement des modules, structure mécanique en mousse et fibres carbone et routage des services électriques. De 2014 à 2016, le groupe a conçu un nouveau code informatique permettant d'inclure la géométrie du détecteur alpin dans la reconstruction officielle du software ATLAS, et fourni à la collaboration les outils nécessaires pour simplifier et accélérer la comparaison des performances entre de multiples géométries de détecteurs, en particulier entre plusieurs concepts de détecteurs à pixels classiques et le concept Alpin. En janvier 2017, la collaboration ATLAS a officiellement choisi de construire un détecteur pixel ITk de type incliné.

La structure du détecteur incliné a ensuite évolué pour incorporer des développements mécaniques effectués par l'Université de Genève dans le concept initial et également pour en simplifier l'assemblage. Le LAPP est aujourd'hui officiellement en charge de la conception et de la production des services électriques qui seront intégrés aux structures mécaniques. Il garde une expertise unique au sein de la collaboration pour la maintenance et le développement de la description de la géométrie du détecteur et de la matière dans Geant 4. Le groupe possède également une expertise unique en France sur l'opération des stations de refroidissement au CO₂ diphasique, la caractérisation des performances thermiques du détecteur ainsi que la modélisation de ces performances thermiques.

Le LAPP est aujourd'hui engagé officiellement auprès de l'IN2P3 et de la collaboration ATLAS pour la production des services, et sera à partir de 2022 l'un des cinq sites d'intégration du détecteur à pixel, dont la construction doit être achevée fin 2025.



PERSPECTIVES

Le groupe ATLAS du LAPP est engagé sur le long terme dans le programme du LHC et du HL-LHC avec des responsabilités en acquisition << online >> et de construction pour les améliorations du détecteur ATLAS pour le run 3 et la phase HL-LHC. En parallèle le groupe a de fortes implications dans différentes analyses de physique. Le run 3 démarrera en 2021 pour quatre ans de prise de données à des énergies dans le centre de masse de 13 à 14 TeV pour atteindre 300 fb^{-1} de luminosité intégrée enregistrée. Ensuite, un long arrêt de deux ans, de 2025 à 2027 est prévu afin de permettre l'installation des différentes mises-à-niveau prévues pour les détecteurs, avant la phase HL-LHC qui doit démarrer en 2027. Pour la période s'étendant de 2020 à 2025 le programme scientifique du groupe s'articule ainsi selon trois axes principaux : le suivi d'opération du détecteur pendant la période de prise de données, avec en particulier le démarrage du nouveau système de déclenchement du calorimètre à Argon liquide, et l'exploitation des données par les analyses de physique ; la construction au LAPP pour la phase HL-LHC des futures cartes d'électronique du calorimètre à Argon liquide et des éléments du futur trajectographe ITk ; la préparation aux analyses de physiques pour la phase HL-LHC.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 ATLAS Collaboration**
Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using 2015-2016 LHC proton-proton collision data
CERN-EP-2018-296, arXiv:1812.03848 [hep-ex], Soumise à JINST 14 (2019) P03017
- 2 ATLAS Collaboration**
Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector
Physical Review D 98 (2018) 052005
- 3 ATLAS Collaboration**
Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector
Physics Letters B 784 (2018) 173

- 4 ATLAS Collaboration**
Measurement of the Higgs boson mass in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels with $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collisions using the ATLAS detector
Physics Letters B 784 (2018) 345
- 5 ATLAS Collaboration**
Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states using 36 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector
Physical Review D 98 (2018) 052008
- 6 ATLAS Collaboration**
Measurement of $W^\pm Z$ production cross sections and gauge boson polarisation in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector
CERN-EP-2018-327, arXiv:1902.05759 [hep-ex], soumise à Eur. Phys. J. C 79 (2019) 535
- 7 ATLAS Collaboration**
Observation of electroweak $W^\pm Z$ boson pair production in association with two jets in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector
CERN-EP-2018-286, arXiv:1812.09740 [hep-ex], soumise à Phys. Lett. B 793 (2019) 469
- 8 ATLAS Collaboration**
Search for resonances in the 65 to 110 GeV diphoton invariant mass range using 80 fb^{-1} of pp collisions collected at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector
ATLAS-CONF-2018-025
- 9 ATLAS Collaboration**
Search for new phenomena in high-mass diphoton final states using 37 fb^{-1} of proton-proton collisions collected at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector
Physics Letters B 775 (2017) 105
- 10 ATLAS Collaboration**
Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS LAr Calorimeter
CERN-LHCC-2017-018, ATLAS-TDR-027
- 11 ATLAS Collaboration**
Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector
CERN-LHCC-2017-021, ATLAS-TDR-030

- 12 ATLAS Collaboration**
Measurements of $W^\pm Z$ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector and limits on anomalous gauge boson self-couplings
Physical Review D 93 (2016) 092004
- 13 ATLAS Collaboration**
Measurement of the WZ boson pair-production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS Detector
Physics Letters B 762 (2016) 1
- 14 ATLAS Collaboration**
Search for Scalar Diphoton Resonances in the Mass Range 65-600 GeV with the ATLAS Detector in pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 171801

THÈSES

- A. Burger, juillet 2018**
Measurement of Vector Boson polarisation in WZ production at the LHC with the ATLAS detector
- K. Grevtsov, juillet 2017**
Recherche de nouvelles particules dans l'état final $\gamma\gamma X$ au LHC à $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ avec l'expérience ATLAS et mesure de la masse du boson de Higgs
- Z. Zhang, décembre 2015**
Optimization of the thermo-mechanical performance of the alpine stove-based pixel detector
- Z. Barnovska, septembre 2015**
Diphoton measurements with the ATLAS detector at the LHC: search for new resonances and study of diphoton production in association with jets
- H. Keoshkerian, septembre 2014**
Mesure de la production de di-bosons WZ auprès du LHC avec l'expérience ATLAS
- M. Schwoerer, septembre 2013**
Etude des états finals diphoton dans l'expérience ATLAS au LHC : Mesure de sections efficaces différentielles, découverte d'une nouvelle résonance dans la recherche du boson de Higgs et étude de ses propriétés

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

- J. Levêque, octobre 2018**
Boson de Higgs : du simple au double

T. Guillemin, juin 2018
Higgs boson couplings: from Tevatron to LHC and beyond

N. Berger, juillet 2016
Searches for resonances decaying to two photons with the ATLAS detector at the LHC

T. Hryn'ova-Berger, juin 2016
Development of the trigger menu and search for new phenomena in the dilepton final state with the ATLAS detector at the LHC

M. Delmastro, mars 2016
From ADC counts to the Higgs boson: photons for physics measurements with the ATLAS experiment at the LHC Run 1

PRÉSENTATIONS IMPORTANTES DANS DES CONFÉRENCES

S. Todorova, mai 2017
Soft QCD
LHCP 2017, Shanghai, Chine

M. Delmastro, mars 2016
Diphoton search in ATLAS
Moriond EW 2016, La Thuile, Italie

E. Sauvan, juin 2015
Status of electroweak physics
Blois 2015, Blois, France

T. Berger-Hryn'ova, mars 2014
Searches for Heavy Resonances at the LHC
Moriond QCD 2014, La Thuile, Italie

L. Di Ciaccio, mai 2013
Boson+jet production, including heavy flavour jets - LHC+Tevatron relevant results
LHCP 2013, Barcelona, Espagne

R. Lafaye, mars 2013
Photon Production at the LHC,
Moriond QCD 2013, La Thuile, Italie

V. Lombardo, mars 2013
Di-Boson Production Cross Section at the LHC
Moriond QCD 2013, La Thuile, Italie



MESURES DE PRÉCISION DANS LE SECTEUR DE LA BEAUTÉ ET DU CHARME AU LHC

RÉSUMÉ

LHCb est une expérience au LHC dédiée à l'étude de la physique des saveurs lourdes, essentielle à la recherche indirecte de Nouvelle Physique au-delà du Modèle Standard. L'équipe du LAPP a rejoint la collaboration LHCb en 2001. Elle possède une expertise reconnue dans la calorimétrie de LHCb depuis le démarrage de l'expérience. Elle a contribué significativement à la migration en ligne de la calibration des calorimètres dans le système de déclenchement logiciel mis en place pour le démarrage des prises de données de 2015. Le groupe a été impliqué dans les développements et études pour l'identification des particules neutres et leur reconstruction. Le groupe a aussi effectué plusieurs analyses sur l'étude des diagrammes de Dalitz de désintégrations en charme ouvert ainsi que sur la spectroscopie des quarkonia. Enfin, le groupe joue un rôle moteur dans le développement du système d'acquisition innovant à 40 MHz pour l'upgrade du détecteur LHCb.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration LHCb rassemble plus de 1 250 personnes provenant de 79 instituts et universités répartis dans 18 pays dont 5 laboratoires français (LAPP (Annecy), LPC (Clermont-Ferrand), CPPM (Marseille), LAL (Orsay), LPNHE (Paris)).

Physiciens

M. Chefdeville, D. Décamp, P. Ghez, J.-F. Marchand, M.-N. Minard, B. Pietrzyk, S. T'Jampens, V. Tisserand, E. Tournefier.

Equipe technique

L. Brunetti, S. Cap, C. Drancourt, L. Journet, B. Lieunard, T. Rambure, G. Vouters, T. Yildizkaya.

Post-docs

W. Qian, Z. Xu.

Doctorants

N. Déléage, L. Beaucourt, M. Reboud.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2014

Études de la spectroscopie des quarkonia.

2015

Analyse en amplitude du diagramme de Dalitz des désintégrations $B^0 \rightarrow D^0 \pi^+ \pi^-$.

2016

Étude des désintégrations radiatives $B^0_{(s)} \rightarrow K^* \gamma$ et $B^0_{(s)} \rightarrow \phi \gamma$ avec les photons convertis.

2017

Développement des algorithmes de sélections des échantillons de particules neutres (photon et π^0) dans le système de déclenchement en ligne pour l'étude des performances d'identification.

Développement du microcode générique de la carte d'acquisition à 40 MHz de l'upgrade du détecteur LHCb.

2018

Calibration automatique en ligne des calorimètres électromagnétique et hadronique.

Étude des désintégrations $B^0_{(s)} \rightarrow D^0 K^* K^-$ et des sous-modes $B^0_{(s)} \rightarrow D^{*0} \phi$

Mise en place d'une architecture novatrice d'ingénierie logicielle avec un outil d'intégration continue pour le développement des différents microcodes de la carte d'acquisition.

INTRODUCTION

Le Grand collisionneur de hadrons du CERN, le LHC, fonctionne avec succès depuis 2009, et à très haute énergie (13 TeV) depuis 2015. LHCb est l'une des quatre expériences principales du LHC (avec ATLAS, CMS et ALICE) et est dédiée principalement à l'étude de la physique des saveurs lourdes, essentielle à la recherche indirecte de Nouvelle Physique au-delà du Modèle Standard par des mesures de précision de la violation de CP et des désintégrations rares des hadrons beaux et charmés.

L'expérience LHCb est en opération au LHC depuis décembre 2009. Depuis 2010, elle a accumulé une statistique correspondant à une luminosité intégrée d'environ 9 fb^{-1} , soit environ 3 fb^{-1} à 7 et 8 TeV au cours du run 1 (2010-2012), et 6 fb^{-1} à 13 TeV lors du run 2 (2015-2018). L'année 2018 est la dernière année avant le second long arrêt technique du LHC (2019-2020). Une mise à niveau majeure (dite de phase I) du détecteur LHCb et de son système d'acquisition sera alors entreprise pour fonctionner à une luminosité cinq fois supérieure à celle des run 1 et run 2, ceci afin d'améliorer les précisions expérimentales tout en minimisant les incertitudes systématiques pour les principales observables de ce domaine de physique. Le but est de collecter une statistique correspondant à une luminosité intégrée d'environ 50 fb^{-1} durant les run 3 (2021-2023) et run 4 (2026-2029). Pour ce faire le système d'acquisition des données aujourd'hui limité à 1 MHz par le système de déclenchement matériel sera remplacé par un système de déclenchement entièrement logiciel afin de pouvoir acquérir les données à la fréquence du LHC de 40 MHz.

La collaboration LHCb a maintenant atteint son rythme de croisière et sa pleine maturité, avec plus de 450 publications. Elle a démontré qu'elle est un acteur incontournable de la physique des particules sur collisionneur et pour la recherche de physique au-delà du Modèle Standard. Au niveau opérationnel, pour le démarrage du run 2, un nouveau schéma innovant du système de déclenchement logiciel de LHCb inclut désormais l'alignement des détecteurs et leur calibration en ligne. Cela permet d'obtenir directement des données utilisables pour les analyses en sortie du système de déclenchement, rendant la reconstruction au niveau hors ligne caduque. Ce schéma est celui qui sera utilisé dans l'upgrade phase I de LHCb.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

L'équipe du LAPP a participé fortement dans la prise de données et a conduit plusieurs analyses de physique. Elle a été très impliquée dans l'opération, la calibration et le développement d'outils d'analyse liés au calorimètre. Enfin, elle a une participation importante dans la préparation de l'upgrade phase I. Enfin, un membre du groupe coordonne la communication générale pour l'expérience LHCb (Outreach Coordinator) en contact étroit avec la direction de LHCb.

Opération du détecteur et prise de données

La prise de données dans l'expérience LHCb et la vérification de leur qualité est faite par une équipe de deux personnes (Shift Leader, Data Manager) 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 avec changement d'équipe toutes les 8 heures (shift).

Thématiques scientifiques
Modèle standard &
nouvelle physique

Pendant ces périodes et par rotations hebdomadaires, des experts pour chaque sous-détecteur (« piquets ») peuvent être appelés à tout moment. La participation des membres du groupe du LAPP à la prise de données représente une contribution très significative : sur la période des prises de données qui a eu lieu entre 2015 et 2018, les membres du groupe du LAPP ont effectué 350 shifts comme Shift Leader, Data Manager ou « piquet calorimètre ».

En ce qui concerne l'opération du détecteur LHCb et la prise de données, le groupe LHCb du LAPP est essentiellement engagé sur la partie calorimétrie en étant responsable du fonctionnement et de la maintenance des cartes de déclenchement qui permettent de sélectionner les candidats hadrons, électrons et photons de haute impulsion transverse, de l'opération des cartes d'acquisition des calorimètres, de la maintenance du système de déplacement des calorimètres, des corrections de vieillissement des calorimètres et de l'alignement en temps des calorimètres.

La période du premier long arrêt technique (2013-2014) a permis l'amélioration ou la création d'outils pour la calibration hors ligne finale des calorimètres. En particulier, une présélection directe d'événements à faible multiplicité de photons a été utilisée. La masse invariante diphoton montre ainsi un pic de masse à la masse du π^0 avec un fond combinatoire quasi nul. Cette sélection et ces événements ont été utilisés pour étudier la calibration du calorimètre électromagnétique (ECAL) en déterminant la masse et la largeur du pic de π^0 en fonction de l'énergie ou de l'énergie transverse du π^0 . Les données à faible multiplicité de photons donnent ainsi un moyen de contrôle supplémentaire du fonctionnement et de la calibration du ECAL.

À partir de 2015 et afin d'améliorer la qualité des données récoltées et donc des résultats de physique, le groupe a travaillé à l'automatisation et la mise en fonctionnement en ligne de la calibration des calorimètres électromagnétique et hadronique. Deux types de calibrations sont effectuées : une calibration absolue est réalisée par l'ajustement de la masse des diphotons sur la masse connue des π^0 pour le calorimètre

électromagnétique, et une calibration relative obtenue par comparaison entre une référence et la réponse des détecteurs à des diodes électroluminescentes. La calibration relative est réalisée en ligne de façon automatique à la fin de chaque fill (remplissage) de physique : des corrections sont appliquées sur les hautes tensions de chacun des 6016 tubes photomultiplicateurs. Elle a été mise en place en 2015 et est complètement automatique depuis 2016. La calibration absolue du calorimètre électromagnétique a été reprise par le groupe en 2016 et a été totalement réécrite de façon à pouvoir être réalisée sur la ferme de calcul du système de déclenchement logiciel de niveau 1 le plus rapidement possible. Lorsque la statistique est suffisante (300 millions d'événements), une procédure itérative ajuste la masse des π^0 à leur valeur nominale pour chacune des 6016 cellules et des corrections sont calculées pour chaque tube photomultiplicateur [fig. 1].

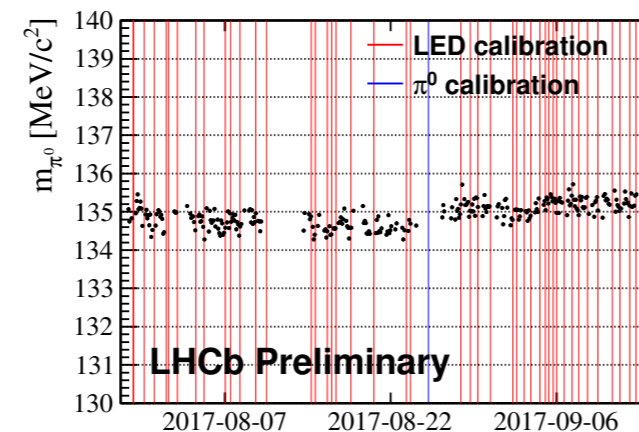


Figure 1 : Évolution de la masse des π^0 en fonction du temps. Chaque point est obtenu en ajustant la masse invariante diphoton d'un échantillon correspondant à une heure de données. Les lignes rouges correspondent aux changements des hautes tensions obtenus par le système des diodes électroluminescentes et les lignes bleues correspondent aux changements des hautes tensions obtenus par la calibration π^0 .

La méthode a été développée pour le redémarrage de 2017 et a été complètement automatisée en 2018. Les performances ont été évaluées sur des désintégrations radiatives comme $B^0_s \rightarrow \phi\gamma$ ou $B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$ et ont montré une amélioration de la résolution sur la masse des mésons B d'environ 5 %.

Identifications des particules et objets calorimétriques

Les membres du groupe contribuent aux outils mis en place pour la calibration du calorimètre, l'identification des particules et l'amélioration de leur reconstruction (photons convertis et bremsstrahlung des électrons, efficacité des π^0 , eta, photon...). Plusieurs membres du groupe ont été coordinateurs du groupe « objets calorimétriques » de 2014 à 2018, chacun à son tour pour une période de deux ans. Depuis septembre 2015, un membre du groupe est coordinateur du logiciel des calorimètres. Cette responsabilité implique une charge importante dans les modifications profondes de ce logiciel pour l'upgrade phase I.

La physique des saveurs fait un usage important de l'identification des particules. Il convient donc d'avoir une identification performante et bien calibrée afin de minimiser les incertitudes systématiques. À cet effet, des échantillons de données purs sont sélectionnés à partir de désintégrations ayant une cinématique permettant l'identification sans ambiguïté d'un des produits sans se baser sur les informations des détecteurs d'identification. En 2017, les algorithmes de sélections des échantillons de particules neutres (photon et π^0) ont été implémentés dans le système de déclenchement logiciel afin de permettre des études systématiques des performances de reconstruction et d'efficacité d'identification des particules directement à partir des données. Afin d'étendre la couverture cinématique par rapport aux échantillons du run 1, en particulier à basse énergie, des canaux de contrôle supplémentaires ont été rajoutés à ceux existants [fig. 2]. Le groupe du LAPP intervient dans la production des échantillons de calibration dans un format utilisable pour les analyses de physique ainsi que dans la soustraction du bruit de fond présent dans les différents canaux. Le groupe participe également à la conception des logiciels de calcul des efficacités d'identification, utilisable de manière centralisée par la collaboration.

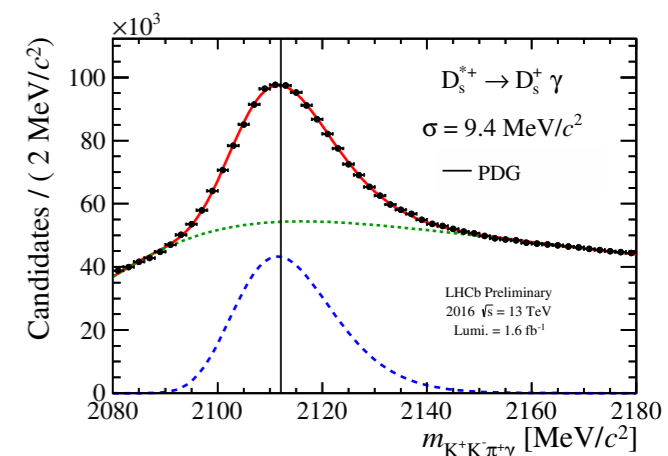


Figure 2 : Ajustement sur la distribution de la masse invariante $K^+K'\pi^0\gamma$ des candidats $D_s^{*+} \rightarrow D_s^+\gamma$ avec les données collectées par l'expérience LHCb en 2016. La ligne verticale représente la valeur de la moyenne mondiale.

L'équipe du LAPP a entièrement développé l'outil de reconstruction des photons convertis. Environ 40 % des photons se convertissent en paires e^+e^- en traversant la matière du détecteur. La moitié des conversions a lieu avant l'aimant et peut donc être reconstruite avec les traces laissées par l'électron et le positon. La mesure de l'impulsion des particules chargées étant plus précise que celle de l'énergie par le calorimètre, la résolution obtenue est bien meilleure (typiquement un facteur 2 à 3) pour les photons convertis au prix cependant d'une importante perte en statistique. Cet outil a été utilisé dans des analyses où le gain en résolution permet d'obtenir de meilleurs résultats : étude des désintégrations radiatives du charmonium et du bottomonium et des mésons $B^0_{(s)}$.

La simulation a aussi un rôle important dans les analyses de physique. Or, au run 1, les données simulées représentaient 12 % des données totales et utilisaient 60 % des ressources informatiques distribuées allouées à l'expérience LHCb (environ 75 % au run 2). La quantité de données collectées au run 2 est significativement plus grande qu'au run 1 et l'augmentation sera encore plus importante (facteur 10) au run 3 après la mise à niveau de phase I de LHCb.

L'utilisation de la simulation rapide est donc un enjeu important. L'impact de la simulation des calorimètres est par ailleurs significatif : environ 35 % du temps de calcul est dédié à la simulation des calorimètres électromagnétique et hadronique. Pour cela le groupe a participé au développement d'une simulation rapide du calorimètre basée sur des bibliothèques de gerbes électromagnétiques et hadroniques en étudiant les divers paramètres pouvant affecter leur développement (énergie de la particule incidente, angle d'incidence, position dans le calorimètre...) et à la mise en place d'un prototype de code intégré dans le logiciel de LHCb pour permettre des études de performances détaillées et des comparaisons avec la simulation complète. L'objectif est de gagner un facteur 3 à 10 sur le temps de calcul tout en conservant la même précision.

Analyses de physique

Les analyses de physique effectuées dans le groupe portent sur l'étude de la spectroscopie des quarkonia, la mesure des désintégrations radiatives, l'étude de la violation de l'universalité leptonique ainsi que l'étude des diagrammes de Dalitz de désintégrations des mésons B en charme ouvert en vue de la mesure des angles CKM γ et β .

L'étude de la production des états liés cc (charmonium) et bb (bottomonium) apporte des informations sur l'interaction forte dans le domaine non perturbatif. Les différents états de spin des mésons χ_c (résonances cc) sont des résonances de masse très proches (45 MeV/c² entre le χ_{c1} et le χ_{c2}). Elles sont généralement étudiées grâce à leur principale désintégration : $\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma$. Ces résonances ne peuvent être résolues qu'en utilisant des photons convertis. La mesure des rapports des sections efficaces des χ_{c1} et χ_{c2} a été effectuée par le groupe du LAPP [5] et a permis de contraindre les modèles de l'interaction forte utilisés pour décrire la fusion de gluons vers ces états liés cc [fig. 3]. Une analyse similaire [4] a permis l'étude des mésons χ_b (résonances bb) avec leur désintégration en $\Upsilon\gamma$. Celle-ci a permis, entre autre, la mesure de la masse de l'état $\chi_b(3P)$ conduisant à une amélioration d'un facteur 3 sur la précision de la masse obtenue auparavant par la collaboration ATLAS.

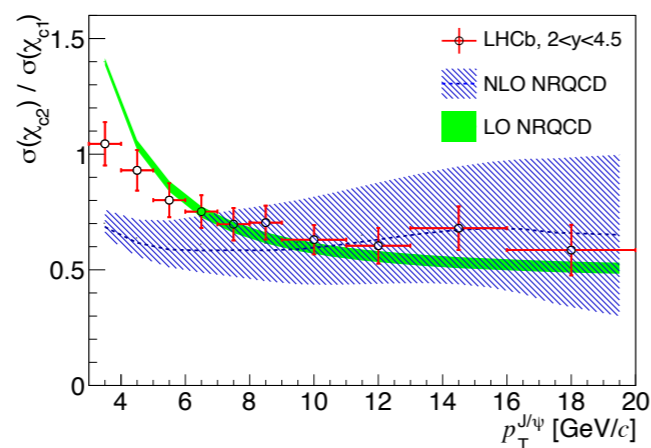


Figure 3 : Rapport des sections efficaces de production des χ_{c1} et χ_{c2} mesuré par LHCb et comparé aux calculs LO et NLO de NRQCD.

Les transitions radiatives rares $b \rightarrow s\gamma$ et $b \rightarrow d\gamma$ étant interdites à l'ordre de l'arbre dans le Modèle Standard, elles sont particulièrement sensibles à la présence de Nouvelle Physique. La mesure des rapports d'embranchement et des distributions angulaires de ces désintégrations pourrait révéler la présence de nouvelles particules. L'étude des désintégrations radiatives $B_{(s)}^0 \rightarrow K^*\gamma$ et $B_{(s)}^0 \rightarrow \phi\gamma$ avec les photons convertis a fait l'objet d'un travail de thèse entre 2013 et 2016. L'utilisation des photons convertis présente l'avantage d'un bruit de fond réduit par rapport à celle des photons non convertis. Les résultats ont été la mesure du rapport des rapports d'embranchement $B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$ et $B_{(s)}^0 \rightarrow \phi\gamma$ et de l'asymétrie de CP de $B_{(s)}^0 \rightarrow \phi\gamma$. Cette analyse a aussi montré que grâce à l'utilisation des photons convertis la désintégration du $B_{(s)}^0$ en $K^*\gamma$ pourrait être observée avec une plus grande statistique.

Étant sensible à un ensemble plus large d'opérateurs effectifs, la désintégration $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+\mu\gamma$ offre une contrepartie intéressante à la désintégration rare $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+\mu$, également à la lumière des anomalies actuelles dans l'universalité leptonique. Le rapport d'embranchement théorique est supérieur d'environ un facteur trois par rapport à celui de $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+\mu$ lorsqu'il est intégré sur tout le spectre en q^2 de la paire de muons du fait de la suppression d'hélicité. Un travail de thèse démarré en 2016, partagé entre le LAPP sur l'étude du rapport d'embranchement avec les

données de LHCb et le LAPP sur des études théoriques, est en cours sur ce sujet.

La comparaison de l'angle CKM β mesuré dans différentes désintégrations est un test important du mécanisme de Kobayashi-Maskawa du Modèle Standard. La désintégration en charme ouvert $B^0 \rightarrow D^0\pi^+\pi^-$ procède uniquement via des processus à l'arbre. Elle permet, quand le méson D^0 est reconstruit dans un état propre de CP, une mesure de $\sin(2\beta)$ par une analyse du diagramme de Dalitz dépendante du temps et par étiquetage de la saveur. Elle permet aussi l'accès à $\cos(2\beta)$ conduisant ainsi à la levée de l'ambiguïté sur l'angle CKM β . Dans une première étape, il est impératif de mener l'étude expérimentale du modèle en amplitude du diagramme de Dalitz où les paires $\pi^+\pi^-$ et $D^0\pi$ fournissent une riche spectroscopie de résonances intermédiaires. Le groupe a mené cette étude sur les données du run 1 du LHC conduisant à la mesure du rapport d'embranchement de la désintégration $B^0 \rightarrow D^0\pi^+\pi^-$ ainsi que la mise en évidence de nombreuses nouvelles résonances [3]. Un canal similaire avec le mode en deux kaons $B_{(s)}^0 \rightarrow D^0K^+K^-$ a fait l'objet d'un travail de thèse entre 2012 et 2015 et conduit à deux publications [1, 2]. Basé sur les données collectées en 2011 et

2012, les résultats obtenus ont été la première observation de la désintégration $B_{(s)}^0 \rightarrow D^{*0}\phi$ ainsi que la mesure de la fraction longitudinale de la polarisation de cette désintégration vecteur-vecteur [fig. 4]. La mesure du rapport d'embranchement des désintégrations $B_{(s)}^0$ en $D^0\phi$ a également été obtenue ainsi qu'une limite supérieure sur le mode B^0 en $D^0\phi$ qui est supprimé par la règle OZI avec échange de W. À plus long terme, les modes $B_{(s)}^0 \rightarrow D^{*0}\phi$ permettront un accès à l'angle CKM γ avec un méson $B_{(s)}^0$.

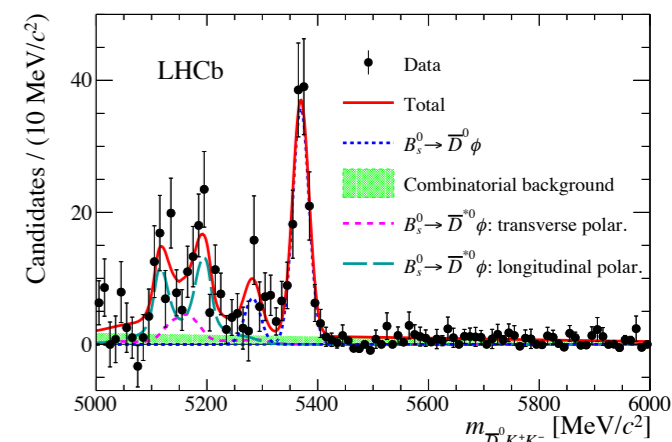


Figure 4 : Ajustement sur la distribution de la masse invariante $D^0 K^+ K^-$ des candidats $D^0\phi$.

RÉALISATIONS TECHNIQUES

L'essentiel de la participation du LAPP à l'upgrade phase I, en collaboration très active avec le CPPM et le CERN, est basée sur le projet d'acquisition des données du détecteur LHCb à 40 MHz. L'électronique frontale des détecteurs transmettra l'information de toutes les collisions du LHC hors-détecteurs par liens optiques à des cartes de lecture au format PCI express Gen 3 (appelées « PCIe40 »). Ces cartes de lecture à 40 MHz, développées par le CPPM, sont génériques et communes à tous les sous-détecteurs. Elles seront intégrées au serveur qui exécute l'assemblage des fragments d'événements, pour les envoyer ensuite dans une ferme de processeurs qui fera le tri des événements avec un système de déclenchement purement logiciel. Les cartes PCIe40 sont équipées d'un puissant FPGA (Field-Programmable Gate Array) de la famille Arria 10 d'Altera.

Le LAPP a la responsabilité de la coordination du développement de tous les microcodes (firmwares) nécessaires à la programmation des FPGA, incluant les environnements de développement, les simulations, la documentation ainsi que l'architecture interne du FPGA. Le LAPP a par ailleurs la responsabilité du développement de toutes les parties communes du microcode, seule la partie spécifique qui doit être adaptée au besoin de chaque sous-détecteur est de leur responsabilité. Le LAPP a aussi la responsabilité de la partie spécifique pour les données des calorimètres. La coordination de ces développements implique l'organisation de nombreuses réunions ainsi que la gestion et l'écriture de documents.

L'architecture du microcode détermine l'organisation des différentes fonctions de ce dernier et permet une segmentation des différentes étapes que subiront les données reçues. Les fonctions principales comprennent la collecte asynchrone des données des fibres optiques, l'alignement en temps, le traitement spécifique à chaque sous-détecteur, la concaténation des données en un événement, pour finir par le rassemblement des événements sous forme de « multi-événements » pour être envoyés dans la mémoire de l'ordinateur hôte via le bus PCI express [fig. 5]. Dans ce contexte, le LAPP a mis en place une structure avec un ensemble d'outils pour la gestion et la coordination du développement des microcodes.

Cette structure comprend d'une part un environnement de travail commun à tous les développeurs (environ une vingtaine de laboratoires à travers le monde) autant pour partager le travail développé que pour partager les informations et documentations liées à ces développements. D'autre part, de nombreux scripts ont été développés pour faciliter l'utilisation de l'environnement de travail ainsi que pour effectuer de nombreux tests pour valider les développements des différents groupes et s'assurer des performances et optimisation des ressources lors de l'intégration des différentes parties dans le microcode global. Le LAPP fournit une aide technique aux groupes des sous-détecteurs pour utiliser l'environnement de travail développé.

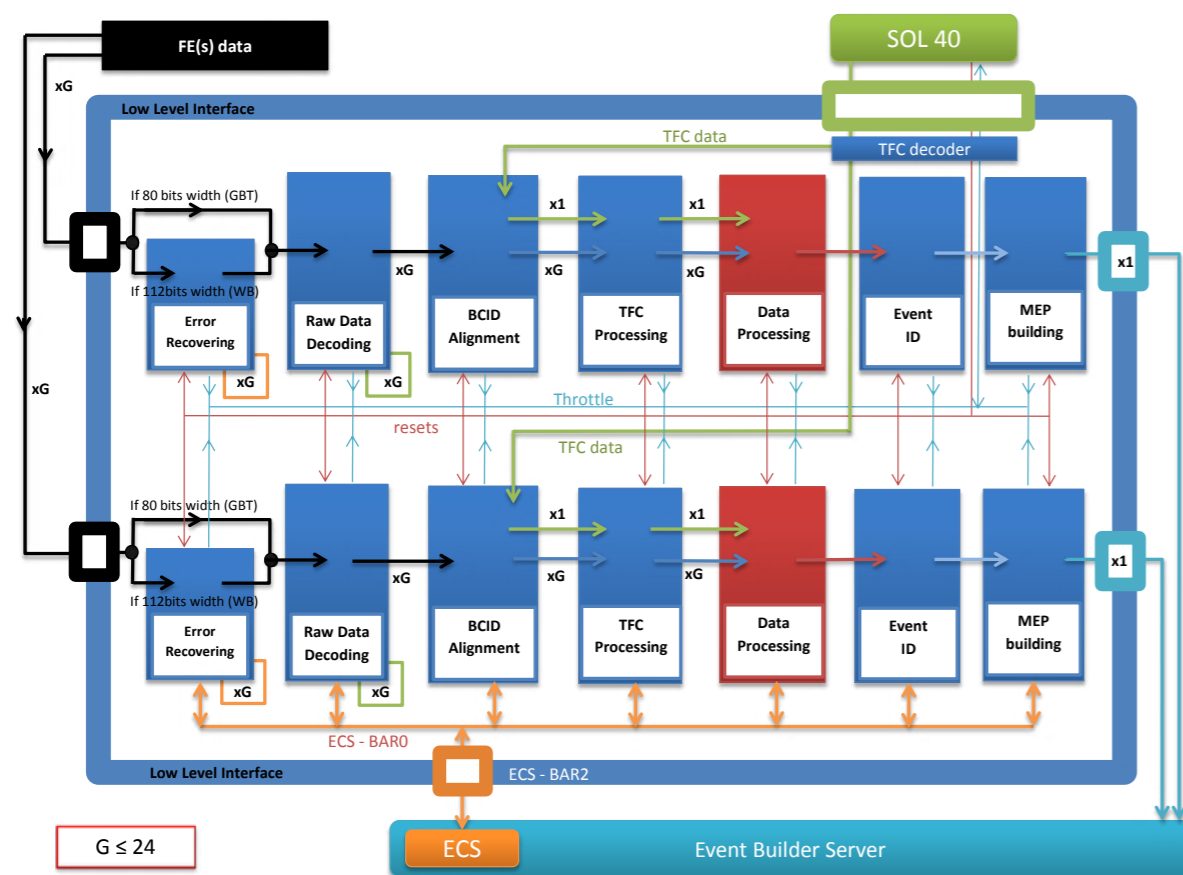


Figure 5 : Architecture du microcode pour la carte d'acquisition de l'upgrade phase I de LHCb.

L'année 2018 est la dernière année de prise de données du run 2 avant le démontage du détecteur LHCb suivi de l'installation et du commissioning du nouveau détecteur et de sa chaîne d'acquisition. L'implication déjà forte dans le projet d'upgrade via la coordination et le développement des microcodes va aller croissant dans les trois ans à venir. De la phase de développement en laboratoire, on passera à des tests in-situ au CERN de tranches de détecteurs avec toute la chaîne d'acquisition, de l'électronique frontale jusqu'au système de déclenchement logiciel pour au final stocker les données sélectionnées sur disques. De nombreux outils de vérification et de monitoring, que ce soit microcode ou logiciel, doivent être élaborés et développés pour avoir la capacité de tester et valider facilement l'ensemble des 500 cartes PCIe40 et leurs microcode et système de contrôle que composera le système d'acquisition final. Cette chaîne d'acquisition est une des plus ambitieuses de la physique des particules. Elle générera au final plus de 40 Tbits/s de données et pose de nombreux défis en matière de transfert de données, d'analyse et de stockage.

L'équipe mécanique du LAPP honore ses engagements liés aux activités de maintenance concernant le système de déplacement des calorimètres, ainsi que la vérification de la structure des calorimètres durant les longs arrêts techniques du LHC. Elle a récemment pris en charge les études des outillages des structures pour stocker les plaques de plomb et les cadres des super-modules nécessaires avec le démontage au cours du premier semestre 2019 du détecteur pieds de gerbe. Cet outillage permettra de stocker les plaques de plomb à plat dans le cadre d'une éventuelle réutilisation. Pour l'ensemble de ces structures, le LAPP a la charge de l'étude, des commandes, du suivi de la sous-traitance et de l'installation lors du démontage. L'organisation du démontage et les procédures sont coordonnées avec le LPC de Clermont-Ferrand et le groupe du CERN.

PERSPECTIVES

Avec le démarrage du Run 3 du LHC en 2021 et un nouveau détecteur LHCb, le groupe sera fortement impliqué dans le commissioning de la chaîne d'acquisition à 40 MHz avec les premières données. En fonctionnant à une luminosité cinq fois supérieure à celle du Run 2, ce nouvel environnement avec plus d'événements empilés à chaque collision du LHC nécessitera de revoir la calibration en ligne des calorimètres ainsi que l'identification des particules neutres dans le nouveau système de déclenchement logiciel. Le groupe poursuivra les études de physique déjà engagées avec toute la statistique des données des Runs 1 et 2. Le groupe participe à la réflexion sur un nouveau calorimètre électromagnétique qui serait installée lors du quatrième long arrêt technique du LHC (2030) en collaboration étroite avec le LAL (Orsay), le LPC (Clermont-Ferrand) et plusieurs universités chinoises impliquées dans LHCb.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 LHCb collaboration, R. Aaij et al. Observation of the decay $B_s^0 \rightarrow D^0 K^+ K^-$ Physical Review D 98, 072006 (2018)
- 2 LHCb collaboration, R. Aaij et al. Observation of $B_s^0 \rightarrow D^{*0} \phi$ and search for $B^0 \rightarrow D^0 \phi$ decays Physical Review D 98, 071103 (2018)
- 3 LHCb collaboration, R. Aaij et al. Dalitz plot analysis of $B^0 \rightarrow D^0 \pi^+ \pi^-$ decays Physical Review D 92, 032002 (2015)
- 4 LHCb collaboration, R. Aaij et al. Measurement of the $\chi_b(3P)$ mass and of the relative rate of $\chi_{b1}(1P)$ and $\chi_{b2}(1P)$ production Journal of High Energy Physics 10, 088 (2014)
- 5 LHCb collaboration, R. Aaij et al. Measurement of the relative rate of prompt χ_{c0} , χ_{c1} and χ_{c2} production at $\sqrt{s} = 7$ TeV Journal of High Energy Physics 10, 115 (2013)

THÈSES

L. Beaucourt, décembre 2016

Study of $B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$, $B_s^0 \rightarrow \phi\gamma$ and $B_s^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$ decays using converted photons with the LHCb detector

N. Déléage, octobre 2015

Étude des désintégrations $B_{(s)}^0 \rightarrow D^{*0}K^-$ et des sous-modes $B_{(s)}^0 \rightarrow D^{*0}\phi$ avec le détecteur LHCb

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

M. Chefdeville, octobre 2017

Operation and performance of the LHCb calorimeters
Calorimetry for the High Energy Frontier, Lyon, France

W. Qian, juillet 2015

Dalitz Plot Analyses with $B \rightarrow Dhh$ decays at LHCb
European Physical Society Conference on High Energy Physics 2015, Vienne, Autriche

J.-F. Marchand, septembre 2014

Radiative decays at LHCb
8th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Vienne, Autriche

P. Ghez, juillet 2014

Quarkonia and Exotics at LHCb
11th International Conference on Hyperons, Charm and Beauty Hadrons, Birmingham, UK

E. Tournefier, mai 2013

Heavy flavour production and spectroscopy at LHCb
25th Rencontres de Blois on «Particle Physics and Cosmology», Blois, France

FLC



PHYSIQUE ET INSTRUMENTS AUPRÈS DES FUTURS ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES

RÉSUMÉ

Un collisionneur linéaire e^+e^- opérant à l'échelle du TeV pourrait être le prochain outil de la communauté de physique des particules, permettant de manière complémentaire au LHC de rechercher et découvrir la physique au-delà du Modèle Standard. Au travers des deux projets de collisionneurs ILC et CLIC, le groupe Future Linear Collider du LAPP étudie le potentiel de physique de telles machines et propose des instruments pour la détection de particules (calorimétrie Micromegas) et la stabilisation des aimants autour du point d'interaction.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2017

Higgs physics at the CLIC electron-positron linear collider, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 475

Updated baseline for a staged Compact Linear Collider, arXiv:1608.07537

2018

Top-Quark Physics at the CLIC Electron-Positron Linear Collider, arXiv:1807.02441

INTRODUCTION

La perspective d'un collisionneur linéaire e^+e^- fonctionnant comme usine à boson de Higgs et quark top, et donnant accès à des états finaux rares peu ou pas accessibles sur une machine proton-proton, est reconnue depuis plusieurs années comme une des priorités majeures en physique des particules. L'absence de signe direct de Nouvelle Physique au LHC renforce encore ce besoin avec comme objectif premier l'examen minutieux du boson de Higgs (self-couplage, largeur totale de désintégration...). Dans la situation actuelle de la physique des particules où la prochaine échelle de Nouvelle Physique est inconnue, une machine de précision permettant l'exploration de la région

du TeV est une alternative pertinente et réaliste aux récents projets de machines circulaires. Le groupe Future Linear Collider (FLC) du LAPP est impliqué sur la R&D détecteurs pour les deux projets de linéaires e^+e^- : International Linear Collider (ILC) et Compact Linear Collider (CLIC). Le calorimètre à échantillonnage développé au LAPP utiliserait comme milieu actif des détecteurs gazeux appelés chambres Micromegas. Sur la période 2013-2018, le groupe s'est concentré sur l'amélioration des performances de ces chambres. En parallèle, le groupe étudie le potentiel de physique auprès du collisionneur CLIC et a participé à l'élaboration

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

CLIC (29 instituts), CALICE (49 instituts), RD51 (75 instituts).

Groupe du LAPP :

Physiciens

J.-J. Blaising, M. Chefdeville, Y. Karyotakis

Equipe technique

S. Cap, C. Drancourt, J. Jacquemier, F. Peltier, G. Vouters

Thématiques scientifiques
Modèle standard &
nouvelle physique

de plusieurs documents clés sur le sujet. Plus récemment des activités autour de la perspective FCC ont aussi démarré (voir chapitre Instrumentation et innovation).

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Physique auprès du collisionneur e^+e^- CLIC

La prise de données dans l'expérience LHCb et CLIC (Compact Linear Collider) est un projet de collisionneur linéaire d'électrons-positrons pour la physique à très hautes énergies. Il est un candidat potentiel pour succéder aux expériences du LHC afin de compléter et approfondir notre compréhension du Modèle Standard et de tester de nouvelles théories au-delà du Modèle Standard. La physique à CLIC est envisagée en trois phases avec des énergies de collision allant de 380 GeV à 3 TeV. CLIC est basé sur un concept novateur « d'accélération à deux faisceaux » à la fréquence élevée de 12 GHz, un gradient accélérateur de 100 MV/m et une luminosité de $2.10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Le faisceau d'électron peut être polarisé, permettant d'étudier la chiralité de nouvelles particules.

Pendant la période 2009-2012 le LAPP a contribué à l'étude de faisabilité du CLIC qui a fait l'objet d'une publication en 2012. Le LAPP était coéditeur du chapitre sur les performances pour la physique. Pendant la période 2013-2018 la collaboration a détaillé les options de construction de la machine et le programme de physique [1]. Trois phases avec des énergies nominales de 350 GeV, 1.5 TeV et 3 TeV dans le centre de masse sont envisagées. Mais les énergies peuvent être modifiées si le LHC découvre de la Nouvelle Physique.

La première phase à 380 GeV est destinée à l'étude la physique du Higgs et du quark top et la recherche de nouvelles particules. Aux énergies supérieures, d'autres modes de production du Higgs deviennent accessibles, permettant d'étudier des processus rares, d'autres couplages du Higgs et d'accroître la sensibilité pour la recherche de nouvelles particules.

L'impact que CLIC aura sur notre compréhension de la nature du boson de Higgs a été étudié en détail [2]. La mesure des sections efficaces

de production du Higgs à 380 GeV puis aux énergies plus élevées permet de déterminer les couplages du Higgs avec une grande précision. La figure [fig. 1] montre l'incertitude statistique sur la mesure du couplage du Higgs obtenue grâce à un fit des mesures effectuées aux trois différentes énergies. Les performances de la physique du quark top à CLIC sont décrites dans un rapport en cours de publication [3].

Lors de la première phase, un scan en énergie entre 340 et 350 GeV permettra de déterminer la masse du quark top avec une précision statistique de 20 MeV [fig.2]; l'incertitude due aux erreurs systématiques étant de 25-50 MeV. A plus haute énergie, la mesure de section efficace du processus $e^+e^- \rightarrow H\bar{t}t$ permet de mesurer le couplage du Higgs au top. Les mesures précises de la section efficace, de l'asymétrie avant-arrière et de l'hélicité permettent des tests du Modèle Standard ; toute anomalie pouvant indiquer la présence de Nouvelle Physique.

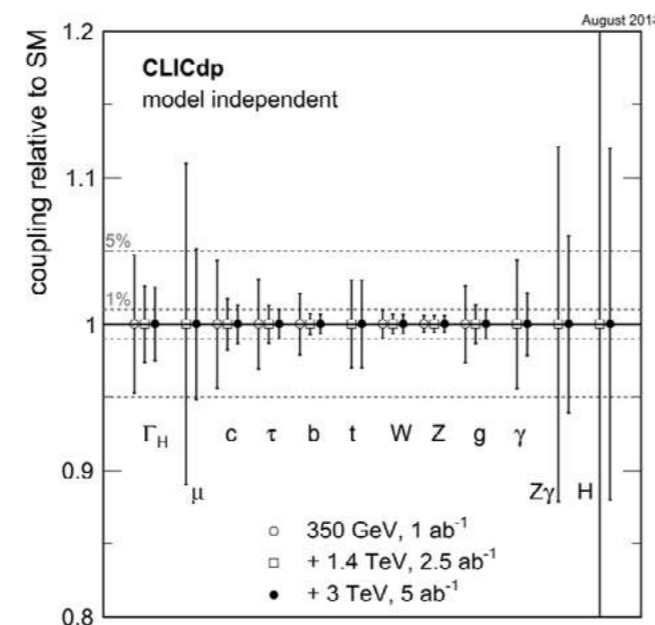


Figure 1 : Incertitude statistique sur les constantes de couplage du Higgs aux diverses particules.

Le LAPP contribue également à la recherche de matière noire dans le processus $e^+e^- \rightarrow X\bar{X}\gamma$, dans lequel la seule particule visible est le photon, X étant la particule indétectable. Connaissant l'énergie dans le centre de masse, la mesure de la section efficace différentielle $dN/dE\gamma$ permet de déterminer la masse de la particule de matière noire.

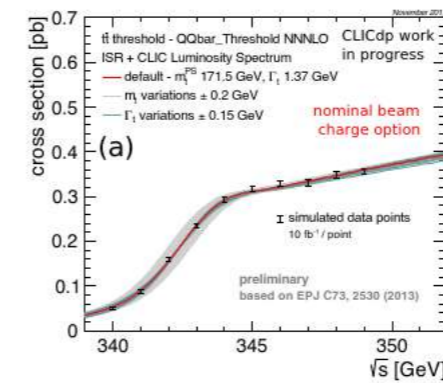


Figure 2 : Scan de la section efficace de production tt en fonction de l'énergie dans le centre de masse.

RÉALISATIONS TECHNIQUES

Introduction

Micromegas

En parallèle des études de physique, le groupe du LAPP s'investit sur la recherche et le développement d'un détecteur gazeux rapide appelé Micromegas. Héritier des chambres proportionnelles multifils qui ont valu le prix Nobel de physique à Georges Charpak en 1992, le Micromegas fonctionne sur le principe d'ionisation d'un gaz par des particules chargées ou des photons et réalise l'amplification de ce faible signal électrique grâce à une grille métallique. Portée à un potentiel suffisant, la grille attire les quelques électrons d'ionisation qui se multiplient par effet d'avalanche sous l'accélération du champ électrique. Le signal ainsi amplifié est capté par des électrodes puis mesuré par des composants électroniques conventionnels.

Calorimétrie hadronique à un futur LC

D'une épaisseur inférieure au centimètre, ces détecteurs sont une option intéressante pour instrumenter le calorimètre hadronique d'une expérience à CLIC ou ILC. En effet, les techniques envisagées pour la reconstruction des cascades hadroniques et des désintégrations de particules reposent sur une granularité importante des trajectographes et calorimètres d'une part, et d'autre part sur des logiciels permettant l'association des traces aux dépôts calorimétriques avec la plus faible ambiguïté possible. Cette association est particulièrement utile pour la mesure de jets de particules (issus

de l'hadronisation des quarks) car elle permet d'utiliser le détecteur le plus précis pour chaque particule du jet. Elle permettrait notamment d'identifier distinctement des bosons W et Z se désintégrant en paires de quarks.

Prototypes à anodes métalliques

Dans un premier temps (2009-2012), le groupe a construit des prototypes Micromegas de grande taille ($1 \times 1 \text{ m}^2$) dont la spécificité était de disposer d'une électronique frontale soudée sous la zone active plutôt que déportée en périphérie [4]. Dans cette configuration, il est possible d'atteindre une segmentation spatiale de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ indépendamment de la taille de la zone active car les pistes de routage des signaux (des électrodes au circuit intégré) sont courtes. Ces prototypes ont fait l'objet de nombreux tests et leurs excellentes performances sont publiées [5]. Néanmoins, une faiblesse du Micromegas est sa tendance aux courts-circuits grille-anode lors d'exposition à des flux élevés de hadrons. Ce phénomène rare (1 pion sur 10^5 déclenche un court-circuit), devient fréquent dans un calorimètre du fait de la forte multiplicité de particules produites dans les cascades hadroniques. De plus, il peut endommager l'électronique de lecture si des protections passives (diodes) ne sont pas employées.

Prototype à anodes résistives

Une solution technique, inspirée des chambres à faces résistives, consiste à remplacer les électrodes métalliques par des électrodes résistives qui, par chargement progressif lors de l'avalanche, entraînent une diminution proportionnelle du champ électrique et du facteur de multiplication.

Ce phénomène de saturation permet d'éviter la transition avalanche-plasma à l'origine du court-circuit. Depuis 2012, plusieurs prototypes de Micromegas résistifs ont été conçus suivant trois phases distinctes : choix d'une configuration résistive, optimisation des valeurs de résistances, puis validation sur des grands prototypes. Ces trois phases sont présentées ci-dessous.

Micromegas résistifs

Choix de la configuration résistive (2013-2014)

Les structures résistives sont construites sur un circuit imprimé doté d'électrodes de lecture métalliques par lamination et pressage de films isolants et sérigraphie de colles résistives. Ces électrodes sont des damiers de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Grâce à l'isolant, les électrodes résistives peuvent changer de potentiel indépendamment des électrodes de lecture, assurant ainsi la saturation du signal ainsi qu'une seconde protection passive de l'électronique (via la séparation physique des deux électrodes). Le signal est induit sur les électrodes de lecture par couplage capacitif, d'où l'utilisation de films de quelques dizaines de microns d'épaisseur seulement.

Suite à la montée en potentiel des électrodes résistives, les charges sont évacuées vers la masse. Dans le schéma le plus simple, un film isolant continu est utilisé. Les charges diffusent de ce fait sur la surface résistive vers les bords du détecteur où le film résistif est connecté à la masse. Facile à mettre en œuvre, cette configuration n'est toutefois pas idéale pour des détecteurs de grande taille et/ou des flux de particules élevés. Afin de réduire l'empilement des charges et la baisse de gain consécutive, une évacuation verticale des charges à travers l'isolant est requise. Celle-ci est réalisée au moyen d'un via métallique traversant l'électrode de lecture, l'isolant et même le circuit imprimé. Malgré une complexité technique accrue, les charges sont évacuées en un temps plus court et indépendant de la taille du détecteur. Ce schéma peut néanmoins être simplifié en remplaçant le via métallique par une résistance enterrée dans l'isolant, qui connecte l'électrode résistive à l'électrode de lecture. Ces différentes configurations sont représentées sur les figures [fig. 3 (a)] et [fig.3 (b)].

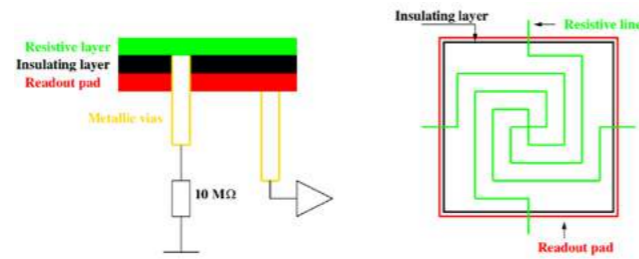


Figure 3 (a) : Configurations résistives, de la gauche vers la droite : pistes résistives sur film isolant avec connexion masse sur les bords, damiers résistifs sur film isolant avec connexion masse par un via métallique, damiers résistifs avec connexion masse par une résistance enterrée.

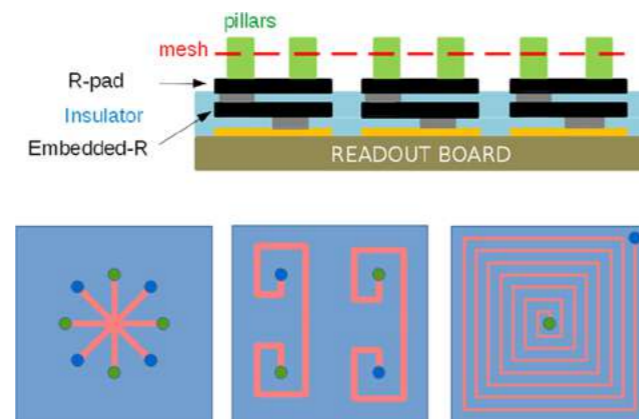


Figure 3 (b) : Motifs de résistance enterrée permettant de varier la résistance d'un facteur 40. Les points bleus et verts représentent les connexions entre les damiers résistifs et métalliques.

Plusieurs prototypes métalliques et résistifs de $16 \times 16 \text{ cm}^2$ ont été testés avec un faisceau d'électrons de quelques GeV à DESY (Hambourg). La stabilité des détecteurs est étudiée en enregistrant le courant électrique traversant le détecteur sous irradiation. Les mesures montrent clairement la suppression des courts-circuits dans les Micromegas résistifs. Compte tenu des faibles courants (quelques nA), les effets de chargement dans les prototypes résistifs sont tenus et le choix d'une configuration résistive se base sur les critères théoriques exposés plus haut.

Optimisation de la valeur de la résistance (2015-2016)

La réponse des détecteurs résistifs obéit à la loi d'Ohm. Le potentiel de l'électrode résistive est fonction du produit flux de particule et gain (i.e. courant électrique) et de la valeur de la résistance enterrée. Afin de minimiser la baisse de gain consécutive ($\sim 3 \text{ \%}/V$), il est intéressant de diminuer la valeur de la résistance. Ainsi, trois motifs de résistance et deux valeurs de résistivité de la colle sont testés. Les motifs correspondent à des résistances en série, en parallèle ou une combinaison des deux. Trois prototypes de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ sont d'abord fabriqués avec une colle à $100 \text{ kOhm}/\text{sq.}$, ce qui correspond à une résistance totale de 40, 10 et 4 MOhm (figure [fig. 3 (b)]). Des prototypes non-résistifs sont fabriqués pour servir de référence. Ces électrodes sont des damiers de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Grâce à l'isolant, les électrodes résistives peuvent changer de potentiel indépendamment des électrodes de lecture, assurant ainsi la saturation du signal ainsi qu'une seconde protection passive de l'électronique (via la séparation physique des deux électrodes). Le signal est induit sur les électrodes de lecture par couplage capacitif, d'où l'utilisation de films de quelques dizaines de microns d'épaisseur seulement.

Les effets de chargement sont observés en irradiant chaque prototype avec un faisceau intense de rayons X. La réponse des prototypes à un flux croissant est montrée figure [fig. 4(a)]. Pour chaque point de mesure, le comportement des prototypes est stable (sans court-circuit), y compris à des flux de plusieurs MHz/mm^2 ; soit quelques ordres de grandeur supérieur au flux maximum tolérable par les détecteurs gazeux classiques. Comme attendu, la réponse est linéaire ou saturée selon le gain et la valeur de la résistance [6]. A gain égal, cette mesure est impossible avec les prototypes non-résistifs car les courts-circuits sont trop fréquents.

À basse valeur de résistance, un Micromegas résistif devrait se comporter comme un Micromegas métallique et donc être sujet aux courts-circuits. Cette valeur critique est a priori inconnue et un second lot de trois prototypes a donc été fabriqué avec une colle cent fois moins résistive (400, 100, 40 kOhm). La stabilité

des prototypes résistifs et métalliques sous irradiation de hadrons de haute énergie est illustrée par la figure [fig. 4(b)] qui montre les distributions du courant de grille. Sous une valeur de 100 kOhm , les fluctuations importantes du courant signalent l'apparition de courts-circuits.

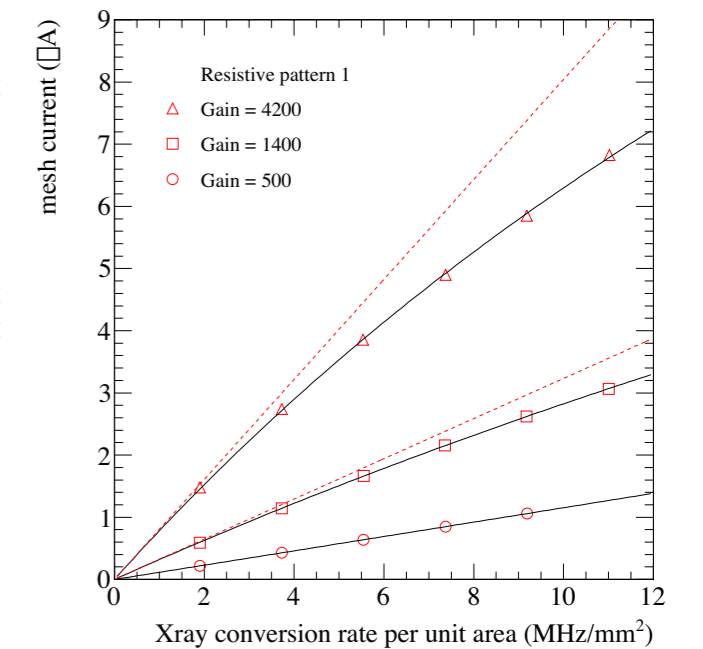


Figure 4 (a) : Courant de grille d'un prototype résistif en fonction du flux de rayons X se convertissant dans le gaz. Les mesures, effectuées à différents gains, montrent la transition entre un régime linéaire et un régime saturé caractéristique d'un détecteur résistif.

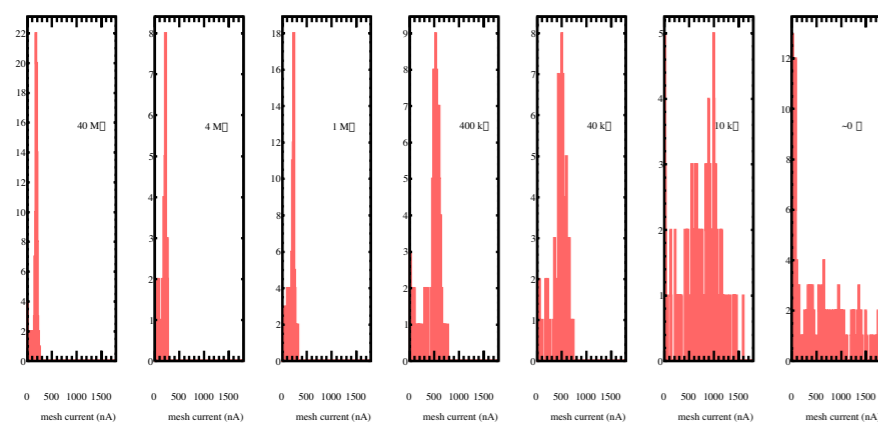


Figure 4 (b) : Courant de grille de 6 prototypes résistifs et d'un prototype standard dans un faisceau intense de pions. À basse résistivité, on retrouve le comportement d'un détecteur non-résistif avec de grandes fluctuations de courant signalant les courts circuits.

Grands prototypes résistifs (2017-2018)

Bien qu'encore difficilement industrialisable, la fabrication de Micromegas (avec résistances enterrées) de taille potentiellement intéressante pour des expériences de physique est aujourd'hui possible. Fort de l'expérience acquise avec les premières générations de prototypes résistifs, le groupe a récemment construit des prototypes plus grands, sur le modèle de ceux de 2012. Dotés d'une électronique embarquée et d'une matrice circulaire de damiers (50 cm de diamètre), trois prototypes ont été exposés à des cascades hadroniques. Leurs performances sont en cours d'étude mais les résultats préliminaires sont prometteurs. Entre autre, il a été démontré que les protections résistives rendent les diodes de protections superflues, permettant dorénavant l'économie de ces composants.

Cette phase du projet est menée en collaboration avec l'institut Weizmann en Israël qui développe une autre technologie résistive (appelée RPWELL) compatible avec les circuits imprimés du LAPP. Les premiers tests communs ont débuté en août 2018. L'opération réussie des prototypes Micromegas marque le point final de la R&D Micromegas pour la calorimétrie hadronique, débutée dix ans plus tôt.

PERSPECTIVES

Les objectifs du groupe CLICdp pour 2019-2020 sont de contribuer au processus de la stratégie européenne et de continuer les études permettant d'évaluer les performances de CLIC pour les théories au-delà du Modèle Standard.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 **P. Lebrun et al. (Editors)**
The CLIC Programme: Towards a Staged e⁺e⁻ Linear Collider Exploring the Terascale: CLIC Conceptual Design Report CERN-2012-005
- 2 **H. Abramowicz et al.**
Eur. Phys. J. C 77 (2017) no.7, 475
- 3 **CLICdp Collaboration**
Top-Quark Physics at the CLIC Electron-Positron Linear Collider
arXiv:1807.02441
- 4 **C. Adloff et al.**
Construction and test of a 1 x 1 m² Micromegas chamber for sampling hadron calorimetry at future lepton colliders
NIMA 729 (2013) 90–101
- 5 **C. Adloff et al.**
Test in a beam of large-area Micromegas chambers for sampling calorimetry
NIMA 763 (2014) 221–231
- 6 **Chefdeville et al.**
Resistive Micromegas for sampling calorimetry, a study of charge-up effects
NIMA 824 (2016) 510



© Photo by Yulia Buchatskaya - DESY Hamburg, Germany on Unsplash

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- M. Chefdeville, février 2016**
Anode charge-up in resistive Micromegas and its quenching effect on spark development
14th Vienna Conference on Instrumentation, 15-19 Feb. 2016

LES THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES



Physique des neutrinos

SUPERNEMO



PHYSIQUE DES NEUTRINOS ET DOUBLE DÉSINTÉGRATION BETA SANS ÉMISSION DE NEUTRINO

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la physique des neutrinos et plus particulièrement afin de sonder la nature du neutrino la collaboration internationale SuperNEMO, à laquelle le LAPP participe depuis 2013, a pour projet la mise en place, au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), un détecteur conçu pour la recherche de la décroissance double beta sans émission de neutrino. Le détecteur utilise une source d'émetteur double beta (isotope ^{82}Se) sous forme de feuille mince, entourée d'une chambre à traces et d'un calorimètre. Ce premier module de SuperNEMO contenant 7 kg de ^{82}Se aura comme premier objectif de vérifier que le niveau très bas requis de bruit de fond provenant de la radioactivité ambiante et des matériaux du détecteur sera atteint. Le groupe du LAPP a contribué significativement entre 2013 et 2018 à développer et réaliser une grande partie des feuilles sources ainsi que le système de monitoring et contrôle de l'expérience. Le groupe participe aussi à l'analyse des données avec en particulier la préparation de la mesure d'un bruit de fond important (celui lié à la désintégration du radon) qui est un des premiers retours de physique attendu après le démarrage de l'expérience.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS



Début de la collaboration avec SuperNEMO et mise en place du développement du slow control et des feuilles sources double beta.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration internationale SuperNEMO regroupe près d'une centaine de personnes provenant de 20 instituts et universités répartis dans 9 pays dont : Angleterre, Etats-Unis, France, Japon, République Tchèque, Russie, Slovaquie, Ukraine.

Les laboratoires français impliqués dans SuperNEMO sont : CENBG, CPPM, LAL, LAPP, LPC Caen et LSM.

L'équipe du LAPP est composé de :

Physiciens

D. Duchesneaut

Equipe technique

E. Chabanne, J.M. Dubois, A. Jeremie, T. le Flour, S. Lieunard, J.L. Panazol

Post-docs

A. Minotti (depuis 2017), A. Remoto (de 2013 à 2017)

Doctorants

T. le Noblet

Thématiques scientifiques
Physique des neutrinos

2014

R&D sur un nouveau concept des feuilles sources avec structure porteuse interne et avec du Sélénium naturel.

2015

Choix du design final pour la fabrication des feuilles sources.

2016

Prototypage du système de « Control & Monitoring System ».

Recherche de double désintégration beta de ^{116}Cd avec les données de NEMO3.

2018

Installation des feuilles sources de Sélénium au laboratoire souterrain de Modane et fermeture du détecteur.

INTRODUCTION

Dans le Modèle Standard de physique des particules, les fermions neutres tels les neutrinos peuvent être des particules de Dirac (la particule diffère de sa propre antiparticule) ou des particules de Majorana (la particule est sa propre antiparticule). Jusqu'à aujourd'hui, il n'y a jamais eu de mise en évidence expérimentale de l'existence de particules de Majorana. Mais l'observation du processus très rare de double désintégration beta sans émission de neutrino ($0\nu\beta\beta$) serait la preuve que le neutrino est une particule de Majorana et aurait des répercussions majeures sur la physique des particules.

De nombreux projets existent dans le monde pour rechercher cette désintégration très rare. Plusieurs technologies sont exploitées et pour la majorité d'entre elles la source émettrice beta est le détecteur lui-même. La stratégie de détecteur portée par la collaboration SuperNEMO repose sur une technique de détection employée avec succès dans l'expérience NEMO3 qui a pris des données entre 2003 et 2011. Cette technique allie un trajectographe et un calorimètre pour permettre la mesure complète de la cinématique des électrons produits par le processus recherché et déterminer ainsi ses propriétés.

Cette technique dite « tracko-calorimètre », dans laquelle des feuilles fines de source émettrice double beta sont mises en sandwich entre des volumes de chambres à dérive et un calorimètre, offre de nombreux avantages par rapport à d'autres approches existantes notamment pour l'identification et le rejet du bruit de fond.

L'objectif de SuperNEMO est de réduire d'au moins un ordre de grandeur par rapport à NEMO3 les contaminations radioactives tout en augmentant la taille de la source. Pour explorer le potentiel de cette technique, la première étape consiste à construire un module démonstrateur pouvant héberger près de 7 kg de Sélénium. Le groupe du LAPP a rejoint cet effort de recherche en s'impliquant dans la réalisation des sources, dans le développement du système de slow control et dans l'analyse des données.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Les activités de recherche du groupe SuperNEMO ont concerné l'étude et la réalisation d'une grande partie des feuilles sources de Sélénium du démonstrateur de SuperNEMO, le développement du système de slow control de l'expérience ainsi que de l'analyse des données de NEMO3 et la préparation de l'analyse des données du démonstrateur.

Optimisation du design des sources

Le travail de développement des feuilles sources a nécessité des études par simulation des performances du détecteur en fonction de la méthode de fabrication choisie. Pour cela un logiciel de simulation basé sur Geant4 a été développé, permettant de déterminer les performances du démonstrateur en fonction du design des sources. Une étude systématique a été effectuée pour valider chacune des options de fabrication définies dans le volet technique. L'optimisation détaillée des feuilles sources grâce à ces simulations a permis de définir et montrer que le choix du design retenu pour la procédure de fabrication des sources améliore légèrement la sensibilité du démonstrateur à la recherche de double désintégration beta sans émission de neutrino.

Etude du bruit de fond lié au radon

Un autre volet d'analyse mis en place en lien avec les performances du démonstrateur est l'étude de la reconstruction et l'identification des événements provenant de la désintégration du radon dans SuperNEMO. En effet ce bruit de fond sera dominant et il est essentiel de mesurer son taux dès le début de la prise de données. Grâce aux capacités du trajectographe et du calorimètre il est possible d'identifier la chaîne de désintégration du radon via la production d'une particule alpha retardée et d'un électron direct. Le groupe du LAPP a contribué au logiciel commun de l'expérience en développant et optimisant un algorithme d'identification des événements provenant de la désintégration du radon. Les études basées sur cet algorithme ont permis de montrer la possibilité de mesurer le taux de radon quotidiennement avec une précision de l'ordre de 8 %.

Mesure de la demi-vie $2\nu\beta\beta$ et recherche du processus $0\nu\beta\beta$ du ^{116}Cd

De manière à compléter son expertise sur la physique des désintégrations double beta, le groupe du LAPP a pu bénéficier de l'accès aux données de NEMO3 (prédécesseur de SuperNEMO) collectées entre 2003 et 2011. Comme ce détecteur possédait plusieurs secteurs avec différents isotopes encore non étudiés, le groupe du LAPP a pris en charge l'analyse des données de NEMO3 pour l'étude et la recherche de la désintégration double beta avec et sans neutrinos ($2\nu\beta\beta$ et $0\nu\beta\beta$) de l'isotope ^{116}Cd . Il a ainsi amené une des premières analyses multi-variables de ces données double beta en exploitant une approche basée sur un « boosted decision tree » (BDT). L'analyse a été publiée dans PRD en 2016 [3] et a apporté une des meilleures mesures de la demi-vie du processus $2\nu\beta\beta$ du ^{116}Cd ainsi que des limites compétitives sur les processus de violation de la saveur leptonique (LFV) produisant des désintégrations $0\nu\beta\beta$. La figure [fig. 1] montre la réponse du BDT entraîné pour la recherche du processus $0\nu\beta\beta$ par échange de neutrino léger de Majorana pour les différents bruits de fond ainsi que pour le processus attendu.

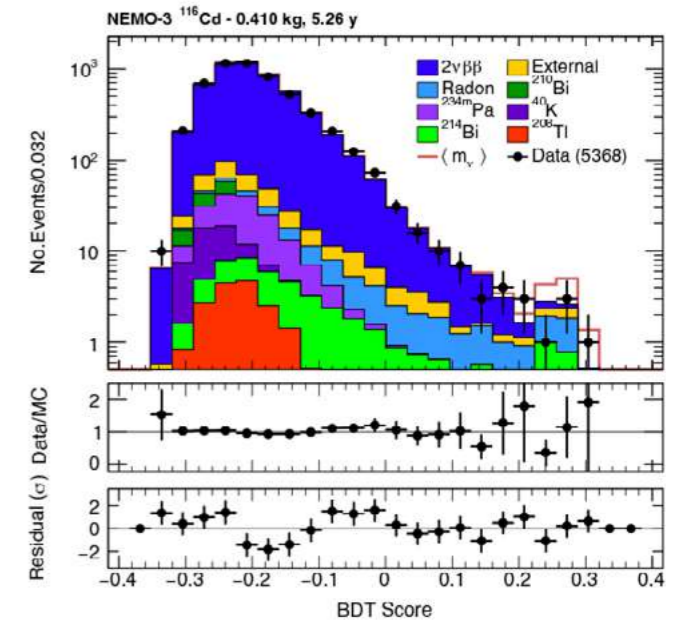


Figure 1: Réponse du BDT entraîné pour la recherche du processus $0\nu\beta\beta$ par échange de neutrino léger de Majorana pour les différents bruits de fond ainsi que pour le processus attendu. Le rapport entre données et Monte Carlo et les résidus sont montrés dans les histogrammes du dessous.

Analyse des états excités du ^{116}Cd

Une deuxième contribution à l'analyse des données de NEMO3 a été d'étendre l'analyse précédente à la recherche des désintégrations $2\nu\beta\beta$ et $0\nu\beta\beta$ du ^{116}Cd vers les états excités du ^{116}Sn dans NEMO3. Cela a fait l'objet de la thèse de T. le Noblet soutenue fin 2017. Les résultats de cette analyse ont permis de mettre des limites sur ces processus. La figure [fig. 2] montre la distribution de l'énergie totale de l'électron pour les contributions des fonds, du signal normalisé à la limite observée et des données dans un canal de l'état excité ($2+$) du ^{116}Sn .

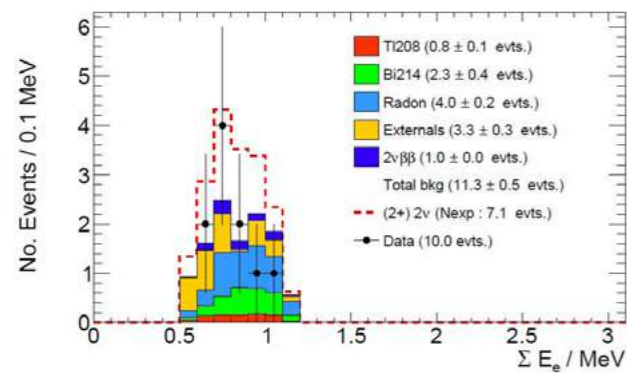


Figure 2 : Distribution de l'énergie totale de l'électron pour les contributions des fonds, du signal normalisé à la limite observée et des données dans un canal de l'état excité (2+) du ^{116}Sn .

RÉALISATIONS TECHNIQUES

R&D et fabrication des feuilles sources

En 2013, le groupe Neutrino du LAPP s'est engagé à développer et réaliser la moitié des feuilles sources (3.5 kg de ^{82}Se) du démonstrateur de SuperNEMO. Le cahier des charges était de développer une méthode alternative pour produire ces feuilles sous forme de bandes de 13 cm de large, de 200-300 microns d'épaisseur avec une uniformité meilleure que 5 % sur près de 3 m et avec des niveaux de radiopureté inégaux. Les premiers échantillons de source basés sur une structure support de fils de nylon ont été réalisés dès la première année après avoir acquis un certain nombre de nouvelles compétences concernant le travail avec des matériaux de très basse radioactivité dans un environnement de salle blanche. Tout au long de l'année 2013 les développements se sont succédés, des échantillons ont été réalisés et des campagnes de tests de radiopureté des différents matériaux ont pu être menés en parallèle au laboratoire souterrain de Modane. Cela a abouti à la réalisation d'un prototype de feuille source de Sélénium grandeur réelle au LAPP en 2014. Il était cependant difficile de parvenir à obtenir un procédé uniforme car les différents lots de Sélénium présentaient une disparité nécessitant systématiquement des traitements particuliers. Pour garantir la stabilité mécanique dans le temps le développement a abouti à la réalisation de feuilles de Sélénium auto porteuses dont la matière permettait de

garantir une structure uniforme et stable. Les feuilles étaient découpées en 8 pads contenus dans des enveloppes de mylar soudées entre elles. La figure [fig. 3] montre la première feuille source obtenue en 2015 par cette méthode avec du Sélénium naturel.



Figure 3 : La première feuille source obtenue en 2015 par la méthode développée au LAPP avec du Sélénium naturel.

Pour contrôler la radiopureté de ces feuilles sources, plusieurs d'entre elles ont été installées dans un détecteur dédié appelé BiPo dans le laboratoire souterrain de Canfranc [2]. La figure [fig. 4] montre l'installation de quatre feuilles sources dans le détecteur BiPo à Canfranc en 2016. Ces campagnes de mesure ont permis de montrer que les niveaux de contamination en ^{214}Bi et ^{208}Tl restaient inférieurs à ceux obtenus avec la méthode de fabrication employée précédemment pour NEMO3. Fort de ces résultats l'étape suivante a été la production des feuilles finales avec du ^{82}Se purifié. Le groupe du LAPP a pu ainsi produire 16 feuilles sources selon cette méthode sur les 34 constituant le démonstrateur. Sept feuilles supplémentaires ont été produites au LAPP selon la méthode NEMO3 en collaboration avec les collègues d'ITEP (Russie). Les qualités variées des poudres des différents lots de Sélénium purifiés selon différentes méthodes ont rendu le traitement et la fabrication complexe.

L'ensemble des sources a été installé dans le détecteur à Modane à l'automne 2018.

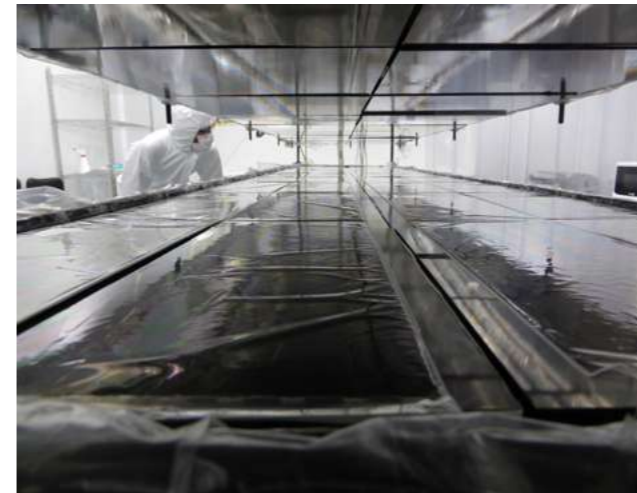


Figure 4 : Installation des feuilles sources dans le détecteur BiPo dans le laboratoire souterrain de Canfranc en 2016.

Développement du système de Slow Control

Le groupe du LAPP a entrepris dès 2013 le développement d'un système de slow control appelé CMS (Control and Monitoring System) bâti sur l'expérience de l'équipe CTA pour développer l'architecture autour des serveurs OPCUA. Le CMS de SuperNEMO est constitué d'un cœur d'application et d'un ensemble de composants MOS (Multipurpose OPCUA Server), ainsi que des clients graphiques permettant le monitoring.

En 2014, différentes interfaces des composants ont été implémentées dans un dispositif test au LAPP pour valider les protocoles de communication avec les différents composants du détecteur allant de la bobine pour le champ magnétique aux cartes électroniques front end en passant par les alimentations du calorimètre électromagnétique.

En 2015 le développement d'un prototype du CMS a permis d'effectuer les tests d'interconnexion avec la plateforme VIRE produite par le LPC-Caen et qui a pour tâche de gérer les processus utilisateurs et les contrôles de haut niveau.

S'est ajoutée à ces activités une aide continue aux équipes des autres sous-systèmes pour définir et décrire les interfaces de contrôle qui doivent se connecter au CMS et faciliter ainsi l'intégration « hardware ».

PERSPECTIVES

Les perspectives d'activités concernent le démarrage de l'expérience avec un commissioning qui va se faire selon au moins trois phases.

La première correspond à la mise en route sans la bobine, ni la tente anti-radon, ni le blindage qui seront installés successivement courant 2019. A chacune de ces périodes d'installation correspondra une nouvelle phase de commissioning. Le groupe du LAPP est impliqué dans le commissioning par la responsabilité de la coordination technique que lui a confié la collaboration.

Le groupe assurera aussi la responsabilité du fonctionnement du détecteur (Detector Operation), participera au suivi et à la prise de données et s'investira dès le début dans l'analyse des données pour déterminer la contamination du radon en fonction du temps. La prise de données et l'analyse devraient se poursuivre pendant au moins 2 ans.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 A.S. Barabash et al.**
Calorimeter development for the SuperNEMO double beta decay experiment
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 868, 98–108 (2017)
- 2 SuperNEMO Collaboration, A.S. Barabash et al.**
The BiPo-3 detector for the measurement of ultra-low natural radioactivities of thin materials
Journal of Instrumentation 12, P06002 (2017)
- 3 NEMO-3 Collaboration, R. Arnold et al.**
Measurement of the $2\nu\beta\beta$ Decay Half-Life and Search for the $0\nu\beta\beta$ Decay of ^{116}Cd with the NEMO-3 Detector
Physical Review D 95, 012007 (2017)
- 4 NEMO-3 Collaboration, R. Arnold et al.**
Results of the search for neutrinoless double- β decay in ^{100}Mo with the NEMO-3 experiment
Physical Review D 92, 072011 (2015)

THÈSES

Le Noblet, septembre 2017

Background studies and design optimisation of the SuperNEMO demonstrator module. Search for $2\nu\beta\beta$ and $0\nu\beta\beta$ decays of ^{116}Cd into the excited states of ^{116}Sn with NEMO-3

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

T. Le Noblet, juillet 2018

Latest results from NEMO-3 and commissioning status of SuperNEMO
TAUP 2017— XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, Sudbury, Canada

A. Remoto, juillet 2015

Latest results from NEMO-3 and status of SuperNEMO
European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP), Vienne, Autriche

B. Remoto, mars 2015

Latest results from NEMO-3 and status of SuperNEMO
XVI International Workshop on Neutrino Telescopes, NeuTel, Venise, Italie

STEREO



A LA RECHERCHE DU NEUTRINO STÉRILE

RÉSUMÉ

STEREO est une expérience étudiant les neutrinos issus des réacteurs nucléaires avec une précision de l'ordre du pourcent à de très courtes distances. Son but est de comprendre si le déficit de neutrinos observé par rapport aux prédictions (appelé « Anomalie Réacteur ») est dû à une oscillation de ces neutrinos en un 4^{ème} état du neutrino, qui serait un neutrino stérile. STEREO est installé à 10 m du cœur du réacteur de recherche de l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble. L'expérience prend des données depuis novembre 2016 et a déjà publié des premiers résultats. Le LAPP a conçu le système de calibration par sources radioactives et a fourni des blindages et des éléments mécaniques à l'expérience, son équipe est également impliquée dans l'analyse des données.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

- 400**) Antineutrinos par jour
- 300**) Jours de données réacteur ON prévus
- 10M**) La distance entre le cœur du réacteur et le centre de STEREO
- 2016**) **10 NOV.** Démarrage de la prise de données
- 2016**) **16 NOV.** Première calibration utilisant le système automatisé du LAPP
- 2018**) **16 MARS** 1^{ers} résultats préliminaires présentés à la conférence Moriond EW 2018, publiés dans Physical Review Letters

INTRODUCTION

La découverte des oscillations de neutrinos est l'un des événements majeurs de ces dernières décennies en physique des particules (prix Nobel 2015), car elle démontre que les neutrinos ont une masse non nulle. Ce fait, qui a été intégré dans le Modèle Standard, reste néanmoins inexplicé. Depuis, un vaste programme expérimental de caractérisation de ces oscillations est en cours. Historiquement, l'oscillation de neutrinos a été suggérée pour expliquer les déficits de neutrinos par rapport aux attentes observés par plusieurs expériences, aussi bien pour les neutrinos du soleil (expérience de Homestake dans les années 1970, et autres plus tard, toutes confirmées par SNO en 2002) que pour les

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

Cinq partenaires collaborent à cette expérience : l'Irfu du CEA à Saclay, l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble, qui accueille le détecteur, le Max-Planck-Institut für Kernphysik à Heidelberg et les laboratoires du CNRS-IN2P3 du LPSC à Grenoble et du LAPP à Annecy.

L'équipe LAPP a été composée de :
Physiciens : P. del Amo Sanchez, H. Pessard

Equipe technique

N. Allemandou, G. Deléglise, I. Gomes Monteiro, F. Peltier, S. Vilalte

Post-docs : W. El Kanawati, V. Sergejeva

Doctorants : L. Manzanillas, L. Labit
Stagiaire M2 : D. Hénaff

neutrinos atmosphériques (Super-Kamiokande, résultat établi en 1998).

Des déficits inattendus de neutrinos sont également apparus dans les données de calibration des expériences sur les neutrinos dont l'élément actif était le gallium (SAGE, GALLEX).

Plus récemment, un déficit de neutrinos a été mis en évidence dans les expériences auprès de réacteurs nucléaires quand on compare les mesures du flux des neutrinos avec les prédictions. Le parallèle avec les expériences historiques menant à la découverte des oscillations est clair : les neutrinos issus des sources de calibration des expériences du gallium ou des réacteurs nucléaires seraient en train d'osciller vers un quatrième neutrino. Celui-ci serait passé inaperçu dans les expériences car il interagirait encore moins que les neutrinos connus avec la matière (d'où le qualificatif de « stérile » donné à ce nouveau type de neutrino). Les parcours des neutrinos étant assez courts dans les deux anomalies, la longueur d'oscillation serait de quelques mètres aux énergies de ces expériences. Ensemble, les deux anomalies pourraient donc être expliquées par un 4ème neutrino (voir par exemple G. Mention et al., Phys. Rev. D 83, 073006 (2011)).

D'autre part les expériences Daya Bay, Double Chooz et Reno ont aussi mis au jour, à partir de 2014, un désaccord entre le spectre en énergie des neutrinos provenant de ces réacteurs et les prédictions, constatant un excès de ~10% aux

énergies proches de 5 MeV. La position privilégiée de STEREO, observant presque exclusivement des fissions d'²³⁵U, permettra d'avancer dans la résolution de ce puzzle.

Plusieurs expériences étudient ces anomalies. L'expérience STEREO, qui est installée à moins de 10 m du cœur du réacteur nucléaire de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, a démarré sa prise de données fin 2016, et celle-ci continuera au moins jusqu'à la fin 2019. Le détecteur est essentiellement un calorimètre à liquide scintillant segmenté suivant l'axe de propagation des neutrinos avec une granularité de 37 cm et une masse totale de 4 tonnes (voir figure [fig. 1]). Le scintillateur est dopé au gadolinium pour signer la détection du neutron du processus de décroissance bêta inverse ($\nu + p \rightarrow e + n$).

Pour compléter les constatations précédentes de l'Anomalie Réacteur, qui ne sont basées que sur des mesures de flux, l'idée dans STEREO est de mesurer avec précision, à différentes distances de la source, le spectre en énergie des antineutrinos issus du réacteur, pour y déceler la déformation induite par l'oscillation avec un 4ème neutrino et mesurer son évolution avec la distance. Une forme bien particulière de cette évolution est attendue dans le cas d'une oscillation. La petite taille du cœur (diamètre inférieur à 40 cm), la courte distance L parcourue par les neutrinos (de 9 à 11 m) et la bonne résolution en énergie du dispositif expérimental permettront de confirmer ou de réfuter l'implication d'un neutrino stérile dans les anomalies.

L'équipe du LAPP a contribué à la conception et à la construction de l'expérience STEREO depuis 2013. Elle a pris en charge le système automatisé de calibration par sources radioactives (essentiel pour une bonne connaissance de la réponse du détecteur), les blindages en plomb et la structure de support de l'ensemble du détecteur et de ses blindages. Les physiciens du LAPP participent activement à la prise de données et à leur analyse, notamment concernant l'étalonnage. Un membre du groupe est aussi responsable de la révision et rédaction des publications scientifiques de l'expérience.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

L'activité du groupe STEREO au LAPP comprend aussi bien une contribution technique qu'un travail dans l'analyse de physique.

Pour la contribution technique, le LAPP a conçu et fabriqué le blindage en plomb de l'expérience, et la structure mécanique de l'ensemble formé par le détecteur et ses différents blindages. Le LAPP a aussi conçu et fabriqué les deux sous-systèmes automatisés de calibration par sources radioactives, et est responsable de leur exploitation.

Le travail de physique a été étroitement lié aux engagements techniques, d'abord avec une thèse sur la caractérisation et le design du système de calibration, puis avec des travaux exploitant les données de calibration : caractérisation et stabilité de la réponse des volumes externes de liquide scintillant et modélisation de cette réponse dans les simulations Monte-Carlo (MC), stabilité et uniformité de la reconstruction de l'énergie déposée, calibration du détecteur avec des rayons gamma de haute énergie venant de sources positionnées à l'extérieur, caractérisation de la non-linéarité de la réponse du liquide scintillant. Une fois les calibrations du détecteur avec des sources extérieures bien maîtrisées, les physiciens du LAPP se sont investis dans la recherche des oscillations, et initié une activité d'analyse statistique des données, dans le but de déterminer des limites supérieures sur les paramètres d'oscillation du neutrino stérile ou leur mesure en cas d'observation.

Les blindages en plomb, la structure mécanique et le transport par coussins d'air

Les neutrinos ayant un très faible taux d'interaction, les expériences neutrinos doivent être protégées des sources externes de bruit de fond. Dans le cas de STEREO, le laboratoire d'accueil, l'Institut Laue-Langevin fournit des neutrons thermiques, issus de son réacteur nucléaire, à des expériences voisines, de physique des matériaux ou de physique nucléaire. Un lourd blindage est donc nécessaire contre ces neutrons, et surtout contre les gammas produits par la capture de ces neutrons dans les environs de STEREO. L'équipe technique du LAPP a conçu, fait fabriquer et assemblé un blindage rapproché de 65 tonnes de plomb, mélangé à de l'antimoine à hauteur de 2,7 % pour en augmenter la rigidité, et coulé en plaques de 10 à 20 cm d'épaisseur (de 5 tonnes) pour garantir une meilleure tenue sismique et une plus grande étanchéité au rayonnement (voir figure [fig. 2]).



Figure 2 : Expérience STEREO lors du montage en été 2016 : châssis en acier (en blanc), plaque de blindage en plomb coulé (en suspension) et plaque de répartition, posée sur un tapis noir permettant le déplacement de l'ensemble sur des coussins d'air.

Event of prompt neutrino candidate :

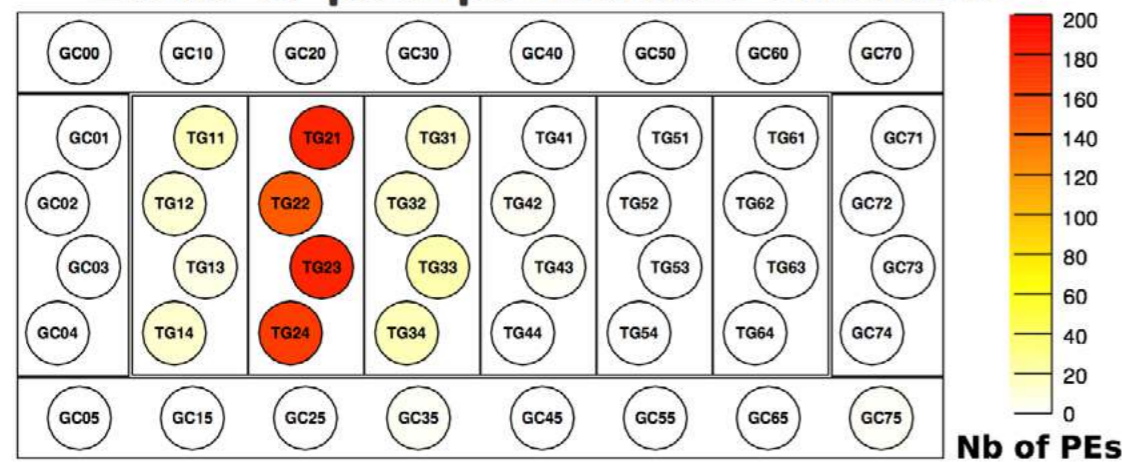


Figure 1 : Vue schématique d'un événement neutrino dans le détecteur STEREO.

L'ensemble du détecteur et différents blindages est soutenu par une structure mécanique en acier (voir [fig. 2]), conçue par nos équipes pour résister à un séisme maximal historique majoré, comme prévu pour les installations nucléaires françaises. Le sol de la structure distribue les efforts de manière à pouvoir déplacer sur coussins d'air l'ensemble, d'une masse totale de 95 tonnes, du point de montage à l'endroit de prise de données. Nos équipes ont développé cette solution de transport ainsi que le système de guidage pour le déplacement.

Les systèmes automatisés de calibration par sources radioactives

Le détecteur STEREO est composé de 10 volumes optiquement indépendants remplis de liquide scintillant. La lumière produite au passage de particules chargées dans le liquide est mesurée à l'aide des tubes photomultiplicateurs. Les volumes les plus externes, entourant les 6 volumes dopés au gadolinium des cibles, sont appelés « Gamma Catchers » (annoté GC sur la figure [fig. 1]). Le rendement lumineux du liquide scintillant dépend de la particule déposant l'énergie (neutron, gamma, positon) et varie de 15 % dans la plage d'énergie correspondant aux neutrinos des réacteurs. La réponse optique de ces volumes dépend de la position du dépôt d'énergie, notamment pour les Gamma Catchers, très allongés. Les systèmes automatisés de calibration jouent le rôle crucial de caractériser la réponse de tous les volumes actifs ; ces volumes doivent pour cela être exposés aux rayonnements gamma et neutron de plusieurs sources radioactives. Deux systèmes se complètent pour cette tâche : le système pantographe et le système de calibration basse (voir figures [fig. 3] et [fig. 4]), capables d'acheminer automatiquement un porte-sources en regard de n'importe quel volume actif de STEREO avec une précision en position meilleure que le cm. Les ingénieurs et techniciens du LAPP ont conçu, développé et mis en œuvre la mécanique, la motorisation et l'automatisme de ces systèmes. Les physiciens du LAPP assurent leur exploitation pendant des campagnes de calibration régulières ; fin 2018, 108 cycles de calibration avaient été réalisés, au cours de 36 jours de calibration.



Figure 3 : Système de calibration externe dit « pantographe » posé sur la double cuve de STEREO lors des tests de positionnement en juillet 2016 : rails supérieur et inférieur guidant le porte-sources tout autour de la cuve contenant le liquide scintillant, moteur (noir) permettant ce déplacement dans le coin le plus proche de l'observateur et capteurs (verts) signalant à l'automatisme que le porte-sources a atteint les positions les plus avancée et reculée.



Figure 4 : Porte-sources circulant sur les rails du système « pantographe ». Les sources d'étalonnage sont insérées dans les encoches cylindriques.



Figure 5 : Installation du système de calibration « pantographe » autour de la cuve de STEREO à l'intérieur des blindages le 31 août 2016.

Conception et test du système de calibration par sources radioactives de STEREO

La définition du système de calibration par sources radioactives de STEREO a fait l'objet d'une thèse, soutenue en octobre 2016 au LAPP par L. Manzanillas. Les études menées à l'aide de simulations ont permis de définir aussi bien l'équipement nécessaire pour calibrer l'expérience que les méthodes pour extraire l'information pertinente des données de calibration. Ainsi, des tubes de calibration permettant d'introduire des sources dans les volumes centraux de STEREO servent à déterminer l'efficacité de détection du neutron venant de la décroissance bêta inverse. Associés aux systèmes extérieurs capables de placer les sources auprès des volumes externes, l'ensemble permet d'établir l'échelle en énergie de tous les volumes actifs avec une précision meilleure que 1 %. Cette configuration rend également possible l'étude d'autres aspects importants de la réponse du détecteur, comme la non-linéarité, la diaphonie entre les différents volumes, la réponse à différentes particules (gamma, neutron) ou la (non-)uniformité de la réponse. Le travail de thèse a débouché sur des tests de l'équipement créé par l'équipe technique du LAPP avant son déploiement sur l'expérience.

Étalonnage de STEREO : exploitation des données de calibration

Une bonne partie du travail d'analyse des physiciens du LAPP s'est tournée vers l'exploitation des données de calibration. En particulier, le groupe a travaillé sur la mesure de la non-linéarité du liquide scintillant. Celle-ci est due au phénomène de quenching, décrit par la loi de Birks selon laquelle le rendement lumineux du scintillateur diminue quand l'ionisation locale produite par la particule augmente, et à l'émission de lumière Tcherenkov, qui croît avec l'énergie et représente environ 5 % de la lumière émise par les positons les plus énergétiques. Nous nous sommes servis de sources gammas pour mesurer le rendement lumineux en fonction de l'énergie, et déterminer la courbe de non-linéarité.

Les calibrations externes ont été utilisées pour caractériser le comportement des Gamma Catchers, en particulier les longs volumes latéraux (échelle en énergie, stabilité dans le temps, non-uniformité de la réponse, collection de la lumière). Ceci a permis d'améliorer le modèle de simulation afin de mieux décrire ce comportement.

La stabilité dans le temps et l'uniformité de la réponse des volumes cibles centraux ont aussi été étudiées en exploitant les échantillons de données collectés avec le système de calibration basse, car celui-ci permet, contrairement aux autres, une exposition de toutes les cellules de STEREO dans les mêmes conditions géométriques. Cette analyse évalue l'écart type dû à la variation dans le temps de l'énergie reconstruite à 0,45 %, et à 1,1 % celui dû à la variation de la réponse individuelle des différentes cellules.

Finalement, le groupe du LAPP a démontré qu'il est possible et avantageux de calibrer les volumes actifs centraux avec une source gamma de haute énergie depuis l'extérieur. En effet, la source de plus haute énergie (Am-Be) émettant à la fois un gamma de 4,44 MeV et un neutron rapide, il est difficile de séparer la réponse du détecteur à ces deux

rayonnements quand la source est logée dans les tubes de calibration interne. Pour les calibrations externes, en revanche, le Gamma Catcher permet de sélectionner les événements où le neutron n'est pas entré dans le détecteur.

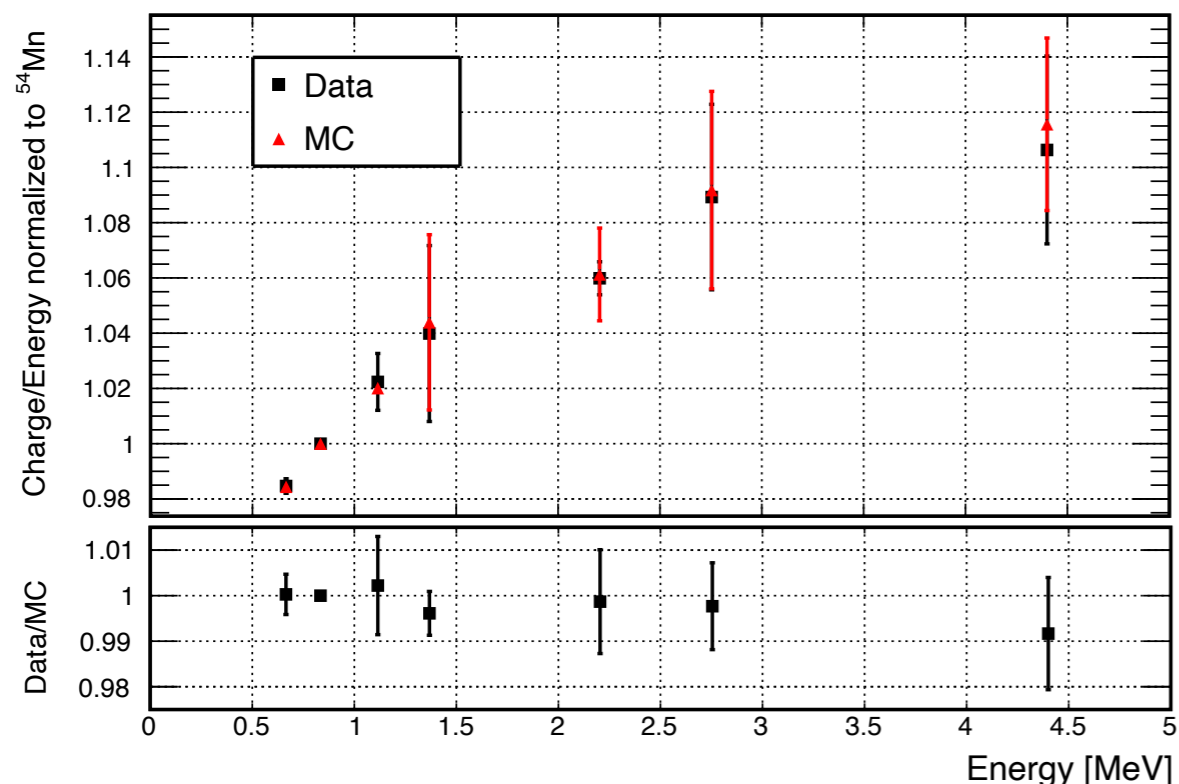


Figure 7 : Rendement lumineux (quantité de lumière détectée par unité d'énergie déposée) du liquide cible de STEREO pour les différentes sources d'étalonnage (carrés noirs) et dans la simulation (triangles rouges).

Activités d'analyse liées à la recherche de l'oscillation de neutrinos

Concernant la recherche des oscillations des neutrinos à très courtes distances, la première contribution du LAPP a été d'estimer le taux de neutrinos issus de la source de démarrage du réacteur de l'ILL. Cette source est logée près du cœur du réacteur et émet elle aussi des neutrinos. Nous avons établi que le nombre de neutrinos détectés venant de cette source est négligeable.

Dans le cadre de la thèse démarrée par L. Labit en octobre 2018, nous avons aussi commencé un travail sur l'analyse statistique du spectre réacteur en vue d'extraire les paramètres d'oscillation d'un éventuel neutrino stérile.

PERSPECTIVES

L'expérience STEREO, en prise de données depuis novembre 2016, étudie les neutrinos issus des réacteurs nucléaires. Son objectif est de confirmer ou infirmer l'hypothèse d'un 4ème type de neutrino (dit « stérile ») comme explication de l'« Anomalie Réacteur », le déficit de neutrinos observé par rapport aux prédictions de flux issus des réacteurs nucléaires. Fin 2019, STEREO aura enregistré l'échantillon total prévu de données et sera en mesure de trancher sur la question. STEREO aura aussi son mot à dire sur l'excès d'événements constaté autour de 5 MeV dans le spectre neutrino observé par les expériences Double Chooz, Daya Bay ou RENO, parmi d'autres. En effet, STEREO devrait publier le spectre en énergie des neutrinos issus de la fission presque pure de l'isotope ²³⁵U, une donnée très attendue par la communauté.

Les physiciens du LAPP continueront à assurer l'exploitation des systèmes de calibration et à se servir de ces données pour améliorer la compréhension du détecteur. Le travail d'analyse statistique devrait déboucher sur des bornes d'exclusion pour les paramètres du neutrino stérile.

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- P. del Amo Sanchez, 2018**
Calibration and Energy Scale in STEREO
ESCAPE 2018, Heidelberg, Allemagne
- V. Sergeeva, 2018**
Light Sterile Neutrino Oscillation Searches
NOW 2018, Ostuni, Italie
- P. del Amo Sanchez, 2017**
Reactor Anti-neutrino Anomaly: alive and kicking!
NuPhys 2017, Londres, Royaume Uni
- L. Manzanillas, 2016**
Status of the STEREO experiment : search for a light sterile neutrino at the ILL
NOW 2016, Otranto, Italie
- P. del Amo Sanchez, juillet 2015**
STEREO: search for a sterile neutrino at the ILL reactor
EPS HEP 2015, Vienne, Autriche

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 N. Allemandou et al.**
The STEREO experiment
JINST 13, 07 (2018) P07009
- 2 H. Almazán et al.**
Sterile Neutrino Constraints from the STEREO Experiment with 66 Days of Reactor-On Data
Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 161801

THÈSES

- L. Manzanillas, octobre 2016**
Development of the source calibration system of the STEREO experiment and search for sterile neutrinos at the ILL

OPÉRA

RECHERCHE ET MESURE DES OSCILLATIONS DE NEUTRINOS



RÉSUMÉ

L'expérience OPERA a pour objectif l'étude des oscillations de neutrinos à l'aide du faisceau CNGS produit au CERN et détecté à 730 km de distance dans le laboratoire du Gran Sasso en Italie. Le groupe du LAPP a été impliqué dans le détecteur au travers des systèmes qu'il avait développés pour la manipulation des cibles et dans les analyses de physique exploitant les interactions enregistrées dans ces cibles. La période de prise de données en faisceau a eu lieu de 2008 à 2012, les années 2013-2018 ont permis de compléter l'extraction des données enregistrées dans les cibles et de terminer les diverses analyses de physique.

Le but principal d'OPERA a été atteint avec la découverte de l'apparition du neutrino-tau dans le faisceau de neutrino-muon du CERN avec un niveau de confiance supérieur à 6 sigmas publié en 2018.

ÉQUIPE DU LAPP

OPERA est une collaboration internationale qui a regroupé une trentaine d'instituts provenant de onze pays et totalisant environ 140 chercheurs. Les 11 pays étaient : Belgique, Croatie, France, Allemagne, Israël, Italie, Japon, Corée du Sud, Russie, Suisse et Turquie.

Les laboratoires français impliqués de 2013 à 2018 étaient l'IPHC Strasbourg et le LAPP Annecy. Au LAPP, les membres de l'équipe étaient P. del Amo Sanchez, D. Duchesneau (responsable de groupe) et H. Pessard, qui est membre du comité des conférences et des publications, après en avoir été président de 2010 à 2014.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2008
2012

Le faisceau CNGS est envoyé sur les 150 000 cibles du détecteur OPERA.

2013
2014

Suite et fin de l'extraction des cibles susceptibles de contenir des interactions neutrino

2015
2016

Dépose complète des cibles de l'expérience à l'aide des manipulateurs du LAPP

2017
2018

Poursuite et complétion des analyses de physique

2019

Dernières publications

INTRODUCTION

La physique des neutrinos est un domaine très actif qui ne cesse de produire des résultats depuis la découverte des oscillations en 1998. Le cadre théorique décrivant le mécanisme des oscillations neutrino au travers d'une matrice de mélange a été conforté. La plupart des paramètres de ce formalisme ont pu être déterminés mais plusieurs questions sur les propriétés des neutrinos restent à élucider, comme leur masse, leur nature, la violation de CP dans le secteur des leptons ou l'existence de plus de 3 types de neutrinos. Ces questions continuent à faire l'objet d'un grand nombre de projets dans le monde entier.

Le groupe neutrino du LAPP a développé depuis le début des années 2000 un programme de recherche axé sur l'étude du mécanisme des oscillations au sein de la collaboration internationale OPERA. L'expérience OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) fait partie d'un programme lancé en Europe après la découverte des oscillations dans les neutrinos atmosphériques. Un faisceau dédié, le CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), a été mis en œuvre au CERN pour envoyer un flux intense de neutrino-mu en direction du laboratoire du Gran Sasso (Italie), où le détecteur OPERA a été construit et a pu collecter plusieurs dizaines de milliers d'interactions neutrino au cours de la période d'activité du faisceau, correspondant à 18×10^{19} protons sur cible, qui s'est achevée en décembre 2012.

OPERA a été conçu pour mettre en évidence l'apparition de neutrino-tau parmi les neutrino-mu du faisceau émis par le CERN, après un parcours de 730 km. L'expérience tentait de détecter les neutrino-tau en utilisant 150 000 cibles faites de plaques de plomb et d'émulsions photographiques, complétées par un ensemble de détecteurs électroniques. OPERA a aussi recherché l'apparition de neutrino-électron pouvant venir d'une oscillation liée à l'angle de mélange θ_{13} .

L'équipe du LAPP a contribué de façon importante au détecteur OPERA tout au long du projet avec la réalisation et l'exploitation du système automatisé pour installer les 150 000 cibles, extraire les cibles désignées pour analyse par les détecteurs électroniques, et démonter ensuite les 130 000 cibles restantes. Les physiciens du LAPP ont participé activement aux opérations de prise et d'extraction des données dont il restait encore environ 40 % du total à étudier en 2013. Ils ont contribué significativement aux analyses de physique ainsi qu'à la publication des résultats dans des revues scientifiques.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

L'équipe du LAPP a eu la pleine responsabilité des robots manipulateurs de cibles depuis la préparation de l'expérience et sa construction. Ce projet essentiel pour le détecteur OPERA a mobilisé, outre la plupart des chercheurs du groupe, une équipe nombreuse d'ingénieurs et de techniciens en mécanique, en automatisme et en informatique. Il s'est poursuivi avec la gestion et le suivi des éléments cibles au cours des années de prise de données. La connaissance de l'historique de l'exposition des cibles dans le faisceau CNGS est restée importante jusqu'à la fin de l'analyse des données.

Dans les analyses de physique, les chercheurs avaient d'abord participé au développement d'outils d'analyse, en particulier pour la mesure des impulsions des traces avec la diffusion multiple dans les plaques de plomb des cibles, qui a servi tout au long de l'expérience. Ils ont aussi été fortement impliqués dans l'étude de l'oscillation des neutrinos-muon vers les neutrinos-tau par la recherche des désintégrations du lepton tau en trois hadrons avec l'étude des fonds correspondants. Ils ont aussi été actifs dans la recherche des désintégrations du lepton tau en électron et de la transformation des neutrinos-tau en neutrinos-électron.

Le système de manipulation de cibles et leur exploitation pour le détecteur OPERA

Le détecteur OPERA a une masse cible totale de 1,25 kilotonne, il est composé de deux super-modules comportant chacun un ensemble de cibles (ou briques) plomb-émulsion suivi d'un spectromètre à muons. Deux manipulateurs permettent d'accéder aux briques de chaque côté de l'expérience. Chaque brique est composée d'un sandwich de 57 films de 300 microns d'épaisseur supportant des émulsions nucléaires et de 56 plaques de plomb de 1 mm d'épaisseur. La brique est un détecteur de très grande précision dont les résolutions spatiale et angulaire sont respectivement de 1 micron et 2 mrad. Le détecteur comporte 150 000 briques d'une masse de 8,3 kg. Chacune doit être installée et manipulée précisément dans les murs de support grâce aux manipulateurs.

La description détaillée des systèmes peut être trouvée en référence [10].

L'équipe du LAPP a conçu, développé et mis au point la mécanique, la motorisation et l'automatisation des éléments des manipulateurs de briques et des diverses parties associées. Elle en a aussi réalisé toutes les parties logicielles, qui ont été étendues à la gestion des briques dans l'ensemble des opérations subies entre leur insertion dans le détecteur et leur démantèlement avant de développer les films. Les figures [fig. 1] et [fig. 2] montrent deux vues des manipulateurs de briques en cours de fonctionnement au laboratoire souterrain du Gran Sasso.



Figure 1 : Plateforme d'un des manipulateurs en position élevée le long du portique pour accéder une rangée de briques de la cible OPERA.

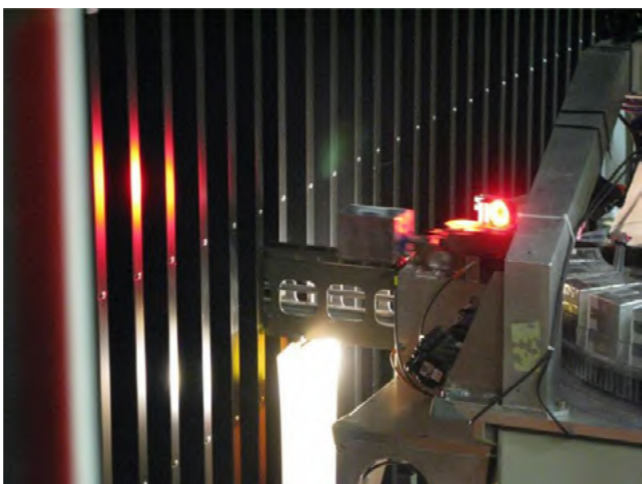


Figure 2 : Extraction d'une brique grâce à un petit véhicule motorisé à ventouse.

Au cours de l'expérience, l'exploitation des manipulateurs pour la production de physique a été un élément principal de la chaîne d'acquisition d'OPERA d'abord pendant les prises de données du CNGS, puis pendant les années 2013 et 2014. L'équipe du LAPP a développé les procédures d'extraction pour les briques désignées par les détecteurs électroniques comme pouvant contenir des interactions de neutrino en utilisant des petits véhicules motorisés à ventouse capables de pénétrer dans les rangées.

Sur la période complète 2008-2014, l'activité d'extraction s'est traduite par la manipulation et le suivi de 300 000 mouvements de briques, ce qui correspond au déplacement de deux fois l'ensemble de la cible (2500 tonnes) dans cet intervalle. Les deux machines ont extrait 26 100 briques « candidates » pour analyse détaillée ultérieure à l'aide des systèmes de scanning par microscopes automatisés (voir figure [fig. 3]). A partir de janvier 2015, les manipulateurs ont été utilisés à 100% du temps pour décharger les briques restantes en respectant leur intégrité afin de récupérer ultérieurement leurs composants (plaques de plomb et émulsions photographiques). Cette opération s'est déroulée sur environ 18 mois. L'évolution du contenu de la structure cible d'OPERA au fil des années est décrite figure [fig. 4].

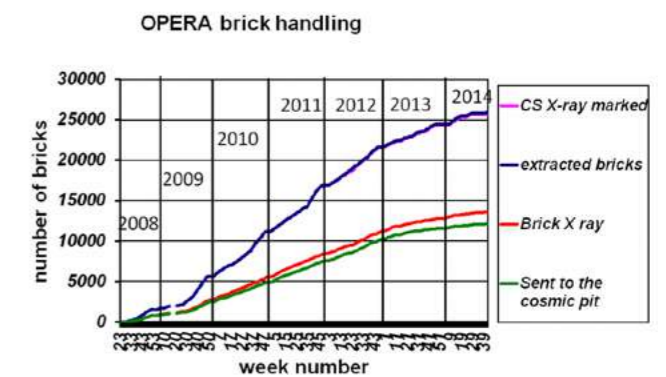


Figure 3 : Progression du nombre de briques extraites en fonction du temps, entre 2008 et 2014. La figure montre aussi les activités annexes de manipulation des cibles extraites, suivies par les logiciels du LAPP, qui vont de l'exposition immédiate à des rayons X pour l'alignement des feuilles amovibles (CS) à l'exposition à des rayons cosmiques pour l'alignement des films d'émulsions avant leur développement.

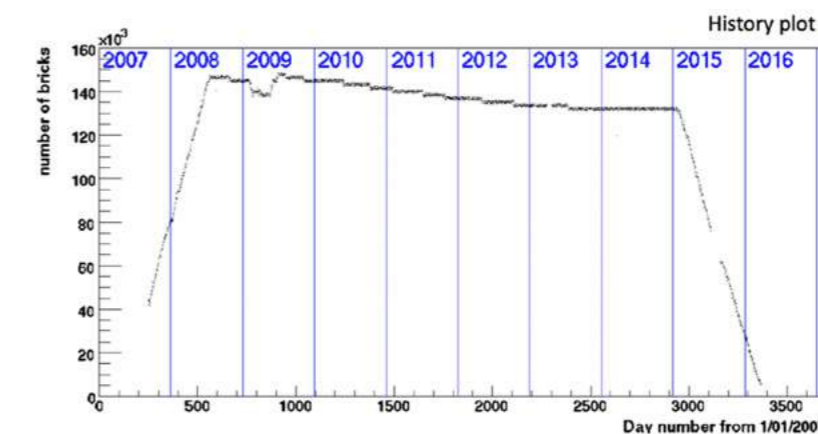


Figure 4 : Évolution du contenu en éléments cibles du détecteur OPERA de 2007 à 2016. Les diminutions régulières de 2008 à 2014 sont dues à l'extraction des briques pour analyse (en 2009, le remplacement d'une série de briques est la cause de l'irrégularité observée).

La complétion de l'analyse des données d'OPERA et la publication des résultats de physique dans des journaux à comité de lecture

La période 2013-2018 a vu pour OPERA la continuation des recherches en cours et leur mise à jour avec toute la statistique accessible après scanning des émulsions de toutes les briques pouvant potentiellement contenir des événements intéressants. Les briques désignées comme contenant une interaction de neutrino sont toujours examinées. On recherche d'abord la localisation du vertex d'interaction en remontant les traces chargées émergeant à l'aval de la brique. Ensuite, autour de ce vertex on recherche dans un volume de l'ordre du cm^3 d'autres traces qui pourraient pointer au même vertex et former un coude ou le V^0 d'une désintégration, ou encore une gerbe électromagnétique. Si tel est le cas, l'événement est scruté dans beaucoup plus de détails pour reconstituer sa cinématique. C'est le principe de la recherche des leptons tau produits par l'interaction d'un neutrino-tau. Après une courte trace de l'ordre du mm, ils se désintègrent en un ou plusieurs hadrons, ou en un muon, ou en un électron.

La découverte dans les données de nouveaux candidats tau (après le premier publié en 2011) s'est produite en 2013 puis en 2014 [7], encore une fois en 2014 puis en 2015 où une signifiante supérieure à 5 sigmas a été atteinte avec un 5^e candidat tau [4]. Une nouvelle approche admettant plus de bruit de fond a finalement permis d'atteindre une signifiante au-delà de 6 sigmas avec 10 événements candidats tau [2].

Des études complémentaires ont concerné la recherche dans le faisceau CNGS d'interactions de neutrino-électron pouvant être dues à une oscillation liée à l'angle de mélange θ_{13} , autorisée dans un modèle classique à 3 neutrinos. Le bruit de fond relativement important et irréductible de neutrino-électron présents dans le faisceau lui-même n'a permis que de fixer des limites supérieures à la contribution de l'oscillation. Un premier article a été publié en 2013 [8], un second utilisant toute la statistique CNGS disponible est paru en 2018 [3].

Les résultats en apparition de neutrino-tau ont été exploités pour dériver des limites sur l'existence d'un neutrino stérile massif en 2015 [5]. En 2019, les résultats en apparition de neutrino-tau et de neutrino-électron dans le faisceau CNGS ont été conjointement utilisés pour améliorer ces limites sur un neutrino stérile [1].

Une publication finale en 2013 sur une mesure de précision de la vitesse des neutrinos sur la base des 730 km séparant le CERN du Gran Sasso a conclu les mésaventures de l'année 2011 [9].

Un sous-produit de l'expérience a été la mesure des muons atmosphériques de très haute énergie (au-delà du TeV) traversant la montagne qui surplombe le laboratoire du Gran Sasso [6].

Les analyses de données de l'expérience OPERA se sont achevées en 2018, laissant pour l'année 2019 uniquement la finalisation et la publication dans des journaux à comité de lecture d'un ou deux derniers articles.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1** Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), Phys.Rev. D100 (2019) no.5, 051301. e-Print: arXiv:1904.05686 [hep-ex]
- 2** Final results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS beam, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.21, 211801, Erratum: Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.13, 139901. e-Print: arXiv:1804.04912 [hep-ex]
- 3** Final results of the search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), JHEP 1806 (2018) 151. e-Print: arXiv:1803.11400 [hep-ex]
- 4** Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), Phys. Rev.Lett. 115 (2015) no.12, 121802. e-Print: arXiv:1507.01417 [hep-ex]
- 5** Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), JHEP 1506 (2015) 069. e-Print: arXiv:1503.01876 [hep-ex]
- 6** Measurement of the TeV atmospheric muon charge ratio with the complete OPERA data set, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), Eur.Phys.J. C74 (2014) 2933. e-Print: arXiv:1403.0244 [hep-ex]
- 7** Evidence for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), Phys.Rev. D89 (2014) no.5, 051102. e-Print: arXiv:1401.2079 [hep-ex]

- 8** Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam, by N. Agafonova et al. (OPERA Collab.), JHEP 1307 (2013) 004. e-Print: arXiv:1303.3953 [hep-ex]
- 9** Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data, by T. Adam et al. (OPERA Collab.), JHEP 1301 (2013) 153. e-Print: arXiv:1212.1276 [hep-ex]
- 10** The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam, by R. Acquafredda et al. (OPERA Collab.), JINST 4 (2009) P04018.

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- H. Pessard, October 2017**
"Recent results of the OPERA neutrino experiment", 16th Mexican Workshop on Particles and Fields, Puerto Vallarta
- D. Duchesneau, September 2016**
"Results from the OPERA long baseline neutrino experiment", Physics in Collision, Quy-Nhon
- D. Duchesneau, London, July 2016**
"Latest results from the OPERA experiment", Neutrino-2016
- D. Duchesneau, September 2013.**
"Recent results from the OPERA experiment", TAUP-2013, Asilomar Ca.

PHYSIQUE DES NEUTRINOS, OSCILLATIONS ET VIOLATION CP DANS LE SECTEUR LEPTONIQUE

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la physique des neutrinos et plus précisément la recherche de violation de CP dans le secteur leptonique et la détermination de la hiérarchie de masse, le LAPP travaille sur les projets de détecteur massif associé à un faisceau neutrino longue distance pour répondre à ces questions fondamentales. Après avoir participé au programme européen LAGUNA-LBNO, le groupe s'est notamment intéressé à la technologie des TPC à argon liquide de grande taille en mode double phase. Il a mis en place un programme axé d'une part sur des développements techniques en mécanique et électronique sur les éléments clés de détection qui sont les plans de lecture des charges et la lecture des photodétecteurs et d'autre part sur le développement de l'expertise dans la physique de la lumière de scintillation dans l'argon liquide.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration WA105/ProtoDUNE DP est constitué de 14 instituts dont 4 laboratoires de l'IN2P3 (APC, LPHNE, IPNL, LAPP) et l'Irfu du CEA.

L'équipe LAPP a été composée de :

Physiciens

I. de Bonis, D. Duchesneau, Y. Karyotakis

Equipe technique

B. Aimard, N. Allemandou, G. Balik, L. Brunetti, M. Cailles, S. Cap, A. Dalmaz, G. Deleglise, C. Drancourt, N. Geffroy, J.M. Nappa, F. Peltier, S. Vilalte

Post-doc

L. Zambelli

Doctorant

A. Chappuis

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2013

Début de la participation du LAPP au projet WA105.

Mise en route du détecteur prototype 3x1x1 m³ et prise de données.

2017

2014

Premier design du système d'automatisation des suspensions pour le prototype 3x1x1 m³ et publication du TDR du détecteur prototype de 6x6x6 m³ au CERN

Construction des plans de lecture (CRP) de ProtoDUNE-DP et début du montage du détecteur dans le cryostat de NP02.

2018

2015

Début de l'activité d'analyse sur la lumière de scintillation et simulation.

INTRODUCTION

Le cadre scientifique dans lequel s'insère le projet WA105/DUNE est la physique des neutrinos. Dans la quête de la violation de CP dans le secteur leptonique et la détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos, un projet de faisceau neutrino de haute intensité et de longue distance est en cours de développement aux Etats-Unis. Il utilisera un faisceau neutrino (LBNF) produit au Fermilab près de Chicago qui sera envoyé en direction de la mine de Sanford située à 1300 km de distance dans le Dakota du Sud. Un détecteur géant (DUNE) composé de 4 modules TPC de 10 kt d'argon liquide permettra d'étudier les interactions des neutrinos de ce faisceau. Chacun de ces modules occupera une des 4 cavernes prévues à cet effet.

Pour construire et mettre en œuvre un détecteur de type TPC à argon liquide (LArTPC) de cette dimension il est nécessaire de réaliser des démonstrateurs à grande échelle. Ceux-ci doivent permettre de valider les procédures de construction, d'installation, de mise en œuvre ainsi que déterminer les performances des technologies qui seront utilisées pour réaliser les TPC de 10 kt de DUNE. Ils permettront aussi de développer les algorithmes d'identification de particules et de reconstruction des événements ainsi que les méthodes de calibration.

Le groupe neutrino du LAPP est investi dans ce projet depuis 2013 avec le développement d'un prototype TPC à argon liquide et a rejoint la collaboration DUNE en 2015.

Deux approches technologiques sont considérées pour ces modules : la technologie dite simple phase, comme celle employée par Icarus, et la technologie double phase dans laquelle le LAPP s'est impliqué et qui offre un certain nombre d'avantages pour ce qui concerne le rapport signal sur bruit, le seuil minimum de détection en énergie et le ratio volume sur nombre de canaux de lecture entre autres. La collaboration WA105 a développé successivement deux prototypes double phase. Un premier démonstrateur de volume 3 m³ (appelé 3x1x1) pour lequel le LAPP a développé le système de suspension du plan de lecture des charges et qui a pris des données en 2017. En parallèle le groupe a pris en charge et développé la mécanique des plans de lecture

et l'électronique des photodétecteurs pour le deuxième prototype double phase de volume 6x6x6m³ (appelé 6x6x6) qui est construit sur le site de la plateforme neutrino du CERN. Celle-ci accueille aussi un prototype simple phase de dimension similaire à WA105 (6mx6mx6m). Les deux projets sont intégrés depuis le printemps 2016 au projet DUNE sous les noms de Protodune-DP et ProtoDUNE-SP pour double et simple phase respectivement.

Le groupe du LAPP s'est impliqué dans la prise de données du premier démonstrateur et les développements des programmes de reconstruction et de simulation pour l'étude de la collection de charge et de lumière de scintillation de ces grandes TPC.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Le groupe du LAPP s'est engagé avec 3 autres laboratoires de l'IN2P3 (APC, IPNL et LPNHE) dans le projet WA105 en 2013.

Les activités de recherche du groupe du LAPP dans le projet WA105 couvrent plusieurs volets : la préparation et la mise en route du prototype 3x1x1, le développement des outils d'analyse, l'analyse des données cosmiques, le développement des systèmes de suspension et la mécanique des plans de lecture et l'électronique des photodétecteurs du prototype 6x6x6.

Préparation et exploitation du prototype 3x1x1

Lors de la phase finale de la construction du démonstrateur 3x1x1 le groupe a participé activement au montage et aux tests au CERN avec des activités de câblage, installation, calibration et caractérisation. Il a aussi participé à l'analyse des mesures du bruit électronique et à la calibration de l'électronique de lecture. La construction s'est achevée début 2017.

La mise en route et la prise de données en rayons cosmiques a duré quatre mois entre juin et novembre 2017.

Etude de la reconstruction des traces des particules chargées

En parallèle à la mise en route du prototype 3x1x1, une activité de développement et d'amélioration du code de simulation et de reconstruction de l'expérience a été effectuée, en particulier, en développant un algorithme robuste et rapide de reconstruction des traces en deux dimensions. Le groupe a contribué activement à la rédaction d'un article détaillant la construction et l'opération du démonstrateur [2].

Le groupe du LAPP a apporté une contribution importante dans l'analyse des données collectées en développant plusieurs filtres de réduction du bruit et en optimisant les algorithmes de recherche de hits et de reconstruction des traces. Cela a permis de fournir les premiers résultats d'analyse des données du démonstrateur, dont la pureté de l'argon liquide ainsi que la mesure du gain effectif. L'étude de la pureté de l'argon liquide est obtenue via la mesure du temps de vie de l'électron en étudiant l'évolution de la charge déposée en fonction de la distance de dérive. Les résultats indiquent une très bonne pureté de l'Argon liquide équivalent à une concentration d'impuretés d'environ 0.07 partie par milliard comme illustré sur la figure [fig. 1]. Un article détaillant les résultats d'analyses de ces données cosmiques prises avec le démonstrateur est en préparation.

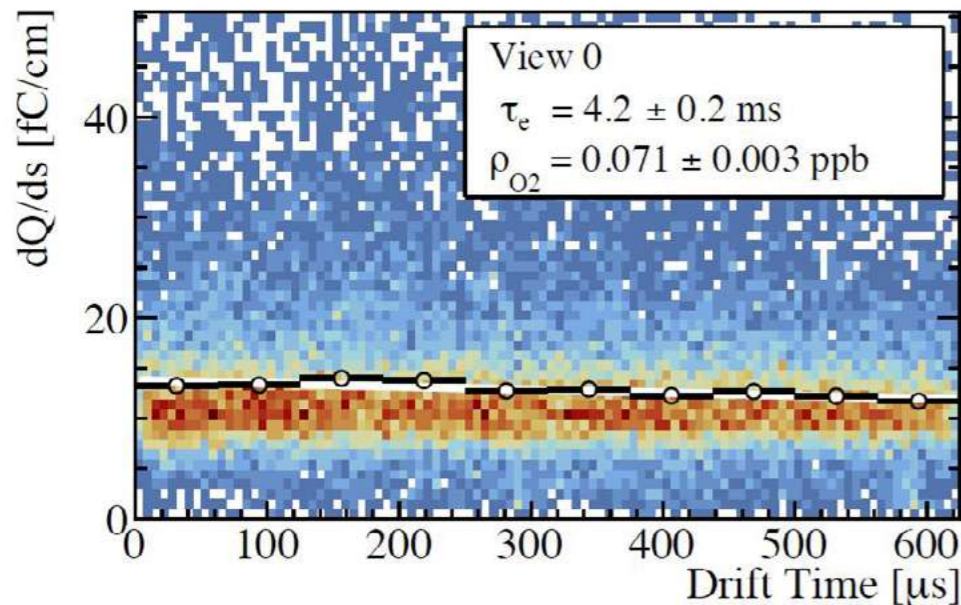


Figure 1: Distribution de la charge collectée en fonction de la distance de dérive dans le prototype 3x1x1 de TPC argon liquide double phase. L'ajustement donne un temps de vie moyen des électrons de l'ordre de 4ms ce qui se traduit par une pureté de l'argon meilleur que 0.07 partie par milliard.

Etude de la simulation de la lumière de scintillation dans l'argon liquide

Le signal lumineux dans une LArTPC est caractérisé par deux temps de vie, dont l'un est de l'ordre de quelques ns. En plus de déterminer le temps de référence t_0 de chaque trace nécessaire à la reconstruction, la collection de cette lumière permet d'améliorer la calorimétrie de l'expérience (l'énergie déposée par ionisation est dissipée par l'émission d'électrons ou de photons). Pour un détecteur souterrain comme DUNE, la lumière servira de trigger interne pour enregistrer des événements rares hors faisceaux comme les neutrinos émanant de l'explosion d'une Supernova ou bien la désintégration du proton. Une simulation de la lumière dans le module LArTPC-DP est obligatoire pour optimiser la disposition des PMT en vue d'améliorer la sensibilité à déclencher l'acquisition de ces événements.

Le travail de simulation de la lumière de scintillation effectué par l'équipe du LAPP a permis de positionner le groupe comme responsable de ce thème pour le projet. Ce travail a fait l'objet d'une thèse (A. Chappuis) et comporte plusieurs aspects dont l'optimisation de la conception du détecteur. L'implémentation détaillée des géométries dans le logiciel de simulation a permis d'étudier leur impact sur la collection de lumière

et ainsi de définir la configuration optimale pour positionner les 36 photomultiplicateurs dans le cryostat de ProtoDUNE-DP.

Un autre volet de cette étude a été le développement de la procédure de génération de « cartes de lumières » paramétrant la propagation des photons dans le détecteur pour les prototypes 6x6x6 et 3x1x1. La figure [fig. 2] montre le parcours des photons émis au centre de détecteur prototype 3x1x1 par une simulation GEANT4. Grâce à la chaîne complète de simulation incluant les cartes il a été possible d'étudier pour la première fois l'impact des paramètres de propagation des photons sur la collection de lumière et cela en comparant les données de lumière du prototype 3x1x1 avec la simulation.

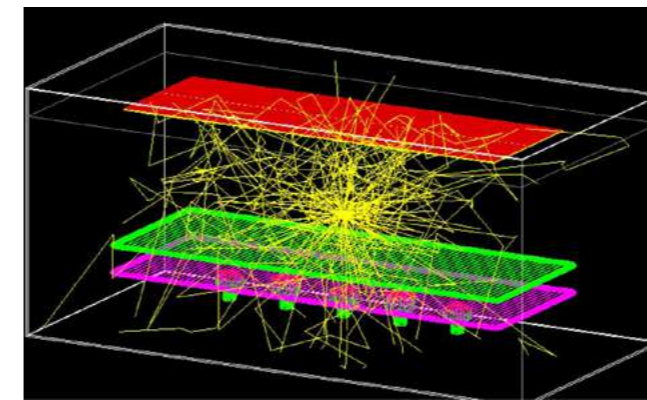


Figure 2 : Simulation avec le logiciel GEANT4 du parcours des photons émis au centre de détecteur prototype 3x1x1. Les trajectoires ne sont pas rectilignes du fait de la diffusion Rayleigh de la lumière dans l'argon qui vaut 55 cm dans ce cas.

Simulation et optimisation des faisceaux pour ProtoDUNE

Le groupe s'est aussi chargé de la simulation et de la conception des systèmes de caractérisation des particules sur la ligne de faisceau de basse énergie destiné aux détecteurs ProtoDUNE simple et double phase. Ce travail effectué en 2016 a permis de définir l'instrumentation faisceau dans le hall EHN1 du CERN. Les tests et le commissioning de la ligne ont été réalisés en 2018.

RÉALISATIONS TECHNIQUES

Le LAPP a eu d'importantes contributions techniques dans WA105/DUNE couvrant trois volets : la mécanique et le système de suspension du plan d'anode (Charge Readout Plane CRP) et

l'électronique de lecture des photomultiplicateurs pour la lumière de scintillation

Le LAPP a réalisé le système de suspension du plan d'anode pour le pré-prototype 3x1x1 qui a été installé, testé et mis en fonction en 2017. Ce système a permis de maintenir la hauteur du plan de lecture par rapport à la surface d'argon liquide constante au cours du temps. Les choix techniques et les développements correspondants ont été repris pour la définition du système de suspension du détecteur 6x6x6 de ProtoDUNE-DP.

L'autre implication majeure est la conception et la gestion de la réalisation des structures mécaniques des 4 modules de plans d'anode du prototype 6x6x6, ainsi que leur positionnement. La figure [fig. 3] est un dessin d'ingénierie illustrant le design élaboré par le LAPP de la structure mécanique des plans d'anode (CRP) du détecteur ProtoDUNE-DP. Chacun des plans couvre 9 m² et consiste en une structure en invar sur laquelle est attachée avec des système de découplage une structure en fibre de verre (G10) qui sert de support pour les éléments de détection ainsi que la grille d'extraction. Le travail de fond effectué et les résultats présentés régulièrement par l'équipe ont permis en 2014 d'attribuer au LAPP l'entière responsabilité des structures mécaniques. En moins d'un an, les idées du LAPP sont devenues la référence pour des solutions qui intègrent les fils de grille, les capteurs de distance ainsi que les interfaces comme les patch panels connectant tous les capteurs, les alimentations HV et tous les systèmes de mesures qui seront nécessaires.

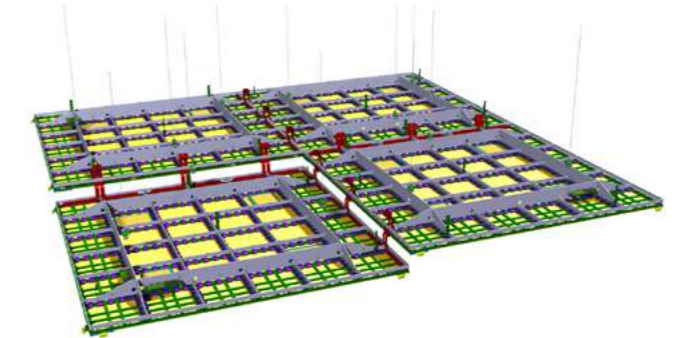


Figure 3 : Dessin d'ingénierie illustrant le design élaboré par le groupe du LAPP de la structure mécanique des plans d'anode (CRP) du détecteur ProtoDUNE-DP.

Le laboratoire a mené des calculs thermomécaniques ainsi que des tests cryogéniques pour sécuriser le design proposé. Les caractéristiques et le comportement de l'ensemble à la température de l'argon liquide (87 K) permettent d'assurer une précision sur la planéité de l'ordre du mm sur toute la surface. La conception des composants principaux a été finalisée en 2016. De plus, des études concernant les problématiques d'intégration, de montage et d'installation dans le cryostat ont été approfondies en 2017. Celles-ci ont nécessité des travaux sur les outillages, la logistique ainsi que la métrologie des structures, primordiale pour les performances de physique.

Les étapes suivantes ont été réalisées pendant les années 2017 et 2018:

- Validation du design avec tests en froid.
- Finalisation du design.
- Tests et optimisation du banc de tressage des modules de grille d'extraction.
- Installation d'équipements de fabrication dans une salle blanche au CERN.
- Placement des commandes de tous les éléments pour l'assemblage des CRPs et suivi de production.
- Fabrication et montage des plans de lecture (CRP) en salle blanche au CERN.
- Tests des CRPs dans un cryostat spécial (Cold Box) pour vérifier le comportement mécanique dans l'argon liquide et gazeux et la tenue des hautes tensions.

Suite aux résultats des tests dans la Cold Box, plusieurs modifications ont été appliquées sur les distributions de haute tension ainsi que sur la tension initiale de la grille d'extraction. Après validation le premier CRP a pu être installé dans le cryostat de ProtoDUNE-DP courant 2018 comme le montre la figure [fig. 4].

En parallèle à la construction des CRP, une partie de l'activité mécanique a concerné le développement et la réalisation du système automatisé de contrôle du positionnement du plan de lecture conçu pour garantir une précision de 0.1 mm sur la position des CRP par rapport au niveau du liquide.

Ce système est constitué de 12 moteurs pour les 4 plans de lecture.

Le troisième volet technique concerne le développement de l'électronique de lecture des photomultiplicateurs pour détecter la lumière de scintillation en partenariat avec l'APC et le pôle Omega. La partie couverte par le LAPP consiste en la fabrication d'une carte mezzanine et son intégration sur une carte dédiée dans un châssis micro TCA utilisé pour la DAQ. L'expertise de l'équipe a permis d'organiser les développements avec les ingénieurs de l'APC et de couvrir la gestion d'une partie du projet.



Figure 4 : Installation du premier CRP dans le cryostat de l'expérience ProtoDUNE-DP.

PERSPECTIVES

Les perspectives d'activités concernent l'analyse de données, la construction de ProtoDUNE-DP ainsi que des études pour la conception des détecteurs lointains de DUNE.

L'année 2019 verra la fin de la construction de ProtoDUNE-DP ainsi que le démarrage de l'expérience. Le groupe du LAPP sera impliqué dans l'installation finale des plans d'anodes et

du système de contrôle de position des CRPs du 6x6x6.

Sur le volet analyse, la première étape va consister à terminer l'analyse des données du 3x1x1 à la fois des charges et de la lumière de scintillation pour terminer les publications associées. Les activités d'analyse se poursuivront naturellement par l'exploitation des données du détecteur 6x6x6 à partir de 2019 de manière à fournir les résultats permettant de valider la technologie TPC double phase pour DUNE. Il est prévu d'une part de poursuivre les simulations sur la lumière de scintillation dans l'argon liquide et d'autre part de développer les algorithmes de reconstruction dans les TPC de ProtoDUNE-DP et du module de détecteur lointain de 10 kt pour préparer la physique de DUNE.

En vue de la préparation du TDR décrivant le module du détecteur lointain en double phase de DUNE l'équipe développera le design des plans CRP en profitant de l'expérience acquise lors de la construction, l'installation et la mise en œuvre de ProtoDUNE-DP au CERN.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 **DUNE Collaboration, B. Abi et al.**
The Dune Far detector Interim Design Report, Vol. 1, 2, 3
arXiv:1807.10334 arXiv:1807.10327, arXiv:1807.10340; (Volume 3: Dual-Phase Module)
- 2 **B. Aimard et al.**
A 4 tonne demonstrator for large-scale dual-phase liquid argon time projection chambers, B. JINST 13, P11003 (2018)
- 3 **DUNE Collaboration, R. Acciarri et al.**
Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) : Volume 4 The DUNE Detectors at LBNF
arXiv:1601.02984 [physics.ins-det].
- 4 **DUNE Collaboration, R. Acciarri et al.**
Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) : Volume 2: The Physics Program for DUNE at LBNF
arXiv:1512.06148 [physics.ins-det].

- 5 **I. De Bonis et al.**
LBNO-DEMO: Large-scale neutrino detector demonstrators for phased performance assessment in view of a long-baseline oscillation experiment
CERN-SPSC-2014-013, SPSC-TDR-004

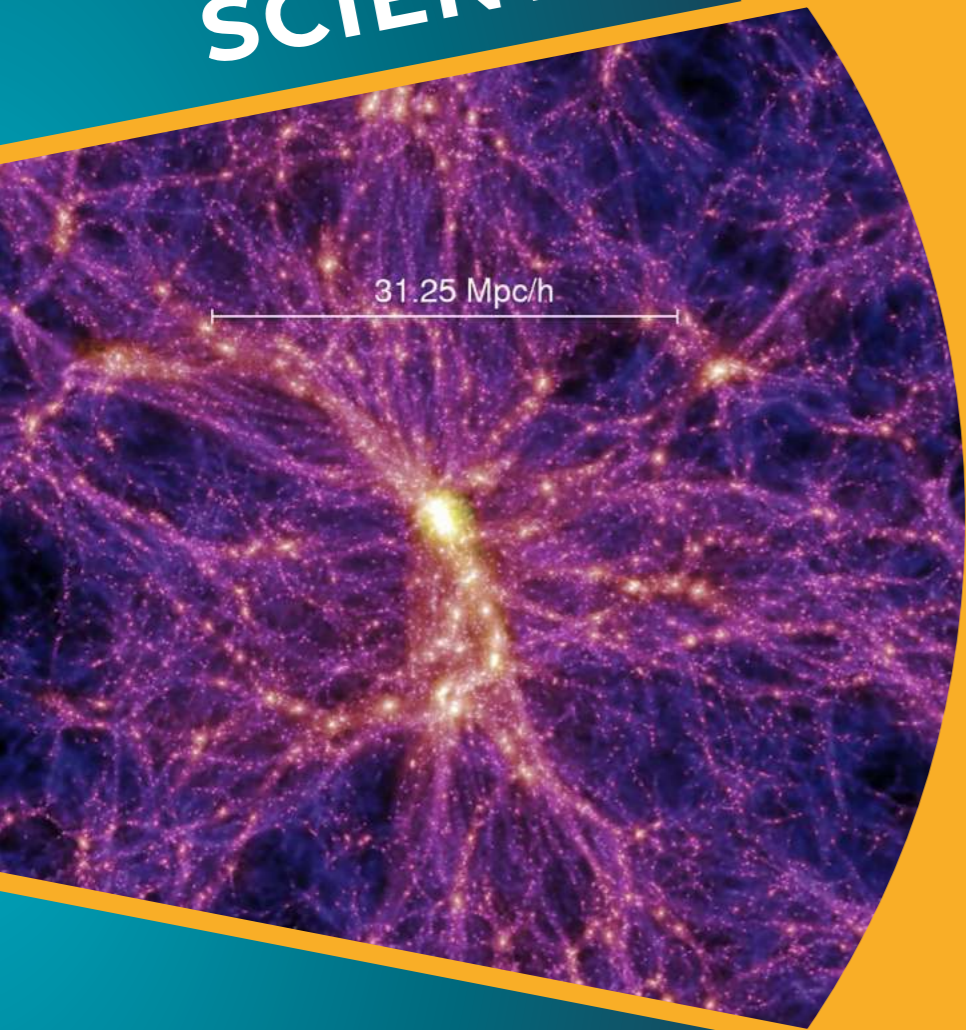
THÈSES

- A. Chappuis, octobre 2018**
Étude et simulation de la lumière de scintillation produite et se propageant dans une chambre à dérive double-phase à argon liquide, dans le contexte du projet DUNE

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- L. Zambelli, juillet 2018**
Poster : Data reconstruction and analysis of the 3x1x1 Dual Phase Lar TPC
ICHEP 2018 - 39th International Conference on High Energy Physics, Seoul, Corée du Sud
- L. Zambelli, Juin 2018**
Poster: First Operation of the ton scale Lar TPC Neutrino 2018 - XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Heidelberg, Allemagne
- A. Chappuis, Juin 2018**
Poster: Scintillation Light Simulation in the context of DUNE Dual Phase Lar TPC
Neutrino 2018 - XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Heidelberg, Allemagne
- L. Zambelli, juillet 2017**
Status of the wa105 dual phase liquid argon TPC detector
Rencontres du Vietnam : Neutrino, Quy Nhon, Vietnam
- L. Zambelli, juillet 2016**
Présentation: Hadron production experiments to constrain accelerator-based neutrino flux
Poster: WA105: a large demonstrator for the liquid argon double phase TPC
Neutrino 2016 - XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Londres, Angleterre

LES THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES



Astroparticules et cosmologie

AMS



ÉTUDE DES RAYONS COSMIQUES ET RECHERCHE INDIRECTE DE MATIÈRE NOIRE

RÉSUMÉ

Le LAPP participe à l'expérience AMS (Alpha Magnetic Spectrometer, spectromètre magnétique alpha) depuis sa conception à la fin des années des années 1990. AMS est un détecteur de particules, construit par une collaboration internationale, lancé par la NASA en mai 2011 et placé sur la station spatiale internationale (ISS) à 400 kilomètres d'altitude. AMS permet de détecter directement les rayons cosmiques avant leur entrée dans l'atmosphère. Ses buts principaux sont l'étude de la composition et la propagation des rayons cosmiques, la recherche indirecte de matière noire et la recherche d'antimatière. Ces dernières années, le groupe du LAPP s'est particulièrement investi dans l'analyse de données, en étudiant les électrons, les positons et les antiprotons. Un signal anormal provenant de la mesure du flux de ces particules pourrait signer la détection indirecte de matière noire.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration AMS regroupe environ 250 physiciens issus de 31 instituts répartis dans 13 pays. La France est représentée par le LAPP et le LPSC (Grenoble).

Physiciens

G. Coignet, C. Goy, V. Poireau, A. Putze, S. Rosier-Lees, M. Vecchi, J.-P. Vialle

Equipe technique

L. Basara, J. Feng, S. Caroff, L. Tao

Post-docs

L. Basara, J. Feng, S. Caroff, L. Tao F.

Visiteur

Barao (LIP, Portugal)

Stagiaires

M1 (1), M2 (2)

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

- 7,5 t**) Poids
- 4 m**) Hauteur
- 5 m**) Largeur
- <2%**) Résolution en énergie du calorimètre au-delà de 50 GeV
- 2014**) Deux publications sur la fraction de positons et les flux d'électrons et de positons
- 2016**) Publication sur le flux d'antiprotons
- 500**) Rayons cosmiques détectés / seconde en moyenne
- + 120 milliards**) Rayons cosmiques détectés au total pour 2011-2018

Thématiques scientifiques
Astroparticule & cosmologie

INTRODUCTION

AMS est un détecteur de physique des particules, installé le 19 mai 2011 sur la station spatiale internationale à 400 km d'altitude par la navette américaine Endeavour (mission STS-134). De conception très similaire aux expériences que l'on trouve auprès des accélérateurs de particules, ses différents instruments lui permettent de détecter le passage des rayons cosmiques, de mesurer leurs propriétés (charge électrique, énergie) et de déterminer leur nature, avant que ceux-ci ne soient perturbés ou absorbés par l'atmosphère terrestre. AMS a déjà collecté plus de 120 milliards d'événements au total, soit beaucoup plus que tout ce que l'humanité a récolté depuis la découverte du rayonnement cosmique en 1912. Les données produites par l'expérience sont transmises au centre des vols spatiaux de la NASA d'où elles sont envoyées au CERN où se trouve la salle de contrôle d'AMS. Là, elles sont décodées, traitées et enfin mises à la disposition de la collaboration scientifique pour analyse.

L'expérience AMS a pour mission de déterminer la composition du flux des rayons cosmiques de haute énergie qui arrivent sur Terre afin d'en savoir plus sur les sources de ce rayonnement et peut-être d'éclaircir certains des principaux mystères de notre Univers : l'absence d'antimatière et la nature de la matière noire. Les rayons cosmiques sont des messagers uniques qui apportent des informations précieuses sur les phénomènes qui leur ont donné naissance : sources astrophysiques, accélérateurs cosmiques ou encore matière exotique. La collaboration AMS a présenté, avec une précision sans précédent, des résultats portant sur le flux de noyaux légers qui bombardent sans cesse la Terre (protons, noyaux d'hélium, de lithium, etc.), ce qui permet de mieux comprendre la propagation de ces particules dans la Galaxie, de leur source jusqu'à la Terre.

AMS cherche également des traces de la mystérieuse matière noire, et le groupe du LAPP s'est en particulier concentré sur ces enjeux. En s'annihilant en paires particule-antiparticule, les particules de matière noire contribueraient ainsi à accroître la proportion de positons et d'antiprotons dans le rayonnement cosmique.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Le groupe AMS du LAPP a été impliqué dans la construction ainsi que dans toutes les étapes de tests du calorimètre électromagnétique. Le groupe s'est attaché à mesurer et contrôler les performances du calorimètre sur la station spatiale et à développer les outils d'analyse y afférents. Le calorimètre est un élément clef d'AMS car il mesure avec précision l'énergie des électrons et positons et contribue à leur identification. Le groupe s'est donc naturellement consacré à la mesure des flux d'électrons et de positons, ainsi qu'à la mesure du flux d'antiprotons. Toutes ces mesures sont essentielles pour la recherche indirecte de matière noire. Le groupe participe à l'interprétation de ces résultats en collaboration avec le LAPTh.

Calorimètre électromagnétique

Le calorimètre électromagnétique d'AMS consiste en des couches successives de fibres scintillantes insérées dans du plomb, pour une épaisseur totale de 17 cm (correspondant à 17 longueurs de radiation). Il est constitué de neuf (super-)couches, avec une alternance de la direction des fibres scintillantes pour permettre une reconstruction en trois dimensions de la gerbe. La lumière émise dans les fibres est détectée par un ensemble de 324 photomultiplicateurs.

Le système de collection de lumière du calorimètre électromagnétique a été entièrement conçu, produit et testé par les équipes du LAPP. Ce système doit faire face aux nombreuses contraintes de l'espace : fiabilité, faible consommation électrique, compacité, légèreté, robustesse, résistance aux vibrations et aux radiations, pouvant fonctionner entre -30°C et 50°C .

Mesure de l'énergie

Les flux de rayons cosmiques suivent en fonction de l'énergie une loi de puissance avec un indice de l'ordre de 3 ; une erreur sur la mesure de l'énergie se traduit par un grand impact sur la mesure du flux et l'incertitude sur la mesure de l'énergie devient l'incertitude systématique dominante.

La reconstruction de l'énergie des particules électromagnétiques dans le calorimètre a eu plusieurs étapes. En premier lieu, la mesure de l'énergie dans chacune des 1296 cellules du calorimètre est égalisée et corrigée de l'atténuation du signal le long des fibres. Cet ensemble de corrections est contrôlé in situ essentiellement grâce aux protons interagissant au minimum ionisant dans le calorimètre. Par contre, les corrections liées à l'algorithme d'associations des cellules, aux effets de bord des cellules et à la fuite d'énergie à l'arrière ont été ajustées en premier lieu sur les données de tests en faisceaux. D'autres effets comme l'angle d'incidence de la particule sont pris en compte. Enfin la correction de saturation qui permet d'estimer l'énergie des gerbes électromagnétiques au-delà du TeV peut être uniquement évaluée grâce à la simulation.

L'échelle absolue d'énergie est calibrée par les tests en faisceaux. Elle est transposée en vol grâce à la mesure du rapport de l'énergie reconstruite E dans le calorimètre sur la quantité de mouvement p mesurée dans le trajectomètre (figure [fig. 1]). Une méthode complémentaire a été développée par le groupe du LAPP qui s'appuie sur la valeur de l'énergie de coupure due au champ magnétique terrestre et à sa comparaison avec les modèles Störmer et IGRF (International Geomagnetic Reference Field).

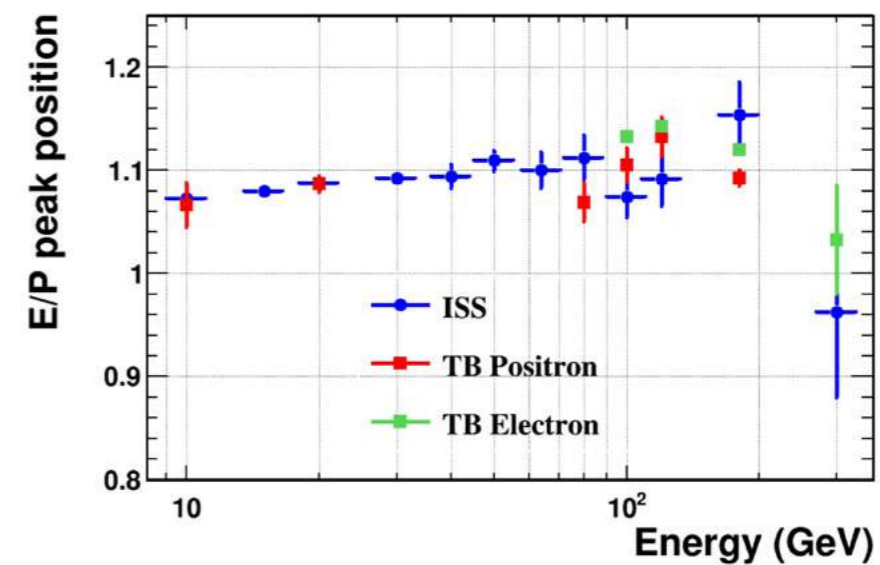


Figure 1 : Rapport de l'énergie E mesurée dans le calorimètre sur la quantité de mouvement P mesurée par le trajectomètre pour des électrons et des positons sélectionnés dans les données de tests en faisceaux (TB) ou de la station spatiale (ISS).

Identification des photons

L'identification des photons dépend de la capacité du calorimètre à identifier les leptons issus de la gerbe électromagnétique, ainsi qu'à discriminer ces leptons des hadrons. La structure du calorimètre fournit une image fine du développement de la gerbe électromagnétique dans les trois dimensions, ce qui permet pour les particules chargées une capacité de réjection hadron/électron voisine de 10^4 , et d'obtenir une précision sur la direction de la particule incidente de $0,5^{\circ}$ à haute énergie, et meilleure que 2° dès quelques GeV. Le calorimètre a un système de déclenchement autonome sur les dépôts d'énergie supérieurs à 1 GeV ayant le profil d'une gerbe électromagnétique. L'efficacité est supérieure à 98 % à partir de 3 GeV. En sélectionnant les gerbes dont l'axe est

contenu dans l'acceptance de l'ensemble du détecteur AMS, et ne donnant pas de signaux dans les détecteurs en amont du calorimètre (et donc sans trace chargée associée), on obtient un lot pur de photons. Un article détaillant la capacité et les performances du calorimètre pour la détection et la mesure des photons a été publié [4]. Pour les photons au-delà de 5 GeV, la précision de la reconstruction angulaire des gerbes permet sur une carte du ciel de distinguer clairement le plan galactique, le centre galactique, et des sources brillantes comme le Crabe, Vela, Geminga, ou Markarian.

Mesure du flux d'électrons

Avec 30 mois de données de vol, de mai 2011 à décembre 2013, le groupe a mesuré le flux de leptons (électrons + positons) et d'électrons dans la gamme d'énergie de 0,5 GeV à 700 GeV. L'identification d'électrons nécessite une séparation électrons/protons de l'ordre de 10^4 , obtenue par l'utilisation conjointe des estimateurs de différents sous-détecteurs d'AMS. Le spectre d'électrons a été mesuré par l'estimateur du calorimètre, outil développé au LAPP. La mesure du flux d'électrons par AMS, actualisée [8], est montrée sur la figure [fig. 2].

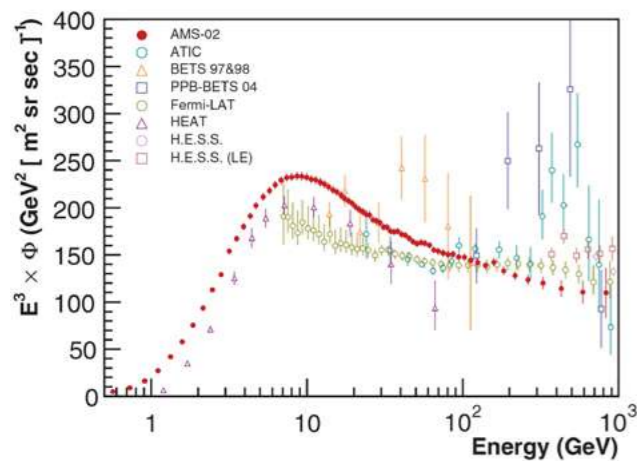


Figure 2 : Flux d'électrons et de positons mesuré par AMS (multiplié par E^3) en fonction de l'énergie. Les résultats d'autres expériences sont également montrés.

Mesure du flux de positons

Si la matière noire s'avère être constituée d'une particule type WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), l'annihilation de ces particules dans le halo galactique pourrait produire des excès de particules chargées détectables par AMS. La présence de structures dans les spectres de positons ou d'antiprotons pourrait signaler indirectement l'existence de particules de matière noire.

Le groupe a ainsi travaillé sur les mesures de la fraction de positons (rapport du nombre de positons sur le nombre total de positons et d'électrons) [9] et du flux absolu de positons [8], qui sont des mesures phares d'AMS. L'équipe a obtenu une mesure de la fraction et du flux de positons en utilisant des méthodes originales, basées sur des analyses combinant différentes

variables pour gagner en sensibilité. Le résultat d'AMS, montré sur la figure [fig. 3] (mis à jour en 2018), a permis d'étendre la mesure à plus haute énergie, jusqu'à 1 TeV, ce qui est bien au-delà du domaine des expériences précédentes, extension qui est capitale pour avoir des indices sur la remontée, et la redescende, de cette quantité. Les données d'AMS améliorent de plus d'un facteur 10 la précision des précédentes mesures, ce qui ouvre la porte à des interprétations beaucoup plus précises. La fraction de positons diminue en fonction de l'énergie en-dessous de 10 GeV, mais remonte après cette énergie. Ceci contredit la prédiction découlant d'une origine seulement secondaire des positons (c'est-à-dire ne provenant pas d'une source, mais de la collision des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire). Cette remontée de la fraction indique qu'il doit exister une source de positons, et donc une contribution nouvelle capable d'expliquer cet excès de positons. Cette nouvelle contribution pourrait être issue de la matière noire, ou plus classiquement, des pulsars, étoiles en rotation rapide sur elles-mêmes.

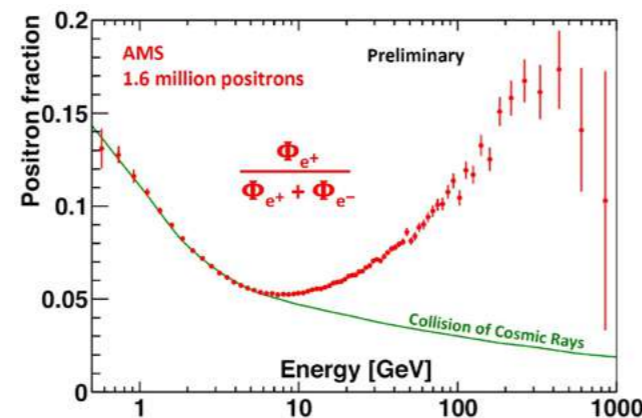


Figure 3 : Fraction de positons (rapport du flux de positons sur le flux total d'électrons et de positons) en fonction de l'énergie (résultat préliminaire de 2018). Les points rouges indiquent la mesure d'AMS, et la courbe verte montre ce que l'on attendrait théoriquement si la seule source de positons venait des collisions des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire.

Mesure du flux d'antiprotons

Le groupe du LAPP a également travaillé sur la mesure du rapport antiprotons sur protons [5]. Un travail d'optimisation sur toute la gamme en énergie a été effectué. En effet, suivant l'énergie considérée, l'analyse utilise différentes techniques expérimentales. Cette étude montre que le rapport antiprotons sur protons augmente jusqu'à une énergie de 10 GeV pour ensuite être plat jusqu'à 500 GeV, énergie maximale pouvant être mesurée par AMS pour ces particules. Ce travail est un résultat majeur de la collaboration AMS car il permet d'éclaircir la contribution de la matière noire dans la production de rayons cosmiques. En effet, les antiprotons ne peuvent pas être produits par des pulsars (contrairement aux positons), et ne peuvent venir, classiquement parlant, que de la collision des protons sur le milieu interstellaire, produisant des antiprotons. Cette contribution des antiprotons secondaires peut être calculée, et comparée avec l'observation d'AMS. Il se trouve que les modèles de propagation sont capables de reproduire les données, même si une explication venant d'antiprotons créés par la matière noire n'est pas exclue. Cette question reste encore largement débattue au sein de la communauté. Les mesures d'AMS sur les flux des noyaux à haute énergie vont permettre de contraindre plus fortement les modèles en réduisant les incertitudes théoriques venant des modèles de propagation.

Interprétations

Le groupe du LAPP travaille en étroite collaboration avec le LAPTh dans le but d'associer les expérimentateurs experts sur les données AMS et les théoriciens capables de modéliser les résultats : nous avons formé, avec également d'autres laboratoires, la collaboration CRAC (Cosmic Ray Alpine Collaboration). L'objectif est d'exploiter les mesures récentes, en particulier les mesures liées aux leptons publiées par AMS. La remontée de la fraction de positons n'était pas attendue initialement et deux explications étaient possibles : l'annihilation de matière noire ou les pulsars. Le groupe CRAC a interprété les données d'AMS en fonction de ces deux hypothèses [6]. Le résultat est en défaveur d'une explication de la remontée de la fraction de positons par la matière noire, car

pour expliquer les données d'AMS la section efficace d'annihilation devrait être plus de 1 000 fois supérieure à ce qui est naturellement prévu par la densité relicue de matière noire. De plus, si l'explication de la matière noire était correcte, alors on attendrait des manifestations dans d'autres canaux tels les antiprotons et les rayons gamma, ce qui n'est pas le cas. Les prédictions pour les pulsars montrent qu'il est possible d'expliquer la remontée de la fraction de positons observée dans les données par des pulsars [fig. 4].

Dans une étude ultérieure [3], la collaboration CRAC a confirmé, en étudiant le flux de positons sur toute la gamme en énergie, que la matière noire ne permet pas d'expliquer l'excès de positons. D'autres études ont été menées sur l'interprétation du rapport bore sur carbone B/C [2]. Le rapport de flux de ces deux noyaux est essentiel pour comprendre la propagation des rayons cosmiques dans la Galaxie. La conclusion de l'étude est l'observation d'une loi de puissance brisée pour le flux B/C, ce qui a été montré pour la première fois, et constitue un résultat très important : cette observation signifie qu'il existe un nouveau phénomène non connu dans la propagation.

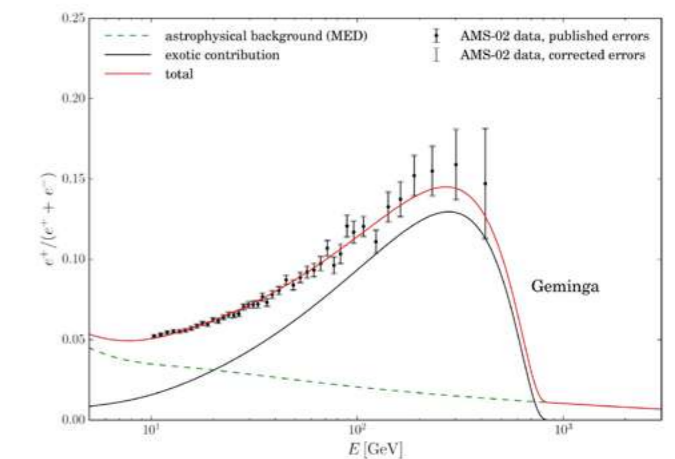


Figure 4 : Fraction de positons ajustée à l'aide de la contribution du pulsar Geminga. La ligne pointillée montre la contribution venant de la collision des rayons cosmiques, la ligne noire la contribution attendu pour ce pulsar, et la ligne rouge la somme de ces deux contributions.

PERSPECTIVES

La collaboration AMS a permis d'explorer avec précision des gammes d'énergie jamais atteintes jusqu'à présent et a publié des résultats majeurs pour la communauté scientifique dans de nombreuses publications. Il faut noter qu'AMS est la seule expérience actuelle dans l'espace à disposer d'un aimant.

Le groupe du LAPP, présent depuis 1996 dans la collaboration AMS, met un terme à son activité en 2018, tout en continuant son activité d'interprétation avec la collaboration CRAC. L'expérience AMS est prévue pour être exploitée jusqu'en 2024, et des mesures phares, requérant une statistique très élevée, restent encore à publier par la collaboration. Les données sur les isotopes et leur rapport de flux, qui sont des mesures très attendues, vont être étudiées très en détail par la collaboration. De même, la recherche de noyaux d'antimatière nécessite un lot de données gigantesque, et une découverte aurait un impact fondamental sur notre vision de l'Univers.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 M. Aguilar et al. (AMS collaboration)**
Observation of Complex Time Structures in the Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer
Physical Review Letters 121, 051102 (2018)
- 2 Y. Genolini, P. D. Serpico, M. Boudaud, S. Caroff, V. Poulin, L. Derome, J. Lavallo, D. Maurin, V. Poireau, S. Rosier, P. Salati, M. Vecchi**
Indications for a High-Rigidity Break in the Cosmic-Ray Diffusion Coefficient
Physical Review Letters 119, 251101 (2017)
- 3 M. Boudaud, E. F. Bueno, S. Caroff, Y. Genolini, V. Poulin, V. Poireau, A. Putze, S. Rosier, P. Salati, and M. Vecchi**
The pinching method for Galactic cosmic ray positrons: Implications in the light of precision measurements
Astronomy & Astrophysics 605, A17 (2017)
- 4 G. Bigongiari, F. Cervelli, G. Coignet, C. Goy, S. Di Falco, I. Guerri, M. Incagli, L. Morescalchi, F. Pilo, S. Rosier-Lees, J.P. Vialle, S. Vitillo**
High energy γ -ray detection with the AMS-02 electromagnetic calorimeter
Nuclear Instruments & Methods A 850, 78-82 (2017)
- 5 M. Aguilar et al. (AMS collaboration),**
Antiproton Flux, Antiproton-to-Proton Flux Ratio, and Properties of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station
Physical Review Letters 117, 091103 (2016)
- 6 M. Boudaud, S. Aupetit, S. Caroff, A. Putze, G. Belanger, Y. Genolini, C. Goy, V. Poireau, V. Poulin, S. Rosier-Lees, P. Salati, L. Tao, M. Vecchi**
A new look at the cosmic ray positron fraction
Astronomy & Astrophysics 575, A67 (2015)
- 7 M. Aguilar et al. (AMS collaboration)**
Precision Measurement of the ($e^+ + e^-$) Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station
Physical Review Letters 113, 221102 (2014)
- 8 M. Aguilar et al. (AMS collaboration)**
Electron and Positron Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station
Physical Review Letters 113, 121102 (2014)
- 9 M. Aguilar et al. (AMS collaboration)**
High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station
Physical Review Letters 113, 121101 (2014)

THÈSES

- J. Feng, juillet 2017**
Dark Matter Indirect Search and Antiproton-to-Proton Flux Ratio Measurement in Cosmic Rays with Alpha Magnetic Spectrometer
- S. Caroff, octobre 2016**
Mesures du flux d'électrons, du flux de positons, et de leur rapport avec l'expérience AMS-02. Interprétation en termes de matière noire et de pulsars
- L. Tao, juillet 2015**
Measurement of cosmic lepton and electron fluxes with the AMS detector on board the international space station. Monitoring of the energy measurement in the calorimeter
- L. Basara, mai 2014**
Performance of the electromagnetic calorimeter of the AMS-02 experiment on the international space station and measurement of the positron fraction in the 1.5 – 350 GeV energy range

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

- V. Poireau, novembre 2013**
Rapports d'embranchement et résonances dans les désintégrations des mésons B en particules charmées dans BaBar et flux cosmique de positons dans AMS

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- V. Poireau, mai 2017**
Indirect dark matter search with charged cosmic rays
Workshop Dark Matter, Sao Paulo, Brésil
- S. Caroff, septembre 2016**
High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station
XXV European Cosmic Ray Symposium, Turin, Italie
- C. Goy, août 2014**
Positron fraction and lepton fluxes in cosmic rays
Very High Energy Phenomena in the Universe, Vietnam
- L. Tao, juillet 2014**
Measurement of leptons related quantities in AMS
Frontier of Fundamental Physics, Marseille
- S. Rosier-Lees, juillet 2013**
Indirect search for dark matter
EPS HEP 2013, Stockholm, Suède

H.E.S.S.

HIGH ENERGY STEREOSCOPIC SYSTEM

CTA

CHERENKOV TELESCOPE ARRAY



L'ASTRONOMIE GAMMA DE TRÈS HAUTE ÉNERGIE

RÉSUMÉ

L'équipe astronomie gamma du LAPP participe à l'exploitation scientifique de l'expérience H.E.S.S. ainsi qu'à la construction de l'observatoire CTA. Les activités scientifiques portent sur la matière noire, les régions de formation d'étoiles, les restes de supernova en interaction avec les nuages moléculaire, les noyaux actifs de galaxie, ainsi que les sursauts gamma. Les activités techniques sur H.E.S.S. se concentrent sur le système de chargement/déchargement de la caméra du grand télescope, du système de focalisation ainsi que du logiciel d'analyse des données. En ce qui concerne CTA, le groupe est impliqué dans la construction de l'arche des grand télescope, dans la conception de leur système de pilotage et de contrôle ainsi que dans la réalisation du système de sécurité et de contrôle des caméras LST et NectarCAM. Coté logiciel, il participe au développement du système d'alertes, à la préparation du stockage des données ainsi que la chaîne d'analyse avec une approche calcul haute performance et l'utilisation du deep learning.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

L'expérience H.E.S.S. est une collaboration internationale regroupant 39 laboratoires répartis dans 13 pays (principalement européens et africains). Sept unités de l'IN2P3 y participent. L'observatoire CTA est une collaboration mondiale constituée de plus de 1400 scientifiques et ingénieurs provenant de quelques 200 instituts de 31 pays. Huit unités de l'IN2P3 y participent.

Physiciens

A.Fiasson, G.Lamanna, JP.Lees, G.Maurin, D.Sanchez

Equipe technique

G.Balik, C. Barbier, JP. Baud, L. Brunetti, M. Cailles, E. Chabanne, P.-Y. David, G. Deléglise, J.-M. Dubois, N. Fouque, N. Geffroy, F.Gillardo (2017-2020), J. Jacquemier, L. Journet, T. Leflour, B. Lieunard, I.Mievre, I. Monteiro, N. Neyroud, J.-L. Panazol, J. Prast, O. Prevost, J. Wagh.

Post-docs

P. Aubert, A. Carosi, F. Gaté, D. Sanchez, T. Vuillaume

Doctorants

C. Armand, P. Aubert, J. Chevalier, T. Gasparetto, M.Jacquemont, F.Krayzel, F. Mehrez, Q. Piel, C. Trichard

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

Juillet
2014

H.E.S.S.-2, le plus grand observatoire gamma au monde, détecte son premier pulsar

H.E.S.S. publie le plus grand catalogue de sources galactiques de très haute énergie.

Avril
2018

Déc.
2016

Les premières observations du grand télescope de H.E.S.S., portant sur les noyaux actifs de galaxie PKS2155-304 et PH1553+113, sont publiées.

H.E.S.S. participe à l'observation multi-messagers d'un événement neutrino coïncident avec un blazar en activité.

Juillet
2018

Août
2017

H.E.S.S. est le premier télescope terrestre à suivre l'onde gravitationnelle détectée par les interféromètres LIGO/VIRGO.

Inauguration du prototype de grand télescope de CTA (LST) à La Palma.

Oct.
2018

INTRODUCTION

Née dès les années 1950, l'astronomie gamma au sol est aujourd'hui une discipline à part entière. Les rayons gamma de très haute énergie (100 GeV à 10 TeV) provenant de l'Univers interagissent dans l'atmosphère et produisent une gerbe électromagnétique. Cette dernière émet un rayonnement Cherenkov pouvant être détectée par des télescopes munis de caméras composées de plusieurs centaines de photomultiplicateurs.



Illustration 1 : Le système stéréoscopique de télescopes H.E.S.S. en Namibie.

Avec les expériences H.E.S.S., MAGIC et VERITAS, l'astronomie gamma au sol connaît aujourd'hui une période d'intense activité. En vingt ans, c'est près de deux cents nouvelles sources au TeV qui ont été détectées et étudiées. La grande majorité est associée à des objets galactiques (étoiles à neutrons, trous noirs, restes de supernova) ainsi qu'à des objets extragalactiques (blazars, radiogalaxies, galaxie à flambée d'étoiles). Plus récemment, les premiers suivis au TeV d'alertes neutrinos et d'ondes gravitationnelles, ainsi que la première détection par MAGIC d'un sursaut gamma, ont également marqué l'avènement d'une astronomie mondiale multi-longueurs d'onde et multi-messagers.

H.E.S.S. est l'expérience de référence au niveau mondial qui a réellement ouvert cette nouvelle fenêtre. Depuis janvier 2004, H.E.S.S. comprend quatre télescopes de 15 m installés sur un plateau désertique à 1800 m d'altitude en Namibie. Un cinquième télescope de 36 m (H.E.S.S.-2) est entré en fonction en 2012. L'équipe de recherche en astronomie gamma du LAPP a rejoint l'expérience H.E.S.S. fin 2005. Depuis 2009, elle s'est investie à tous les niveaux de l'expérience en assurant des responsabilités essentielles à la collaboration.

Le Cherenkov Telescope Array (CTA) a pour objectif d'apporter, par rapport aux expériences actuelles, un gain d'un ordre de grandeur en sensibilité (~1mCrab en 50h), un élargissement du domaine spectral (de quelques dizaines de GeV à une centaine de TeV), et une amélioration de la résolution angulaire (~2 arcmin). Les observations à quelques dizaines de GeV sont parmi les plus importantes pour les objectifs scientifiques du LAPP : la recherche de matière noire, les études de population extragalactiques ainsi que la détection de sources transitoires.

CTA atteindra ces objectifs en combinant deux sites d'observations dans les hémisphères nord et sud au sein d'un observatoire unique, ce qui couvrira la totalité du ciel. Le site nord est situé sur l'île de La Palma (Canaries) et sondera l'Univers extragalactique.

Il accueillera quinze télescopes de taille moyenne et quatre grands télescopes (LST) dont un prototype (LST1) en cours d'installation. Dans l'hémisphère sud le site retenu est l'Observatoire du Cerro Paranal dans le désert d'Atacama au nord du Chili, où est installé le VLT. Il comportera une centaine de télescopes et permettra d'observer les régions intérieures du plan galactique.

L'équipe du LAPP est impliquée dans plusieurs projets techniques en particulier la conception, fabrication et l'installation des arches des LST ainsi que l'analyse des données brutes de l'observatoire (pipeline). Des membres du groupe assurent ou ont assuré plusieurs responsabilités importantes au sein du consortium international avec les postes de coordinateur de chef de projet « Data Management », de coordinateur technique et scientifique des systèmes auxiliaires LST et d'ingénieur système du projet NectarCam (caméra pour les télescopes de taille moyenne).

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Les vents stellaires, un accélérateur de rayon cosmique ?

Les étoiles massives naissent en grande majorité au sein de groupes stellaires que l'on nomme associations OB. Ces étoiles se caractérisent par une perte de masse importante sous forme de vents stellaires. Ces vents peuvent se combiner et produire une onde de choc dans le milieu interstellaire. L'énergie déposée s'accroît encore lorsque les étoiles les plus massives explosent en supernova. A ce stade, l'ensemble est alors nommé super bulle. Plusieurs mécanismes prévoient que ces objets accélèrent des particules chargées et ainsi émettent un rayonnement non-thermique. Il est cependant très difficile de savoir si les rayons cosmiques sont produits par les effets collectifs (interaction des vents stellaires/supernova) ou s'ils proviennent directement des objets évolués (supernova,

pulsars) présents. D'autant plus qu'aucun amas jeune n'a été détecté à ce jour.

A partir des données H.E.S.S. prises avant 2012, l'indication d'une émission gamma au TeV a pu être mise en évidence sur le jeune amas de la Rosette. Mais les nouvelles données que nous avons demandées et obtenues en 2015 n'ont finalement pas confirmé le signal. L'analyse des données au GeV du satellite Fermi n'a montré aucun signal significatif sur huit amas prometteurs. Une modélisation contrainte par les limites H.E.S.S. et Fermi, nous a finalement permis d'obtenir la première limite supérieure sur la quantité d'énergie transmise à l'accélération de particules au sein de ce type d'objet. Le modèle a également permis de déterminer les meilleurs candidats potentiellement détectables par CTA.

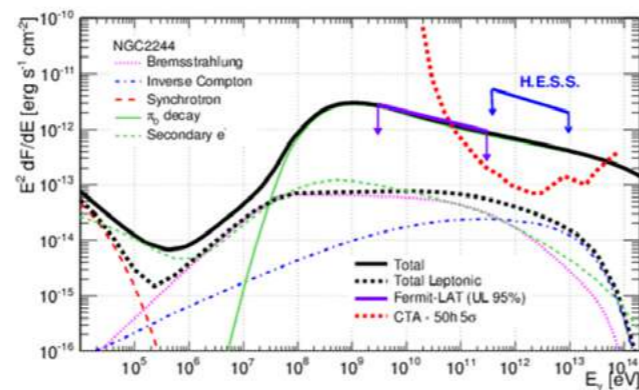


Figure 1 : Limite sur l'émission gamma (HESS et Fermi) provenant de la Rosette et contrainte sur la modélisation des émissions non-thermiques.

Sursauts gamma et autres sources transitoires

Les sursauts gamma (GRB) sont des émissions brèves et puissantes de rayonnements gamma pouvant durer de quelques millisecondes à plusieurs centaines de secondes. Pendant cet intervalle de temps, le sursaut gamma émet une énergie de 10^{51} - 10^{54} erg d'énergie (équivalent isotrope). Cette émission principalement située dans une gamme en énergie sous le MeV, mais pouvant s'étendre bien au-delà, fait du sursaut gamma la source gamma plus brillante du ciel. Cependant, il a fallu attendre janvier 2019 pour qu'un signal à quelques centaines de GeV coïncidant avec un GRB soit pour la première fois observé avec des télescopes Cherenkov (MAGIC). La prochaine génération

de télescopes Cherenkov (CTA) aura une sensibilité 10 fois supérieure et sera conçu pour le repositionnement rapide. Il sera donc l'outil clé dans la détection de sursauts gamma.

Au sein de la collaboration H.E.S.S., la groupe du LAPP travaille sur la prise de données et intervient en tant qu'expert sur les observations. L'écriture d'une proposition d'observation de sursauts gamma a été faite dans ce sens. Nous sommes aussi impliqués dans l'analyse de ces données et leurs interprétations d'un point de vue théorique. Un catalogue de limites supérieures à des énergies au-dessus de 100 GeV sera le premier du genre et permettra de mieux contraindre les modèles théoriques existants.

Au sein de CTA, le groupe est impliqué dans la préparation d'une publication portant sur l'estimation du nombre et des paramètres physique des sursauts gamma qui pourront être étudiés avec CTA. Parmi un groupe constitué de théoriciens et d'expérimentateurs, le LAPP apporte son expertise de la simulation de sursauts gamma. Ces travaux font parties des « Key Science Projets » définis par la collaboration CTA et sont considérés comme primordiaux.

Recherche indirecte de matière noire

Les mesures astrophysiques ont aujourd'hui établi l'existence de matière noire non baryonique qui constituerait, selon les dernières mesures de l'expérience Planck, 26 % de la masse de l'univers. La nature de cette matière noire reste inconnue mais l'un des candidats favoris pour l'expliquer est une particule massive et interagissant très faiblement (WIMP, Weakly Interacting Massive Particle). L'ensemble des galaxies seraient englobées dans un halo de WIMP plus ou moins abondant. Les annihilations de ces particules ayant eu lieu dans l'univers primordial y seraient toujours à l'œuvre avec un taux qui dépend de la densité de matière noire au carré ρ^2 , produisant un flux direct ou secondaire de rayons gamma de haute énergie venant se superposer aux signaux astrophysiques conventionnels. Le but est donc ici de regarder les objets astrophysiques qui ont la plus grande densité de matière noire prévue, tout en arrivant à séparer le signal de matière noire des signaux astrophysique conventionnels.

Le groupe a concentré son étude sur les galaxies naines sphéroïdes satellites de la Voie lactée (10-100 kiloparsecs), qui avec un rapport masse sur luminosité variant de 10 à 1000 sont connues pour contenir une forte proportion de matière noire, et pour lesquelles le signal gamma issu de sources conventionnelles apparaît comme négligeable. En 2006-2012, une première campagne d'observation de galaxies naines prometteuses n'a pas permis de détecter un signal significatif et a conduit en 2014 à la publication de limites sur la section efficace d'annihilation des WIMP en fonction de la masse de ces derniers. Ces limites restent encore plusieurs ordres de grandeur supérieures à la section efficace d'annihilation attendue de la densité relique de matière noire, $3.10^{-26} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il est cependant intéressant de noter que ces études sur les galaxies naines permettent d'atteindre des masses des WIMP qui sont inatteignables par le LHC, d'où une complémentarité très importante.

Une seconde campagne d'observation (2017-2018), ayant pour cible de nouvelles galaxies naines récemment découvertes, est actuellement en cours d'analyse. Ces études se poursuivront naturellement avec CTA dès que l'observatoire sera opérationnel, avec une sensibilité accrue d'un facteur 10. Il est à noter que les limites obtenues dépendent de manière cruciale de la modélisation des halos de matière noire et que le groupe travaille de manière active avec les théoriciens du LAPTh sur ce sujet, avec un co-encadrement de thèse en cours.

Les noyaux actifs de galaxie

Dans l'Univers, seul 10% des galaxies sont dites actives, avec un cœur fortement lumineux. On parle alors de noyaux actifs de galaxie (NAG). Un dixième des NAG présente une forte émission radio que l'on associe à un jet de plasma. Les observations de mouvement supra-luminique prouvent que le jet est relativiste avec un facteur de Lorentz supérieur à 10.

Dans la nomenclature, les NAG dont le jet fait un angle très petit avec la ligne de visée de l'observateur terrestre sont appelés blazars.

L'émission électromagnétique du jet, augmentée par les effets relativistes, domine complètement l'émission de la galaxie hôte, permettant une étude des processus d'émission dans le jet et in fine des mécanismes d'accélération des particules.

Les mécanismes d'émission en jeu dans le jet sont encore méconnus. L'équipe du LAPP utilise les données de H.E.S.S. mais aussi des données multi-longueurs d'onde (Fermi, NuSTAR, Swift, SMARTS) afin de mener différentes études :

- Avec la mise en fonction du télescope H.E.S.S. II, le seuil en énergie de l'instrument a été abaissé. L'équipe du LAPP a utilisé ces données pour une première étude du spectre des sources connues (notamment PKS 2155-304 et PG 1553+113) ou de nouvelles sources
- Détection et étude de nouvelles sources au TeV : Les observations, proposées par le LAPP, de différents types de blazars ont été menées par H.E.S.S. Les cibles sélectionnées sont des blazars de différents types pour couvrir toute la zoologie des NAG. Ces observations ont mené à la détection de deux nouvelles sources et de nombreuses limites contraignantes sur le flux de photons.
- Étude de la variabilité long terme du blazar PKS 2155-304 de l'optique au TeV. En collaboration avec le LAPTh, et en utilisant des données publiques, l'équipe du LAPP a mis en évidence certaines caractéristiques importantes de l'émission électromagnétique des blazars : Variations quasi-périodiques du flux de photon, forte dépendance de la variabilité avec l'énergie. Ce travail, effectué lors d'une thèse est en cours de finalisation par la modélisation des différents aspects observés.
- Construction d'un catalogue de sources extragalactiques couvrant toutes les observations de H.E.S.S. phase I (de 2014 à 2012) soit plus de 6% du ciel.

Les blazars, situés à des distances cosmologiques ($0 < z < 0.6$), détectés par l'expérience H.E.S.S. sont parmi les plus énergétiques et peuvent émettre au-delà de quelques TeV. Lorsqu'ils voyagent

sur ces distances cosmiques, les photons au-dessus de la centaine de GeV interagissent avec les photons infrarouges de la lumière de fond diffus extragalactique (Extragalactic Background Light, EBL en anglais) par la création de paires e^+e^- . Le spectre mesuré en est alors modifié par rapport au spectre intrinsèque de la source. Cet effet est dépendant bien entendu du spectre de photons EBL, malheureusement encore méconnu. L'EBL contient néanmoins des informations précieuses sur la formation des premières étoiles et galaxies. Les observations de H.E.S.S. ont permis une mesure indépendante de tout modèle de la densité d'EBL entre 0.25 et 98.60 micromètre et une étude précise des spectres corrigés pour cet effet d'absorption.

Des nouvelles techniques de simulations de l'instrument H.E.S.S., plus proche de l'état réel (pointé, état des pixels, calibration, etc..) ont été mises en place. Chaque observation est ainsi précisément simulée. Cette nouvelle approche a permis, en outre, de contrôler les systématiques de la reconstruction en direction des photons et d'étudier la morphologie de certaines sources très petites. Ainsi, H.E.S.S. a mesuré, pour la première fois, l'extension d'une source hors de notre galaxie : La galaxie radio Centaurus A. L'émission présente une forme elliptique alignée avec les jets observés en radio. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives quant à la compréhension des NAG.

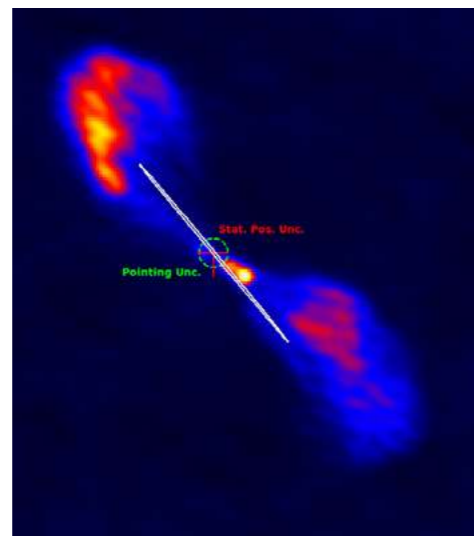


Figure 2 : Image du VLA en radio de la galaxie Centaurus A. L'ellipse blanche donne le modèle ajusté aux données HESS et la position reconstruite est donnée par la croix rouge.

Modélisation de l'émission Cherenkov de gerbes atmosphériques

Afin de simuler les données expérimentales de télescopes à imagerie Cherenkov, plusieurs étapes sont nécessaires. Premièrement le calcul des contributions individuelles de chaque particule au rayonnement Cherenkov total produit lors du développement de la cascade dans l'atmosphère. Cette étape, pouvant être opérée par le code de simulation CORSIKA, est gourmande en temps de calcul. La deuxième étape consiste à fournir les distributions spatiales et angulaires calculées des photons afin d'effectuer la projection dans les caméras en prenant en compte de la réponse instrumentale. Une manière de s'affranchir du temps de calcul élevé est de remplacer l'utilisation de CORSIKA par des modèles analytiques de distribution spatiale et angulaire des photons Cherenkov, dépendants des paramètres du photon primaire (point de première interaction, énergie, direction d'arrivée) et de ceux de l'expérience (champs géomagnétique local et altitude). De nombreuses simulations ont été effectuées afin de paramétrer la dépendance des modèles avec l'énergie du gamma primaire et du point de première interaction.

Ces deux modèles sont valides pour des photons gamma ayant une énergie comprise entre 10 GeV et 10 TeV et des profondeurs de premières interactions de 0 g/cm^2 à 300 g/cm^2 . Nous obtenons des incertitudes maximales inférieures à 5% sur l'ensemble de ces intervalles. Cette modélisation permettra une reconstruction rapide des paramètres de la gerbe, notamment l'énergie et pourra être appliquée aux futures données de CTA.

Pipeline d'analyse de CTA

L'expertise sur l'analyse des données acquise sur l'expérience H.E.S.S. a permis en 2015 d'engager le groupe sur le développement de la chaîne d'analyse des données brutes du futur observatoire CTA. L'objectif est double : produire des algorithmes performants scientifiquement en cherchant à traiter les données le plus rapidement possible pour si possible effectuer l'analyse en temps réel.

Grâce au financement du projet ASTERICS (Horizon2020 de l'ESFRI), l'équipe s'est renforcée de deux post-doctorants et de deux étudiants

en thèse d'informatique. L'équipe est ainsi constituée à force également d'informaticiens et de physiciens. L'ensemble des développements sont progressivement implémentés dans le code officiel de reconstruction ctapipe. Les travaux du groupe commencent aujourd'hui à porter leurs fruits avec :

- l'implémentation dans ctapipe, d'une technique de répartition de la charge (load balancing) basée sur le logiciel zeromq afin de distribuer et d'optimiser le temps de calcul sur une architecture donnée (multicoeurs, multiCPU...).
- le développement et la distribution d'une technique de compression/décompression ultra rapide (calcul haute performance HPC) pour les données digitalisées à faible dispersion. Ce travail de recherche informatique a été publié dans un journal international avec comité de lecture.
- le développement et la distribution d'un générateur de format de données adapté au calcul haute performance (données alignées en mémoire permettant l'utilisation du prefetching et la vectorisation des processeurs modernes).
- la vectorisation et l'adaptation aux architectures actuelles, de la méthode classique de reconstruction en astronomie gamma (méthode de Hillas) permettant ainsi une forte augmentation de la vitesse de traitement des données.
- le développement de nouvelles méthodes de reconstruction. La méthode SVD (Single Value Decomposition – généralisation de la transformée de Fourier) est basée sur la comparaison des spectres SVD de l'événement avec une banque de spectres SVD générée par des événements simulés. Elle permet ainsi de vérifier la nature de l'événement (gamma/proton) et d'estimer son énergie.

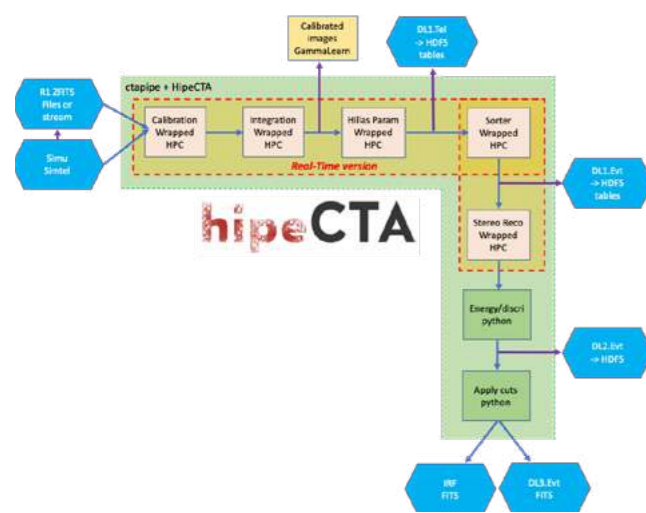


Figure 3 : Schéma du pipeline CTA utilisant la librairie « calcul haute performance » développée au LAPP

Le projet GammaLearn

Les techniques d'apprentissage automatique, ou machine learning ont prouvé leur efficacité dans de nombreux domaines, dont l'astronomie, et même l'analyse de données de télescopes à imagerie Cherenkov atmosphérique (IACT) [Weiner 2015, Sharma 2014]. De récents développements dans le domaine ont permis aux algorithmes de s'affranchir de la phase d'extraction de données caractéristiques à partir des données brutes et d'intégrer cette phase dans la phase d'apprentissage automatique. Ces développements sont généralement groupés sous le terme de deep learning et ont déjà investi l'astronomie [Feng 2016, Schawinski 2017]. Le projet GammaLearn, démarré en 2017 grâce au soutien du projet ASTERICS et né de la collaboration avec la PME italienne Orobix et le laboratoire LISTIC de l'USMB, a pour but de développer de nouveaux algorithmes deep learning adapté à l'analyse automatisée de données brutes en provenance des IACT, notamment de H.E.S.S. et de CTA.

L'intérêt de cette approche est multiple :

- Développer des algorithmes d'apprentissage automatique capable de s'adapter aux données après une phase d'entraînement sur des données de simulation Monte-Carlo.

- Développer des algorithmes capables d'améliorer les performances de reconstruction des IACT, notamment en termes de résolution angulaire et de sensibilité.

- Développer des algorithmes capables de répondre aux défis de volumes de données à analyser dans le cadre de CTA et capables de supporter une analyse temps réel des données sur site.

Les algorithmes généralement développés dans d'autres domaines diffèrent grandement de ceux nécessaires à l'analyse des données d'IACT, et ce notamment en raison de :

- La diversité et l'hétérogénéité des caméras qui possèdent des capteurs hexagonaux disposés en réseaux hexagonaux et selon des formes non-standard.
- La nature même de la méthode d'observation stéréoscopique nécessitant l'analyse coordonnée de plusieurs images dont le nombre varie à chaque événement

Les développements suivants ont été réalisés :

- Développement des opérations de bases nécessaires aux techniques deep learning (convolution et réduction) adaptées aux réseaux hexagonaux, ou à n'importe quel réseau non rectangulaire. Ces développements sont un premier résultat important qui dépasse le cadre des IACT et seront à l'origine d'une publication scientifique à venir.
- Développement et optimisation des algorithmes pour l'analyse des données de CTA. Ces développements sont encore cours afin d'atteindre les performances des méthodes d'analyse standards.

La collaboration avec différents partenaires permet également aux équipes du LAPP d'acquérir de nouvelles compétences qui seront à n'en pas douter essentielles pour l'analyse de données scientifiques de tous horizons dans les années à venir.

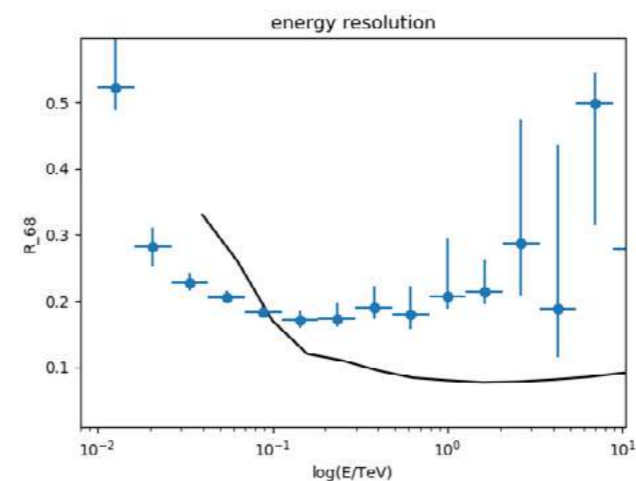


Figure 4 : Résolution en énergie obtenue par une reconstruction prototype en Deep-Learning.

RÉALISATIONS TECHNIQUES

Les réalisations techniques dans le cadre de CTA sont principalement concentrées au sein du projet LST. Il s'agit des arches haubanées supportant la camera, le système de pilotage des télescopes (drive), le contrôleur de camera (ECC – équipant également les camera NectarCAM des télescopes MST) et les outils logiciels de contrôle/surveillance du drive et du télescope dans sa globalité.

Conception et réalisation de l'arche des grands télescopes de CTA

La contribution mécanique du LAPP aux grands télescopes de CTA est la structure support de camera. Il s'agit d'une arche haubanée de forme parabolique, réalisée en matériaux composites. Elle est composée de segments tubulaires en fibre de carbone connectés entre eux et du cadre de camera, un sandwich de mousse haute densité et fibre de carbone. Le choix des matériaux composites a été dicté par la volonté de construire une structure la plus légère possible tout en limitant au maximum les déformations de la structure sous le poids de la camera et l'effet du vent. Le design a été réalisé en partenariat avec la société Rivoire Ingénierie, spécialiste en matériaux composites dans le domaine du nautisme de course. Ce partenariat a été financé par la Commission Européenne.

Un partenariat industriel a été initié avec la société Lorima, également financé par la Commission Européenne, afin de valider le choix des matériaux et le design des zones critiques. Des prototypes de tubes, jonctions entre tubes et jonctions avec la bride d'interface au pied de l'arche ont été produits par Lorima et testés en décembre 2014 à Munich. Des tests de compressions jusqu'à 200 tonnes ont été réalisés et ont montré que les jonctions satisfaisaient aux contraintes mécaniques.

Le partenariat industriel avec la société Lorima a été poursuivi pour la production de l'arche qui a démarré en janvier 2016. Un travail conséquent de mesure et vérification de la production a été réalisé sur les deux ans qu'aura nécessité la production de l'arche. Au mois de mars 2016, le premier tube a été démoulé et sa géométrie contrôlée à l'aide d'un outillage spécialement produit par le groupe. Les mêmes contrôles ont été opérés sur les cinq autres tubes et cadre de camera, avec un montage à blanc de l'ensemble à Lorient en février 2018.



Figure 5 : LST, Arche Lorient

L'étude et production de l'outillage de montage et installation de l'arche, de même que la définition de la procédure de montage ont été réalisées par le groupe. L'installation de l'arche de 28m de long sur la structure du télescope à près de 20m de haut était un projet en soi. Les capacités des engins disponibles nécessitaient d'opérer un certain nombre d'action par accès sur corde. De ce fait, un travail très conséquent de documentation a dû être réalisé. L'équipe a été formée au travail sur corde et a réalisé des entraînements réguliers pour les différentes actions (accès aux points de fixations, retrait du palonnier maintenant les pieds de l'arche 2m au-dessus des miroirs...)

Le montage sur site s'est étalé sur plusieurs périodes entre mai 2018 (réception du matériel sur site et montage des éléments au sol), juin 2018 (levage et assemblage de l'arche sur le télescope) et septembre 2018 (finalisation de la tension dans les haubans et insertion de la camera dans le cadre de camera). Ce montage très complexe et spectaculaire s'est parfaitement déroulé.



Figure 6 : Photos de l'installation de l'arche du LST prototype à La Palma.



Figure 7 : Équipe du LAPP ayant installé l'arche du LST prototype à La Palma.

Slow Control du LST

Dans le cadre du contrôle et surveillance du LST, le LAPP a en charge l'intégration des composants du télescope (Drive, la camera, la gestion des miroirs, ...) dans le Framework ACS choisi par CTA.

Les principaux objectifs de ce développement sont :

- D'assurer la surveillance de chaque composant en collectant les informations issues du matériel pour les distribuer auprès des interfaces utilisateurs dédiés

- De transmettre auprès de chaque composant les ordres de contrôle issus de demandes directes depuis un opérateur ou depuis le contrôle central du télescope (TCU : Telescope Control Unit).

Pour assurer la cohérence et la simplification de l'implémentation de cette couche logicielle, un générateur de code a été spécialement conçu. Celui-ci s'appuie sur un document de description d'interface (ICD: Interface Control Document) afin d'extraire les informations utiles et nécessaires à la création des composants ACS : description de configuration, logique d'implémentation multi-langage, environnement de compilation pour le Framework ACS, ...

Par ailleurs, pour répondre à la standardisation d'accès au matériel souhaitée par CTA et basée sur le standard OPCUA, le LAPP a également développé un outil générique (MOS: Multipurpose OPCUA Server) facilitant l'implémentation des interfaces logicielles d'accès au matériel en privilégiant les descriptions (XML) de l'interface à l'implémentation. De fait, cet outil limite la partie de code à écrire et s'adresse en premier lieu à un public « non-informaticiens ».

Cet environnement est largement utilisé dans le cadre du LST. On peut notamment citer le système « Drive », la gestion de la manipulation des miroirs ainsi que plusieurs éléments constituant la Camera.

LST Drive System

L'équipe du LAPP, reconnue au sein de l'IN2P3 pour son expertise en mécatronique, a également la responsabilité du projet « drive system » qui contrôle et commande les quatre télescopes LST qui équiperont chaque site de

CTA. Ce système prévoit l'asservissement et la synchronisation automatique des moteurs de chaque LST (4 en azimut et 2 en élévation), la sécurisation de leurs mouvements et l'optimisation des trajectoires des télescopes pour minimiser la puissance motrice et le temps de déplacement.

Plusieurs prototypes de systèmes mécaniques ont été réalisés par les équipes en charge de ces parties. Pour la partie élévation, un prototype a été réalisé au MPI-Munich. Le groupe a motorisé le système et une première série de tests ont été réalisés au printemps 2014. Ce système a ensuite été installé dans nos locaux pour de plus amples tests. Pour la partie azimut, un prototype de boggie a été réalisé par l'IFAE-Barcelone et la motorisation du LAPP a été utilisée pour réaliser des tests statiques et semi-statiques dans leur locaux début 2016. Fin 2017, des tests ont également été réalisés sur site avec les boggies définitifs et les premiers éléments de la structure basse du télescope.

L'équipe a réalisé le design de l'architecture électrotechnique finale du système de drive et d'alimentation électrique des LST. Les armoires ont été réalisées début 2018, intégrées au container et expédiées sur site en avril 2018. Les premiers tests de mouvement ont eu lieu fin juin 2018 pour la partie azimut, et se sont poursuivis en octobre avec les tests de la partie élévation. L'équipe a en parallèle assuré l'organisation et la réalisation du câblage du LST1.

Système de sécurité et de contrôle des caméras LST et NectarCAM

Le LAPP est responsable du système de sécurité et de contrôle des caméras LST et NectarCAM. Ce système, basé sur un contrôleur programmable embarqué de type CompactRIO, procède aux tâches suivantes :

- Il prépare la caméra aux conditions d'observations nominales (température, humidité...). En phase de non observation, il réduit le stress sur les composants, en évitant le gel par exemple.
- Il surveille les différents paramètres de la caméra (environnementaux, consommation électrique, état des ouvertures...) et rapporte ces informations au système de contrôle de haut niveau de l'expérience. L'interface avec le monde extérieur se fait par l'intermédiaire du standard OPCUA, standard poussé par le LAPP et aujourd'hui accepté par l'ensemble de la collaboration pour piloter les différents éléments de l'expérience.
- Il contrôle les services auxiliaires de la caméra : alimentations électriques, refroidissement, ouvertures et certains systèmes utilisés pour la calibration de la caméra ou le pointé du télescope.
- En cas de situation anormale (consommation excessive, hausse brutale de température, infiltration d'eau, ouverture intempestive...) il prend immédiatement les décisions nécessaires pour mettre la caméra en sécurité.

Le contrôleur de LSTCAM 1 a été installé en octobre 2017, puis testé les 12 mois suivants avec les différents sous-systèmes équipant la caméra. Côté NectarCAM, un prototype partiel est utilisé depuis l'automne 2016. Un coffret complet a été produit à l'été 2018 et sera installé à l'automne dans la première caméra NectarCAM devant être montée sur télescope. Les contrôleurs de camera LST et NectarCAM sont identiques.

Suivis des alertes

Avec l'avènement de l'astrophysique multi messagère, la communication et la transmission d'information entre les différents instruments opérant à des longueurs d'onde différentes sera cruciale durant les prochaines années. L'exemple d'observation par onde gravitationnelle et par des neutrinos du blazar TXS0506+056 a mis en lumière le besoin de synergie entre les différentes expériences. Les LST, prochains

grands télescopes du réseau CTA, auront un rôle majeur dans l'étude des sources transitoires à de très hautes énergies. Leur faible seuil en énergie et leur haute vitesse de pointé font de ces télescopes la clef de voute de la recherche d'objets transitoires au-delà de 20 GeV. Au sein de la collaboration CTA, le groupe du LAPP (incluant l'équipe des ingénieurs) est impliqué dans le développement du système d'alerte du premier prototype du LST actuellement en construction à La Palma.

Le système d'alerte permettra à LST1 de recevoir des alertes d'objets transitoires envoyées par des satellites (swift, Fermi...) mais aussi d'instruments situés au sol (IceCube, Virgo...). La connexion continue avec les autres instruments permettra le suivi rapide d'une grande variété de sources astrophysiques tels que les sursauts gamma, les objets galactiques transitoires sur une large gamme en énergie du spectre électromagnétique mais aussi avec d'autres messagers tels que les ondes gravitationnelles et les neutrinos. En plus de recevoir des alertes, la future interface en lien avec l'analyse en temps réel garantira la possibilité d'envoyer rapidement des alertes dans le domaine des très hautes énergies. Ceci représentera une avancée majeure pour l'astronomie gamma au sol et un test pour le futur observatoire CTA.

Au sein de la construction du LST1, l'équipe du LAPP est aussi impliquée dans le développement du programme permettant de tenir compte des déformations du télescope dans le pointé (« Bending Model »). En raison de l'affaissement de la structure, les informations sur le pointé du télescope, fournies par le drive system, sont dans la plupart des cas insuffisantes pour déterminer de façon exacte la direction de l'axe optique. Ainsi une calibration particulière doit-elle être effectuée. Pour ce faire, le télescope est équipé de caméra CCD situées au centre du miroir, dédiée à cette tâche. Des images d'étoiles brillantes seront prises de façon régulière afin de calibrer le pointé du télescope. Ce point est particulièrement important pour les grandes structures comme le LST. La précision du Bending Model pourrait avoir un impact significatif sur la résolution spatiale du télescope.

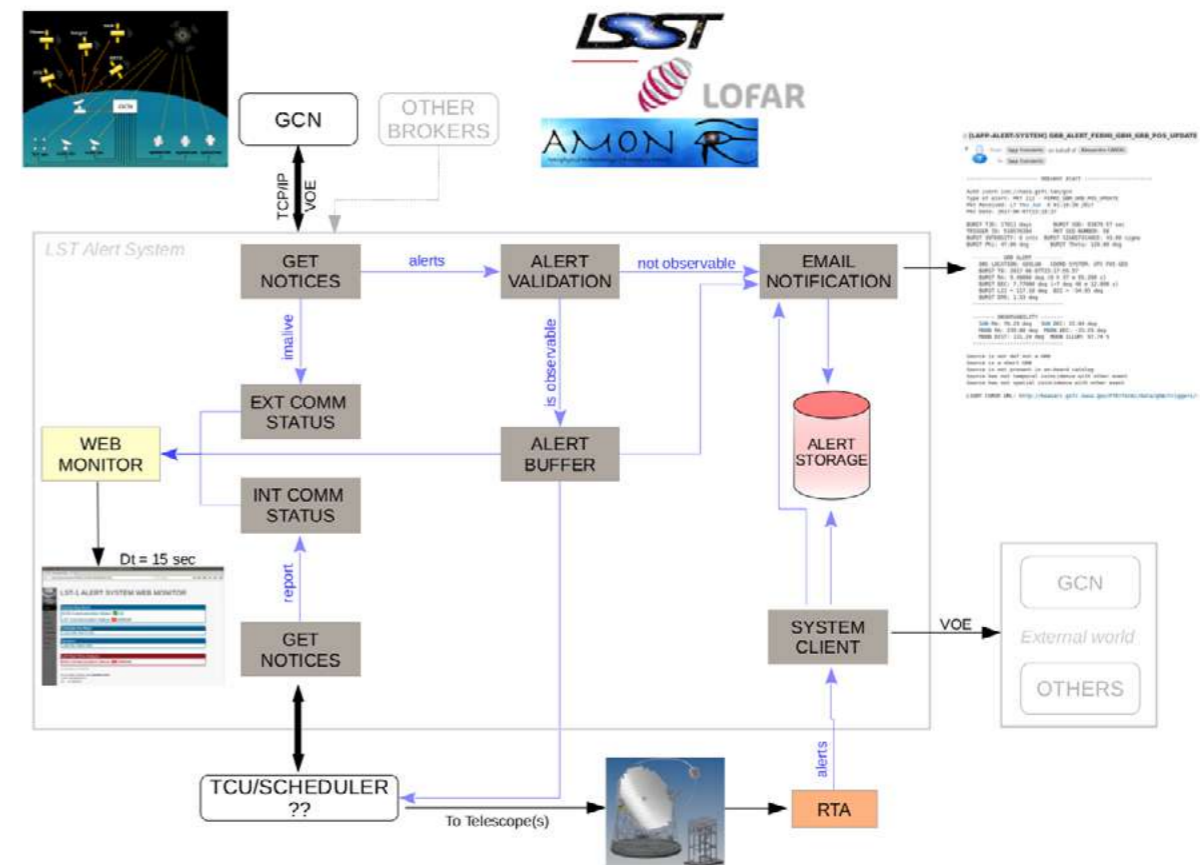


Figure 8 : Schéma du logiciel développé au LAPP qui gère les alertes sur site.

PERSPECTIVES

Les activités scientifiques du groupe sur HESS vont se poursuivre jusqu'à la fin de l'exploitation des télescopes. Les recherches sur les noyaux actifs de galaxie vont s'orienter vers des études de population et vers la cosmologie (champ extragalactique, fond diffus extragalactique). Les prochaines contraintes sur la matière noire vont provenir de combinaisons des résultats entre les expériences d'astronomie gamma : H.E.S.S., Veritas, MAGIC, Fermi et HAWC. Enfin, le groupe va poursuivre le suivi et l'étude des alertes provenant des sursauts gamma espérant une première détection.

Côté technique, le groupe HESS participera en 2019 au remplacement de la caméra du grand télescope par une caméra FlashCam conçue pour les télescopes de moyenne taille de CTA. L'expertise du LAPP est nécessaire afin d'effectuer l'installation de la caméra à l'aide du système de chargement ainsi que pour adapter le système de focalisation.

En ce qui concerne CTA, les activités du groupe n'en sont qu'à leur début. La construction du prototype LST débouchera sur la construction d'au moins trois autres grands télescopes sur le site Nord de CTA. De même plus d'une dizaine de camera NectarCAM seront produites dans les prochaines années. L'ensemble des activités logiciel vont également se poursuivre et se renforcer en fonction des engagements (in kind contributions) de l'équipe vis-à-vis de la collaboration. Le format de données HPC est actuellement en cours d'évaluation par une société engagée par la collaboration. S'il est retenu, le groupe sera en charge de l'évolution et la maintenance de ce format dans les prochaines années. La compression et les algorithmes de reconstruction du pipeline HPC et deep learning vont être testés sur le prototype LST1. Le groupe souhaite que ses solutions soient utilisées dans CTA pour faire la réduction des données in situ.

En fonction des performances, ce pipeline pourrait également être proposé pour l'analyse temps réel et faire ainsi le lien avec le logiciel d'alerte que le LAPP propose à la collaboration.

Enfin, les activités scientifiques du groupe, recentrées autour de l'étude de sources extragalactiques, noyaux actifs de galaxies et sursauts gamma, devraient croître progressivement avec les démarrages progressifs de ces télescopes.

PUBLICATION IMPORTANTES [x]

- 1 Aubert, P., Vuillaume, T., and Maurin, G. et al.**
Polynomial data compression for large-scale physical experiments
Computing and software for big science (2018)
- 2 H.E.S.S. collaboration**
Gamma-ray blazar spectra with H.E.S.S. II mono analysis: The case of PKS 2155-304 and PG 1553+113
Astronomy & Astrophysics, Volume 600, id.A89, 13 (2017)
- 3 H.E.S.S. collaboration**
Measurement of the EBL spectral energy distribution using the VHE τ -ray spectra of H.E.S.S. blazars
Astronomy & Astrophysics, Volume 606, id.A59, 11 (2017)
- 4 Maurin, G., Marcowith, A., and Komin, N. et al.**
Embedded star clusters as sources of high-energy cosmic rays
Astronomy & Astrophysics, 591: A71 (2016)
- 5 Sanchez, D. A. et al.**
From radio to TeV: the surprising spectral energy distribution of AP Librae
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 454, Issue 3, p.3229-3239 (2015)

- 6 H.E.S.S. collaboration**
Search for dark matter annihilation signature in H.E.S.S. observations of dwarf spheroidal galaxies
Physical Review D 90, 112012 (2014)

THÈSES

- P. Aubert, 4 octobre 2018 (codirection avec le laboratoire LI-PaRAD de l'université Paris Saclay)**
Calcul haute performance pour la détection de rayon Gamma
- J. Chevalier, 28 juin 2017**
Étude de population des noyaux actifs de galaxie au TeV avec les télescopes H.E.S.S. et étude de variabilité du blazar PKS 2155-304 avec modélisation SSC
- F. Mehrez, 19 novembre 2015**
Design and test of a readout ASIC for a SiPM - based camera : ALPS (ASIC de lecture pour un photo détecteur SiPM)
- C. Trichard, 22 septembre 2015**
Étude du rayonnement gamma de vestiges de supernova en interaction avec des nuages moléculaires et optimisation de l'analyse des données de H.E.S.S.
- F. Krayzel, 19 décembre 2014**
Étude de phénomènes non-thermiques dans les amas d'étoiles jeunes : modélisation et analyse des données de H.E.S.S.

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

- G. Maurin, 14 avril 2017 (soutenue à l'université Savoie Mont-Blanc affiliée à l'école doctorale de l'UGA)**
Origine du rayonnement cosmique : études multi-messagers, multi-longueurs d'onde

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- Quentin Piel, juillet 2018**
Estimation of GRB detection with CTA
COSPAR, Pasadena, CA, USA
- Quentin Piel, juin 2018**
Drive LST simulation
SPIE Astronomical Telescopes & Instrumentation, Austin, Texas, USA
- Pierre Aubert, mars 2018**
Data analysis with SVD for large physical experiments
SIAM: Parallel Processing for Scientific Computing, Tokyo, Japon
- Vincent Poireau, août 2018**
Latest results on dark matter searches using the H.E.S.S. telescopes
TeVPA, Berlin, Allemagne
- David Sanchez, août 2018**
Morphology of a radio galaxy
TeVPA, Berlin, Allemagne



Illustration 1 : Le système stéréoscopique de télescopes H.E.S.S. en Namibie.

LSST

LARGE SYNOPTIC SURVEY TELESCOPE



DESC

DARK ENERGY SCIENTIFIC COLLABORATION



MESURE DES PARAMÈTRES COSMOLOGIQUES, ÉTUDE DE L'ÉNERGIE NOIRE

RÉSUMÉ

Le « Large Synoptic Survey Telescope » (LSST) est un télescope terrestre à très grand champ (9.6 deg^2), équipé d'une caméra comptant 3.2 Gpixels et conçu pour imager de manière répétée l'ensemble du ciel visible dans six bandes de longueurs d'ondes optiques. Son fonctionnement systématique durant 10 ans à partir de 2022, permettra de construire des catalogues de plusieurs milliards de galaxies à grands redshifts. L'instrument LSST a été optimisé pour couvrir de nombreux domaines scientifiques dont la cosmologie.

La Dark Energy Science Collaboration (DESC) a pour objectif d'étudier l'ensemble des sondes cosmologiques exploitables à partir des données de LSST.

Le groupe du LAPP est membre de LSST et de DESC depuis 2016 et concentre son activité sur l'étude des amas de galaxies et sur le traitement des données.

COLLABORATION, DONT ÉQUIPE DU LAPP

LSST et DESC sont des collaborations internationales. Dix laboratoires de l'IN2P3 en sont membres (LPNHE, LAL, APC, LPC, CC-IN2P3, LMA, LPSC, LUPM, CPPM et LAPP).

Physiciens

Dominique Boutigny,
Sylvie Rosier-Lees, Yves Zolnierowski

Equipe technique

Sabine Elles (informatique)

Post-docs

Mariana Penna-Lima (2017-2018),
Nicolas Chotard (2016 – 2018) et
Marina Ricci (2018...)

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

Déc.
2013

"Final Design Review (NSF)" de LSST

Début de la construction de LSST

2014

Création du groupe LSST au LAPP

2016

INTRODUCTION

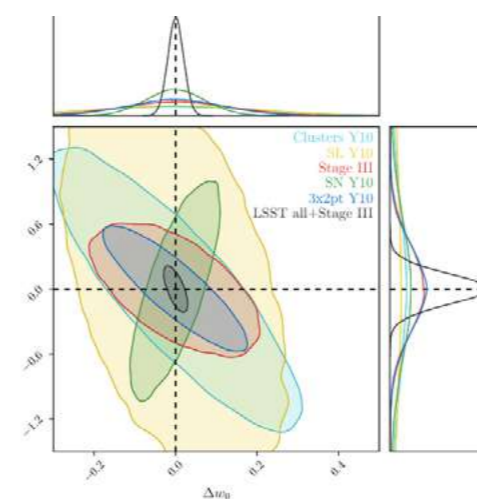
LSST couvre de nombreux domaines scientifiques depuis l'étude des objets du système solaire jusqu'à la cosmologie. Cette dernière est étudiée dans le cadre de la collaboration scientifique DESC.

En 1998, la mesure de la distance de luminosité des supernovæ de type Ia (SNIa) a montré que l'expansion de l'univers était dans une phase d'accélération. Ce phénomène a été confirmé par d'autres techniques comme la mesure du rayonnement de fond cosmologique (CMB) et la métrologie des grandes structures de l'univers (Oscillations Acoustiques Baryoniques). L'origine de cette accélération de l'expansion est attribuée à « l'énergie noire », composante de l'univers représentant les $\frac{3}{4}$ de la densité d'énergie. La nature de l'énergie noire est inconnue et constitue l'un des problèmes les plus intrigants de la physique actuelle. Différentes hypothèses ont été avancées : une constante cosmologique, un fluide de pression suffisamment négative ou des modifications de la relativité générale aux distances cosmologiques.

De manière à discriminer les différentes hypothèses, il est nécessaire de procéder à des mesures très précises afin de caractériser l'histoire de l'expansion de l'univers et la croissance des grandes structures cosmiques. On peut contraindre l'équation d'état de l'énergie noire, $p = w(a) \rho$ où p est la pression, ρ la densité et a le facteur d'échelle. Si l'énergie noire est une constante cosmologique alors w est constant et égal à -1 . Les modèles de fluides cosmologiques prédisent une équation d'état où $w(a) = w_0 + (1-a) \cdot w_a$.

Expérimentalement, contraindre l'énergie noire nécessite de combiner plusieurs sondes complémentaires (SNIa, Weak Lensing, BAO, amas, ...) et d'accéder à un volume d'univers aussi grand que possible. C'est ce que se propose de réaliser le projet LSST qui durant 10 ans va imager avec une très grande précision l'intégralité du ciel austral jusqu'à des redshifts photométriques excédant 1.

La figure [fig. 2] montre les contraintes attendues dans le plan w_a/w_0 pour les différentes sondes cosmologiques à la fin du projet LSST.



Le groupe du LAPP s'intéresse plus particulièrement aux mesures cosmologiques à partir des amas de galaxies. La technique phare consiste à compter le nombre d'amas de masses données par unité de volume d'univers en fonction du redshift. Cette distribution permet de mesurer le taux de croissance des perturbations et de contraindre la somme des masses des neutrinos.

Figure 2 : Contraintes sur les paramètres de l'énergie noire apportées par les diverses sondes cosmologiques après 10 ans de prise de données sur LSST. Figure extraite de R. Mandelbaum et al. 2018 - arXiv:1809.01669.



Figure 1 : État d'avancement de la construction de l'observatoire sur le Cerro Pachón au Chili à l'été 2018.

Dans ce cadre, le groupe en collaboration avec le LPSC

(Grenoble) et Brasília (Brésil), étudie la mesure des masses des amas par la technique du "weak lensing". D'autres études sont envisagées dans un avenir proche comme l'amélioration des techniques de détections d'amas ainsi que l'extraction des paramètres cosmologiques à partir de l'exploitation des cartes de cisaillement des galaxies. Par ailleurs le groupe du LAPP est fortement impliqué dans le traitement des données de LSST et la génération de catalogues d'objets astronomiques.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

La stratégie suivie par le groupe repose sur une complémentarité entre les développements logiciels pour LSST et leur mise en pratique dans le cadre d'un projet scientifique. Cette approche est particulièrement importante dans le cadre d'un projet comme LSST où la collaboration chargée de l'exploitation scientifique des données (DESC) est différente de la collaboration qui acquiert et traite ces mêmes données (LSST). Ce mode de fonctionnement engendre inévitablement un décalage entre les fonctionnalités développées avec une approche très technique et celle qui sont attendues dans un cadre scientifique. Ce rôle de pont entre les deux communautés est crucial pour le succès de LSST et DESC et donne au groupe du LAPP une excellente visibilité dans les deux collaborations.

Mesure de la masse des amas de galaxies

La mesure de la masse d'un amas de galaxie par la technique du weak lensing consiste à estimer le cisaillement gravitationnel « faible » des images des galaxies situées en arrière-plan de l'amas. Afin d'acquérir les compétences nécessaires, le groupe du LAPP associé à celui du LPSC est parti d'une sélection d'amas géants bien mesurés par la collaboration "Weighing the Giants" (A. Von der Linden et al. 2014) et utilisant les images prises par le CFHT/Megacam. Le groupe a mis à profit l'expertise acquise sur l'ensemble des logiciels de traitement des images LSST afin de produire des catalogues de qualité suffisante pour permettre une mesure significative du

cisaillement gravitationnel associée à une estimation des redshifts photométriques des galaxies. Ce projet a constitué la première utilisation scientifique complète de la pile logicielle LSST.

À partir des catalogues produits, le groupe a développé un pipeline d'analyse des données allant du traitement initial des images jusqu'à l'estimation de la masse des amas à partir des mesures d'ellipticité des galaxies situées en arrière plan de ceux-ci.

La figure [fig. 3] montre une image CFHT / Megacam de l'amas MACS J2243.3-0935 traitée au CC- IN2P3. La figure [fig. 4] montre la carte du potentiel gravitationnel qui met en évidence l'accumulation de masse autour de la position de l'amas.

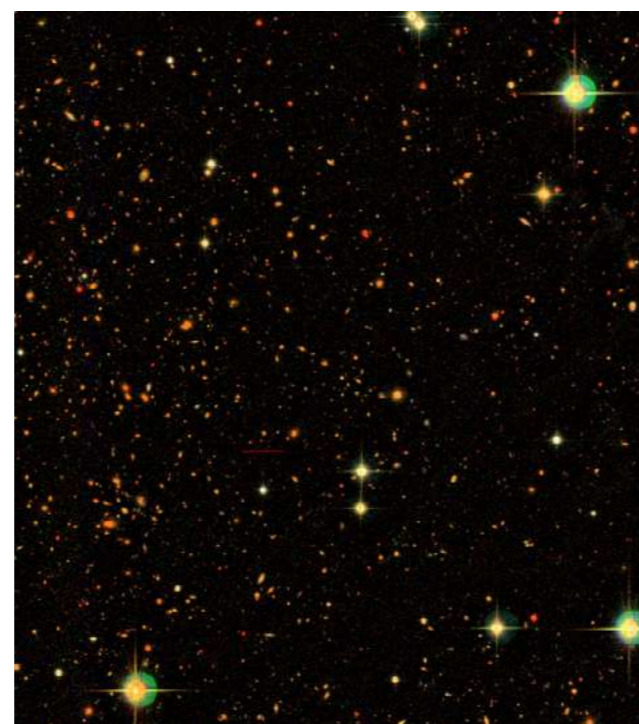


Figure 3 : Image CFHT / Megacam de l'amas MACS J2243.3-0935 traitée avec la pile logicielle LSST par le groupe du LAPP.

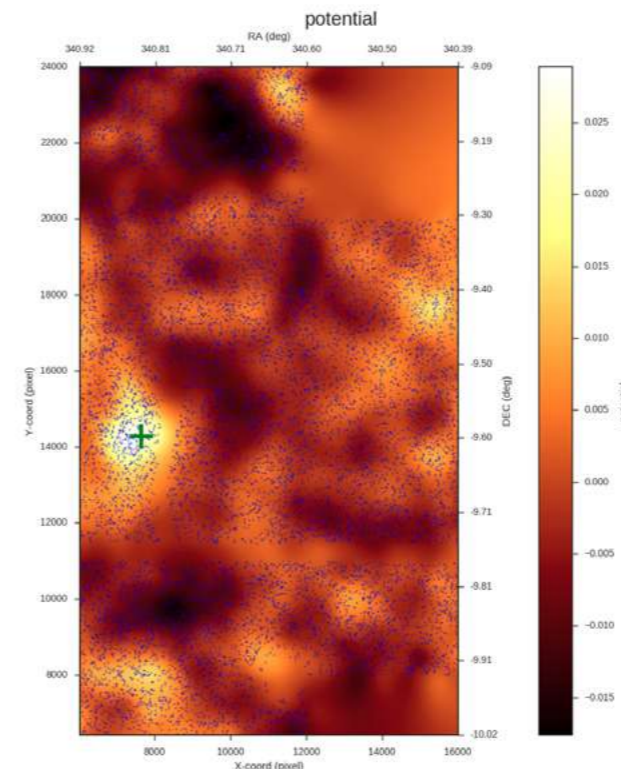


Figure 4 : Carte du potentiel gravitationnel construite à partir des mesures de cisaillement sur les galaxies d'arrière-plan. La croix bleue indique la position optique du centre de l'amas. Chaque point indique la position des galaxies qui ont été utilisées pour la mesure.

L'algorithme d'ajustement de la masse issu de la collaboration " Weighing the Giants " présente un certain nombre de limitations, notamment sur le choix du profil de masse, sur le centrage de l'amas et suppose aussi une symétrie sphérique pour celui-ci. Le groupe a entamé un travail visant à développer un nouvel algorithme basé sur le paquet NumCosmo¹. Cette nouvelle méthode utilise une approche beaucoup plus souple qui permettra à terme de prendre en compte tous les effets pouvant biaiser la mesure de la masse des amas. Actuellement ce nouvel algorithme est d'ores et déjà capable de reproduire les résultats de " Weighing the Giants ".

La suite du développement prend maintenant place dans le cadre de la collaboration entre le groupe du LAPP et celui de Brasília où l'une des post-doctorantes du LAPP est maintenant professeure.

¹<https://numcosmo.github.io/>

Développements informatiques pour LSST et DESC : Production annuelle des catalogues de données

En 2015, l'IN2P3 et LSST ont signé un accord par lequel l'IN2P3 s'engage à traiter la moitié des données de LSST en vue de la production annuelle des catalogues. L'autre moitié est traitée au National Center for Supercomputing Application (NCSA) dans l'Illinois. À l'issue de chaque traitement, les données sont échangées entre deux sites de façon à constituer deux lots complets de données. Cette responsabilité est bien entendu très importante pour l'IN2P3 et correspond à un engagement financier et humain très fort. Le principal avantage pour l'IN2P3 est de pouvoir disposer à terme, d'un lot de données en France avec un accès simplifié et fournissant donc un avantage scientifique à la communauté LSST-France.

Le LAPP joue un rôle important dans la mise en œuvre de cet accord, via un membre du groupe qui assure le rôle de coordinateur du calcul LSST-France. L'expertise acquise sur la pile logicielle LSST au cours des cinq dernières années permet d'interagir directement avec les développeurs et d'assurer le support pour les activités scientifiques de DESC s'appuyant sur le traitement d'image ou l'exploitation des catalogues. Il est notamment très important de traquer les inefficacités et les points de contentions qui apparaissent lors du traitement massif des données afin d'une part, d'améliorer les logiciels et d'autre part de concevoir et mettre en place une infrastructure de calcul performante et adaptée. Ce travail se fait en complète coordination avec le CC-IN2P3, puisqu'un membre du CC-IN2P3 est responsable du sous-projet IN2P3 correspondant à la mise en œuvre de l'accord avec LSST.

Participation au deuxième Data Challenge de DESC

La collaboration DESC a lancé un projet pour un grand "Data Challenge" (DC2), consistant en une simulation aussi détaillée que possible allant de la génération d'un catalogue cosmologique jusqu'à la simulation de la réponse des pixels individuels

de la caméra de LSST. Deux approches complémentaires sont utilisées, l'une est basée sur une simulation globale des images et l'autre sur un traçage individuel de chaque photon au travers de l'atmosphère et de l'optique du télescope. Les effets fins affectant la réponse des CCD sont également pris en compte. La simulation finale délivrera un lot d'images correspondant à 10 ans de prise de données sur 300 deg² du ciel (le catalogue cosmologique servant à la génération des images couvrira quant à lui 5000 deg²). La stratégie d'observation (succession des pointés du télescope en fonction de la date, de la position de la Lune et du filtre utilisé) est également prise en compte.

Au total, ce sont environ 45 000 images complètes du plan focal (189 CCD) qui seront produites.

La responsabilité du traitement des images simulées pour produire des catalogues incombe à l'IN2P3 avec une forte implication du groupe du LAPP. Cette activité est vue à la fois comme un entraînement pour la mise en œuvre du système de production annuelle des catalogues LSST (voir ci-dessus) et comme une contribution scientifique pour DESC.

Tests et mise en place d'un système de stockage et d'accès aux données

Le retour scientifique découlant de la disposition d'un jeu complet de données au CC-IN2P3, nécessite de mettre en place un système performant d'accès à celui-ci et permettant de l'exploiter au mieux.

Le produit Qserv développé par la collaboration LSST, repose sur un système complexe de base de données réparties sur un grand nombre de nœuds (de l'ordre du millier), capable de distribuer des requêtes SQL sur les nœuds et d'agréger les résultats partiels avant retour à l'utilisateur. LSST étant très déconnecté des collaborations scientifiques, le développement de Qserv est essentiellement géré comme un projet d'ingénierie. L'équipe du LAPP envisage le problème sous un autre angle et se propose de tester les fonctionnalités et les performances de Qserv dans le cadre d'analyses cosmologiques. Le Data Challenge de DESC fournit un lot de données idéales pour mener

cette évaluation à bien. Le groupe du LAPP possède l'expertise technique pour développer les outils permettant d'insérer les données dans Qserv en utilisant une grappe de 50 machines dédiées. Le projet utilise des technologies de pointe comme Kubernetes pour la gestion et l'ordonnancement de containers, le système de base de données est basé sur MariaDB et la distribution des requêtes entre les différents nœuds s'appuie sur le protocole xrootd.

Ce projet trouve également sa place dans le cadre du work package OBELICS du projet Européen ASTERICS qui a financé deux années d'un postdoctorant. Si les tests sont satisfaisants, le service Qserv pourra être ouvert à la collaboration DESC (l'ampleur et le cadre précis de cette ouverture restant à préciser). Ici encore, le projet d'accès aux données place l'IN2P3 et en particulier le LAPP dans une position unique et très visible. Un membre du groupe est co-responsable de la "Data Access taskforce" de DESC.

À plus long terme, le groupe pourrait implémenter et tester les autres composants de l'interface scientifique d'accès aux données et de visualisation.

PERSPECTIVES

En ce qui concerne la cosmologie, le groupe va continuer son travail de recherche sur la détermination des paramètres cosmologiques à partir des mesures sur les amas de galaxies. Le travail entamé sur l'estimation des masses des amas va se poursuivre en s'appuyant sur les collaborations avec le LPSC et Brasília. L'arrivée d'une post-doctorante à la fin 2018 va permettre de développer cette activité, elle apportera aussi une compétence nouvelle au niveau des algorithmes de détections des amas.

Le groupe se propose aussi d'évaluer l'apport en terme de contraintes cosmologiques de la recherche de pics dans les cartes de cisaillement obtenues à partir de simulations et des premières données disponibles dans LSST. Cette méthode a déjà été expérimentée par la collaboration DES.

Sur le plan technique, l'activité sur les Data Challenges va se poursuivre et débouchera sur des contributions à la validation de la pile logicielle et de l'infrastructure de traitement des données à partir des données de "commissioning". Les tests à visées scientifiques de la base de donnée Qserv avec des données simulées ou provenant de projets précurseurs (HSC) vont également se poursuivre avec une ouverture possible du service à la communauté DESC internationale.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1 M. Penna-Lima et al.**
Observational bounds on extended theories of gravity from energy conditions
arXiv:1801.04534
- 2 M.E.S. Alves et al.**
Cosmological constant constraints from observation- derived energy condition bounds and their application to bimetric massive gravity
The European Physical Journal C 78, 710 (2018)
- 3 C. Doux, M. Penna-Lima et al.**
Cosmological constraints from a joint analysis of cosmic microwave background and spectroscopic tracers of the large-scale structure
arXiv:1706.04583v2
- 4 Ž. Ivezić et al.**
LSST: from Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products
arXiv:0805.2366 - revision 5 - Submitted to AAS
- 5 M. Jurić, et al. The LSST Data Management System**
Astronomical Society of the Pacific Conference Series 512, 279 (2017)
- 6 R. Mandelbaum et al.**
GREAT3 results I: systematic errors in shear estimation and the impact of real galaxy morphology
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 450, 2963-3007 (2015)



LES PREMIÈRES DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

RÉSUMÉ

L'expérience Virgo, avec les deux détecteurs américains de l'expérience LIGO, forment un réseau international de détecteurs d'ondes gravitationnelles. Le détecteur Virgo est un interféromètre de trois kilomètres de long, construit en Italie près de Pise. Il est conçu pour mesurer les infimes variations de distance entre ses miroirs suspendus induites par le passage d'une onde gravitationnelle. Les toutes premières ondes gravitationnelles, provenant de coalescences de trous noirs, ont été détectées lors des observations réalisées en 2015, marquant la naissance de l'astronomie gravitationnelle. Le 17 août 2017, une coalescence de deux étoiles à neutrons a été détectée par le réseau et a été suivie d'observations multimessagers intenses pendant plusieurs mois, confirmant l'association avec un sursaut gamma puis une kilonova. Cette nouvelle astronomie multi-messagers a déjà apporté de nouvelles informations sur les propriétés des ondes gravitationnelles d'une part, et sur les sources astrophysiques et la cosmologie d'autre part.

Durant cette période, l'équipe Virgo du LAPP a largement contribué aux améliorations apportées au détecteur pour construire, puis régler, Advanced Virgo d'une part part, et à la recherche en-ligne de coalescences de systèmes binaires compacts dans les données de LIGO et de Virgo d'autre part.

COLLABORATION & ÉQUIPE DU LAPP

La collaboration Virgo est formée, fin 2018, de vingt-deux laboratoires de huit pays européens (France, Italie, Pays-Bas, Hongrie, Pologne, Espagne, Allemagne, Belgique). Outre le LAPP, les laboratoires français sont : LAL/ESPCI (Orsay/Paris), LKB (Paris), LMA (Lyon), APC (Paris), OCA (Nice). De plus, la collaboration Virgo est liée à la LSC (LIGO Scientific Collaboration) par un accord conclu en 2007. Fin 2018, l'ensemble des collaborations LIGO et Virgo regroupe 175 institutions, soit 1130 auteurs.

Physiciens

Buskalic, R. Flaminio, R. Gouaty, F. Marion, B. Mours, T. Regimbau, L. Rolland, D. Verkindt, M. Was, M. Yvert

Équipe technique

N. Allemandou, JP. Baud, R. Bonnand, T. Bouedo, M. Cailles, A. Dalmaz, P.-Y. David, S. Deprez, L. Giacobone, R. Hermel, L. Journet, N. Letendre, B. Lieunard, A. Masserot, P. Mugnier, E. Pacaud, A. Paixao, S. Petit, T. Yildizkaya

Post-docs

T. Adams, O. Saute

Doctorants

M. Ducrot, V. Germain, D. Estevez, F. Aubin, M. Eisenmann, V. Hui, C. Périgois

Stagiaires

1 L3, 4 M1 et 4 M2

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2014

Début de l'installation d'Advanced Virgo.

2016

FÉVRIER - Publications et conférences de presse internationales annonçant la première détection d'ondes gravitationnelles, avec les détecteurs LIGO (GW150914).

OCTOBRE - Les cinq minitours et trois bancs optiques sont installés avec leur électronique intégrée.

2017

1^{ER} SEM. - Début du commissioning d'Advanced Virgo.

29 MARS - Premier réglage de l'interféromètre en mode « DC », avec les deux cavités mode cleaner verrouillées sur le signal de frange noire.

AOÛT - Participation de Virgo à la période d'observation O2 avec LIGO; Virgo atteint un horizon de 28 Mpc.

14 AOÛT - Première détection d'ondes gravitationnelles avec le détecteur Virgo, provenant d'une coalescence de trous noirs binaires (GW170814).

17 AOÛT - Première détections d'ondes gravitationnelles provenant de deux étoiles à neutrons, en coïncidence avec un sursaut gamma (GW170817), déclenchant une campagne d'observations multi-messagers pendant plusieurs mois.

OCTOBRE - Prix Nobel attribué pour la détection des ondes gravitationnelles.

DÉCEMBRE - Proposition du projet AdV+.

2018

DÉCEMBRE - Virgo atteint un horizon de 45 Mpc.

INTRODUCTION

Ces dernières années ont été marquées par la construction des configurations avancées des détecteurs Virgo et LIGO et ont abouti aux premières détections d'ondes gravitationnelles lors des deux prises de données associées (premier et deuxième runs d'observation, O1 et O2). Les éléments du détecteur et de l'analyse pris en charge par le groupe du LAPP vont de la détection de la lumière en sortie de l'interféromètre à la recherche de coalescences de systèmes binaires compacts en ligne, en passant par le contrôle temps-réel du détecteur et l'acquisition des données, la caractérisation du détecteur et la compréhension des bruits limitant sa sensibilité, l'étalonnage du détecteur et la reconstruction du signal d'onde gravitationnelle, et l'estimation de la qualité des données.

RÉALISATIONS TECHNIQUES : CONSTRUCTION D'ADVANCED VIRGO

Suite à la publication en avril 2012 du Advanced Virgo Technical Design Report (TDR), la collaboration est entrée de plain-pied dans la phase de construction d'Advanced Virgo [1], évolution majeure du détecteur suite à sa configuration Virgo+ (finalisée par la quatrième prise de données scientifiques de mai à septembre 2011). Une nouvelle configuration optique, avec un faisceau laser plus gros et des cavités Fabry-Perot de plus grande finesse, a été définie. Pour cela, tous les miroirs suspendus de l'interféromètre ont été remplacés, permettant d'utiliser des miroirs plus lourds, et de meilleure qualité au niveau du polissage et du revêtement de surface en particulier. Le projet Advanced Virgo a été conçu avec plusieurs phases d'installation et réglages intercalées avec des périodes d'observation : la puissance du laser est augmentée progressivement, associée à la mise en œuvre d'un système pour compenser les déformations des miroirs dues aux plus grands effets thermiques induits, et un nouveau miroir doit encore être ajouté en sortie de l'interféromètre et suspendu à une grande suspension. Des efforts importants ont été mis en œuvre pour réduire l'impact de la lumière diffusée qui avait limité la sensibilité du détecteur Virgo+ en couplant les bruits environnementaux au détecteur. En particulier, deux aspects ont été améliorés sur les bancs optiques où est mesuré le faisceau laser sortant en différents endroits de l'interféromètre : d'une part, les éléments opto-mécaniques installés sur les bancs ont été sélectionnés pour peu diffuser, et d'autre part, les bancs ont été suspendus et placés sous vide pour réduire les vibrations sismiques et acoustiques. Le groupe a été impliqué dans la construction, l'installation et les réglages du détecteur dans le but d'atteindre une sensibilité suffisante pour démarrer les observations. Des membres du groupe ont de plus été impliqués dans l'effort de revue des sous-systèmes d'Advanced Virgo.

Réalisation, installation et réglages de systèmes optiques intégrés

Les développements techniques du groupe sont principalement liés à la détection de la lumière en sortie de l'interféromètre, ce qui a conduit à développer des systèmes intégrés englobant les optiques et les capteurs (photodiodes, caméras, ...) installés sur les bancs optiques, et l'électronique de lecture et de contrôle associée, le tout suspendu et contrôlé en position dans de nouvelles enceintes à vide. Dans ce cadre et pour réduire la lumière diffusée sur les bancs, le groupe a construit, installé et réglé six bancs suspendus sous vide : un banc déjà suspendu pour Virgo mais entièrement modifié, et cinq nouveaux bancs suspendus. Pour accueillir ces cinq bancs, le groupe a conçu puis réalisé, de 2010 à 2015, cinq enceintes à vide, l'outillage nécessaire à leur intégration sur le site et à l'insertion des bancs. Le groupe a aussi installé des protections autour des enceintes afin de délimiter des zones propres : réduire la pollution des optiques par des poussières contribue à limiter la lumière diffusée. Les éléments optiques à installer sur les bancs ont été conçus en prenant en compte les contraintes optiques et mécaniques afin de faciliter leur implantation. Les câbles allant du banc suspendu à l'extérieur pouvant transmettre le bruit sismique, leur nombre a été limité aux câbles d'alimentation électrique et à quelques fibres optiques pour l'échange des données. Pour cela, l'électronique de lecture et de contrôle des éléments du banc (picomoteurs, voies ADC et DAC, routeur Ethernet, ...) a été intégrée dans un caisson étanche, contenant de l'air, intégré au banc. Les photodiodes et les caméras ont aussi été installées dans de petites boîtes étanches. Les contraintes de dissipation thermique pour évacuer correctement la chaleur émise par l'électronique ont été prises en compte et validées lors de la mise en route des systèmes sur Virgo.

Une des évolutions d'Advanced Virgo est aussi la nouvelle méthode de lecture des photodiodes principales, sensibles au signal d'onde gravitationnelle. Au lieu d'utiliser les signaux démodulés des photodiodes à plusieurs MHz, cette lecture, dite « DC », utilise directement le signal basse fréquence, jusqu'à quelques

dizaines de kilohertz. Pour cela, de nouvelles cavités optiques (appelées cavités mode-cleaner) ont été développées pour filtrer le faisceau en sortie de l'interféromètre : ces cavités éliminent non seulement les imperfections du faisceau principal comme pour Virgo, mais aussi les « bandes latérales », faisceaux auxiliaires de longueurs d'onde très proches du faisceau principal. La caractérisation de ces cavités, au LAPP puis sur Virgo, a validé les performances de filtrage avec de faibles pertes optiques, et a montré que le bruit dominant, le bruit thermo-réfractif, ne limite pas la sensibilité du détecteur Virgo [2]. Deux cavités placées en série ont été utilisées, contrôlées en longueur et accordées précisément à l'aide de nouveaux supports et actionneurs. Cette nouvelle méthode de lecture des photodiodes a nécessité de sélectionner de nouvelles photodiodes et de concevoir et développer de l'électronique de lecture bas bruit.

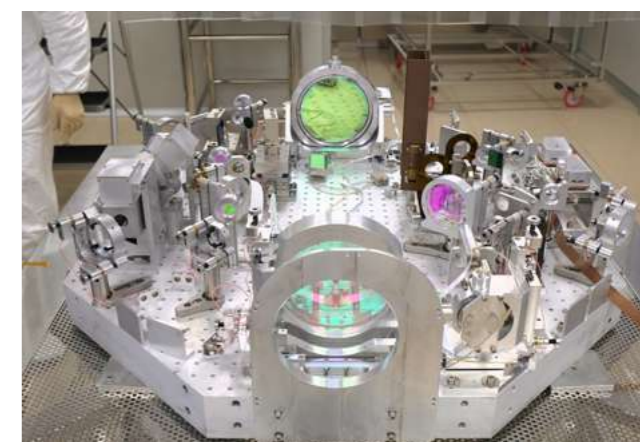


Figure 1 : Assemblage optique du banc de sortie de l'interféromètre, avec le télescope qui réduit la taille du faisceau laser (en centre de la photo) et les deux cavités mode-cleaner qui ne transmettent que le faisceau principal contenant le signal d'onde gravitationnelle (dans les boîtes au fond à droite du banc).

Réalisation, installation et réglages de l'électronique numérique et de l'acquisition des données

A la suite des évolutions déjà déployées pour Virgo+, des développements électronique et logiciels ont permis d'étendre et d'améliorer l'utilisation de boucles numériques pour le contrôle du détecteur. Ces éléments ont été développés afin de pouvoir être d'une part intégrés dans les nouveaux bancs optiques, et d'autre part utilisés pour l'acquisition des données et le contrôle d'autres sous-systèmes du détecteur Virgo. Les réseaux de fibres optiques pour l'échange en temps réel des données numériques et pour la distribution de la référence temporelle ont été conçus, dimensionnés et déployés au fur et à mesure de l'installation des différents sous-systèmes d'Advanced Virgo, de 2014 à 2016. Parmi les évolutions électroniques majeures, nous pouvons citer :

- la fabrication, les tests et l'installation de DAQ-Box, carte générique accueillant diverses mezzanines aux fonctions spécifiques (ADC, DAC, démodulation numérique, alimentation et contrôle des photodiodes,



Figure 2 : Nouveau banc suspendu en sortie de l'interféromètre, inséré dans son enceinte à vide et suspendu. Le caisson étanche pour intégrer l'électronique de contrôle et de lecture au banc est ouvert. De nombreux éléments optiques, ainsi que des photodiodes et caméras dans leurs petits caissons étanches sont installés sur le banc.

alimentation et contrôles des caméras numériques).

La carte mère assure l'alimentation, l'interface avec les réseaux de fibres optiques et ethernet, ainsi que des ressources de calcul sur DSP et FPGA. Un logiciel de configuration et contrôle des DAQ-Box a aussi été réalisé. Au total, ont été produites 77 DAQ-Box, 90 mezzanines ADC 8 voies, 70 mezzanines DAC 8 voies, 30 mezzanines de contrôle et d'acquisition des photodiodes 4 voies, 40 mezzanines de démodulation numérique 4 voies, 4 mezzanines DAC rapide 1 voie, et 10 mezzanines de distribution d'horloge. 42 DAQ-Box ont été installées sur Virgo.

- le passage de la démodulation analogique à la démodulation numérique (avec les signaux échantillonnés à 400 MHz) pour l'acquisition des signaux de contrôle de l'interféromètre, beaucoup plus flexible et adaptable aux besoins du commissioning ;
- le développement d'une mezzanine DAC rapide et des logiciels de pilotage associés pour contrôler la fréquence du laser jusqu'à une dizaine de kilohertz. Ceci a conduit au remplacement de la boucle analogique de Virgo+ par une boucle numérique plus facilement paramétrable ;
- l'amélioration de la distribution des horloges synchronisant tous les éléments numériques de Virgo suite à des contraintes renforcées durant les phases de réglages du détecteur.

De plus, le réseau de contrôle numérique et d'acquisition des données a été mis à jour avec le remplacement des PC temps-réel et de leur carte d'interface et la réalisation et l'installation de boîtes MuxDemux 24 voies pour le routage des données numériques transitant sur fibres optiques.

Des caméras numériques ont aussi été sélectionnées puis installées et intégrées au réseau d'acquisition, avec le développement d'un outil de visualisation des images en temps réel dans la salle de contrôle de Virgo. Certaines caméras sont utilisées en temps-réel pour visualiser les faisceaux et les miroirs de l'interféromètre. D'autres permettent la surveillance du site.

Différents logiciels nécessaires au contrôle temps réel et au suivi du détecteur ainsi qu'à la collection, à la sauvegarde et à la visualisation des données ont été développés et sont largement utilisés par les différents sous-systèmes de Virgo et en salle de contrôle, avec des facilités d'accès depuis l'extérieur du site permettant de travailler sur le détecteur à distance.

Le groupe a également fourni une assistance aux autres laboratoires de la collaboration qui utilisent de l'électronique développée par le LAPP pour équiper leurs propres bancs de R&D.



Figure 3 : Montage d'un radiateur sur une carte DAQ-Box avec quatre mezzanines, avant installation dans un caisson étanche sous un banc. Le radiateur sert à évacuer la chaleur vers les côtés du caisson et le banc qui l'évacuent ensuite, sous vide, par radiation.



Figure 4 : Salle de contrôle de Virgo avec différents écrans de suivi du détecteur, en particulier le visionnage temps-réel des caméras numériques et l'évolution temporelle de paramètres du détecteur.

Système d'étalonnage d'Advanced Virgo

Le groupe a en charge l'étalonnage du détecteur permettant de convertir le signal mesuré par les photodiodes en signal physique d'onde gravitationnelle. Cette activité a repris à la fin de l'installation d'Advanced Virgo. Les éléments critiques à étalonner sont les actionneurs des miroirs, dont les fonctions de transfert doivent être mesurées. Trois méthodes indépendantes sont utilisées pour cela. Deux méthodes étaient déjà utilisées pour Virgo et ont été améliorées, adaptées et automatisées pour Advanced Virgo. En particulier, le calibrateur optique, dispositif d'étalonnage basé sur la pression de radiation d'un laser auxiliaire a été entièrement modifié par rapport à celui installé pour Virgo (bancs optiques, lasers, éléments optiques, photodiodes, puissance-mètre,...). afin d'en réduire les incertitudes systématiques. La troisième méthode indépendante d'étalonnage, basée cette fois sur la modulation contrôlée du champ de gravité locale autour d'un miroir de l'interféromètre à l'aide d'un rotor en rotation, a été validée par un premier prototype construit et testé en 2017 [3]. Une deuxième version est en cours de développement.

Vers Advanced Virgo+

Le projet Advanced Virgo+ (AdV+) a été proposé en décembre 2017 et est constitué de deux phases. Le TDR d'AdV+ sera rédigé en 2019. Dans une première phase (2020-2021) il est prévu que l'interféromètre fonctionne avec un laser à plus

grande puissance et avec une configuration optique plus complexe (ajout d'une cavité de recyclage appelée Signal Recycling). Il utilisera aussi des états comprimés de la lumière (« squeezing ») d'une manière dépendante de la fréquence. Cette dernière technique tire parti de la nature quantique de la lumière et améliore la sensibilité dans toute la gamme de fréquences. Le groupe du LAPP est impliqué dans la conception de ce système, en particulier via la conception de deux nouveaux bancs intégrés suspendus sous vide. D'autre part tous les sous-systèmes dont le LAPP est responsable seront améliorés afin de fonctionner dans la configuration AdV+.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Réglages et caractérisation du détecteur

Le groupe a participé activement aux réglages des différents sous-systèmes dont il avait la charge après leur installation : système de détection et système de contrôle numérique et d'acquisition des données. Ces deux sous-systèmes ayant de nombreuses interfaces avec les autres sous-systèmes d'Advanced Virgo, ces réglages et adaptations ont représenté un travail important et continu du groupe depuis 2014. De plus, le groupe est en charge de l'estimation des différents bruits qui limitent la sensibilité du détecteur en continu d'une part, et participe à la caractérisation des bruits parasites impulsifs pouvant ressembler au signal d'une onde gravitationnelle d'autre part. Les résultats de ces activités indiquent souvent le chemin à suivre pour améliorer le détecteur et sont aussi la première étape de l'analyse des données. Ces estimations doivent évoluer en permanence pour suivre jour après jour les évolutions et les réglages de l'ensemble des sous-systèmes d'Advanced Virgo.

Reconstruction du signal d'onde gravitationnelle $h(t)$

A la suite de la calibration, le groupe a en charge la reconstruction des données étalonnées pour les analyses de physique. Cette activité a repris à la fin de l'installation

d'Advanced Virgo pour suivre les effets des réglages du détecteur puis pour la prise de données de 2017. Le signal est reconstruit en ligne avec une latence de 20 s et combiné avec les signaux $h(t)$ reconstruits par LIGO par les recherches d'ondes gravitationnelles en ligne, générant des alertes vers nos expériences partenaires (détections électromagnétiques). Une fois l'étalonnage et la méthode de reconstruction améliorés à la fin du run O2, le signal d'onde gravitationnelle $h(t)$ était reconstruit fin 2017 avec une précision de 5 % en amplitude [4]. Cette nouvelle version, plus précise, a été utilisée pour estimer les paramètres physiques des sources détectées pendant O2.

Recherche de coalescences de binaires compactes

En plus des activités d'étalonnage, reconstruction et caractérisation du détecteur, qui sont à la frontière entre le détecteur et l'analyse de données, le groupe a participé à la recherche de signaux de coalescences de binaires d'astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs) au sein du groupe d'analyse commun à LIGO et Virgo. Il a particulièrement contribué à ces recherches en ligne afin de générer des alertes à nos partenaires assurant le suivi électromagnétique lors de détections d'ondes gravitationnelles, ainsi qu'aux recherches effectuées en coïncidence avec des sursauts gamma courts. Le groupe s'occupe aussi du transfert en ligne des données reconstruites entre LIGO et Virgo, permettant aux différentes analyses de la collaboration LIGO-Virgo d'obtenir les données avec une latence de quelques dizaines de secondes.

Le logiciel d'analyse (MBTA) [6] développé par le groupe a été amélioré en préparation aux prises de données des détecteurs avancés, et a été validé par les collaborations LIGO et Virgo pour analyser en temps réel les données du réseau de détecteurs. En particulier, le bruit de fond est mieux rejeté et la significativité des événements mieux estimée. De plus, dans cette nouvelle version, les informations fournies au logiciel qui localise la source dans le ciel ont été précisées, fonctionnalité essentielle pour les suivis électromagnétiques. L'analyse des données du run O1, en 2015, a été

marquée par les premières détections d'ondes gravitationnelles en provenance de trous noirs de quelques dizaines de masses solaires. Le logiciel d'analyse développé par le groupe n'a pas détecté ces sources car il recherchait des objets plus légers, de quelques masses solaires. Cependant, le groupe a activement participé à ces découvertes, en particulier à travers sa participation au Detection Committee, dont un membre du groupe était co-coordonateur, et qui avait en charge la validation de toute la chaîne d'analyse et des résultats obtenus. En 2016, pendant la période d'améliorations de LIGO et de fin de construction et de réglages de Virgo, le logiciel MBTA a été étendu à la recherche de sources plus massives puis a été de nouveau validé par les collaborations pour être utilisé en ligne pendant le run O2. Virgo a rejoint ce run en août 2017, aboutissant à la première observation d'une onde gravitationnelle par le réseau de trois détecteurs le 14 août [7,8], puis, de façon spectaculaire, à la première détection d'un signal provenant d'une collision d'étoiles à neutrons le 17 août [9,10], en coïncidence spatiale et temporelle avec un sursaut gamma. L'alerte générée a déclenché des observations multi-messagers aboutissant à une meilleure localisation de la source puis à son identification avec une kilonova. Le groupe a participé à la validation de l'alerte, aux vérifications du fonctionnement du détecteur et de sa calibration, et à la rédaction de certaines publications, en particulier concernant l'analyse et les implications de la coïncidence entre le signal d'onde gravitationnelle et le sursaut gamma.

Recherche de fond stochastique et de sources continues

En 2018, un nouveau membre du groupe a apporté de nouvelles compétences sur la recherche du fond stochastique d'ondes gravitationnelles, et commencé un travail sur la recherche du fond stochastique non isotrope provenant de coalescences de binaires d'astres compacts. Un membre du groupe est par ailleurs impliqué dans l'effort de revue des recherches de signaux en provenance de sources continues telles que les pulsars.

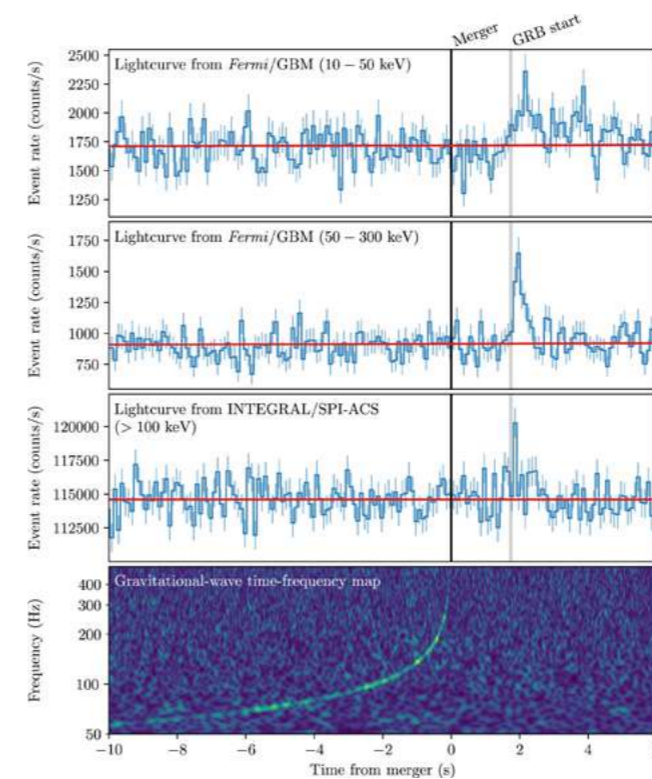


Figure 5 : Détection multi-messager de la coalescence de deux étoiles à neutrons GW170817 et du sursaut gamma associé. La figure du bas montre l'évolution en temps et en fréquence du signal d'onde gravitationnelle, se terminant au moment de la coalescence. Les trois autres figures montrent l'évolution temporelle du nombre de photons gamma détectés dans trois bandes d'énergie par Fermi et INTEGRAL : le sursaut gamma est visible 1,7 s après la coalescence.

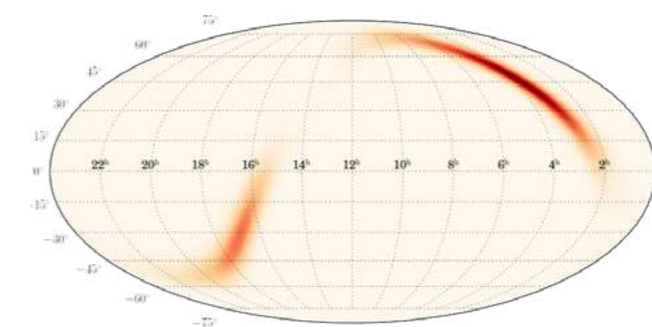


Figure 6 : Localisation de la source GW170823 détectée en ligne pendant le run O2 par le logiciel d'analyse MBTA développé au LAPP.

Futurs projets : Einstein Telescope

Le groupe a également une implication embryonnaire dans le projet Einstein Telescope pour un futur détecteur de troisième génération. Les membres du groupe ont signé la lettre d'intention rédigée en juin 2018 visant à créer la collaboration Einstein Telescope. Un membre du groupe est membre du Steering Committee d'Einstein Telescope depuis avril 2018 et est en charge de rédiger le règlement de la nouvelle collaboration.

Conférences de presse

Lors des premières détections d'ondes gravitationnelles le groupe a participé à plusieurs conférences de presse : le 11 février 2016 au CNRS pour l'annonce de la première détection, et le 16 octobre 2017 au CNRS et le 17 octobre 2017 à l'université de Tokyo pour l'annonce de la première détection d'une coalescence d'étoiles à neutrons, observées de plus en multi-messagers.

PERSPECTIVES

La naissance de l'astronomie gravitationnelle en 2015, puis de l'astronomie multi-messagers en 2017, ont conduit à de nouvelles contraintes sur la Relativité Générale, l'astrophysique et la cosmologie. Afin d'améliorer ces mesures, le groupe du LAPP va continuer à améliorer à la fois la sensibilité et la précision des détecteurs, en particulier pour les analyses en ligne afin de déclencher des alertes multi-messagers. Afin d'améliorer la sensibilité des détecteurs, le groupe va contribuer à un nouveau sous-système à construire pour Adv+ pour 2020, le « squeezing » dépendent de la fréquence, et continuer à faire évoluer et améliorer les sous-systèmes « détection » et « DAQ » afin de se rapprocher au plus près de la meilleure sensibilité possible dans l'infrastructure actuelle de Virgo. A plus long terme, le groupe va s'investir vers la R&D et le design pour le détecteur de troisième génération Einstein Telescope dont la lettre d'intention a été signée en 2018. Concernant la précision des mesures, l'étalonnage du détecteur va devenir de plus en plus important, ainsi que la réjection des bruits et les performances des analyses.

Les analyses réalisées par le groupe s'orientent toujours vers les détections de sources binaires compactes, mais aussi vers la recherche de fonds stochastiques astrophysiques anisotropes, pour lesquels la contribution de Virgo au réseau mondial de détecteurs est essentielle.

L'augmentation du nombre de sources avec de meilleurs instruments et la réduction des incertitudes, en particulier en-ligne, auront un impact direct sur les résultats de physique fondamentale obtenus grâce aux observations d'ondes gravitationnelles et multi-messagers.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

- 1** D. Estevez, B. Lieunard, F. Marion, B. Mours et al.
First Tests of a Newtonian Calibrator on an Interferometer Gravitational Wave Detector
Classical and Quantum Gravity (2018)
- 2** F. Acernese et al. (Virgo collaboration)
Calibration of advanced Virgo and reconstruction of the gravitational wave signal $h(t)$ during the observing run O2
Classical and Quantum Gravity (2018)
- 3** B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
GW170817: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Coalescences
Physical Review Letters 120, 091101 (2018)
- 4** B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A
The Astrophysical Journal Letters, 848, L13 (2017)
- 5** B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral
Physical Review Letters 119, 161101 (2017) - publié avec 7 autres publications associées
- 6** B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
GW170814: A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence
Physical Review Letters 119, 141101 (2017)
- 7** R. Bonnand, M. Ducrot, R. Gouaty, F. Marion, A. Masserot, et al.
Stringent upper-limit on monolithic optical cavity length noise for gravitational wave detectors
Classical and Quantum Gravity 34, 175002 (2017)
- 8** B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger
Physical Review Letters 116, 061102 (2016) - publié avec 15 publications associées
- 9** T. Adams, D. Busulic, V. Germain, G.M. Guidi, F. Marion et al.
Low-latency analysis pipeline for compact binary coalescences in the advanced gravitational wave detector era
Classical and Quantum Gravity 33, 175012 (2016)
- 10** F. Acernese et al (Virgo collaboration)
Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector
Classical and Quantum Gravity 32, 024001 (2015)

THÈSES

V. Germain, octobre 2017
De l'étalonnage d'Advanced Virgo à la recherche d'ondes gravitationnelles émises par des coalescences de binaires compactes

M. Ducrot, septembre 2016
Etude des cavités optiques de filtrage de sortie du détecteur d'ondes gravitationnelles Advanced Virgo

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

R. Flaminio, décembre 2017
Observatoires d'ondes gravitationnelles: du début de la construction aux premières détections et au-delà

L. Rolland, juin 2015
Etalonnage de l'interféromètre et reconstruction du signal d'onde gravitationnelle : de Virgo à Advanced Virgo

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

F. Marion, juillet 2018
From a Fruitful to a Plentiful Run: the Transition from O2 to O3
Fifteenth Marcel Grossmann Meeting, Rome, Italie

F. Marion, juillet 2018
Gravitational wave transient sources and what we learn from them
11th Cosmic Ray International Seminar, Portopalo, Italie

L. Rolland, juin 2018
Implications of LIGO/Virgo gravitational wave detections
14th International Workshop Dark Side of the Universe, Annecy, France

T. Regimbau, juin 2018
Implications of the observation of binary black hole mergers with Advanced LIGO/Virgo
Gravitational-waves, ElectroMagnetic and dark-Matter Physics Workshop, Lecce, Italie

B. Mours, mai 2018
Virgo status : From O2 to O3 and beyond, focusing on the detector
Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Alaska, Etats-Unis

R. Flaminio, décembre 2017
Status of Advanced Virgo & Frequency Dependent Squeezing
The Ninth Australian Conference on General Relativity and Gravitation, Perth, Australie

R. Gouaty, décembre 2017
Systèmes optiques intégrés dans Advanced Virgo et adaptation au vide poussé
Réseau Optique Photonique, Journée « Optique en milieux extrêmes » du Réseau Optique Photonique, École Polytechnique, Palaiseau, France

30 mai au 2 juin 2017
Organisation de la conférence Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop à Annecy

D. Verkindt, juillet 2016
Advanced Virgo Data Quality and Online Monitoring
21st International Conference on General Relativity and Gravitation, New-York, Etats-Unis

F. Marion, 2016
GW150914 Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger
Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, La Thuile, Italie

INSTRUMENTATION & INNOVATION



Accélérateurs de particules & technologies associées

110

FLC R&D

FUTURE LINEAR COLLIDER

ANALYSE ET CONTRÔLE VIBRATOIRE DÉDIÉS AUX FUTURS COLLISIONNEURS LINÉAIRES

RÉSUMÉ

Le groupe FLC est en charge de la stabilisation du faisceau au point d'interaction du projet d'accélérateur Compact Linear Collider (CLIC) au CERN, avec un défi technologique important : 0,2 nm en valeur moyenne quadratique (RMS) intégré à 0,1 Hz. Pour atteindre cet objectif, le groupe a développé une table active, un capteur de vibrations et des lois de commande très spécifiques qui ont permis de réaliser une démonstration de faisabilité proche des spécificités demandées (0,25 nm RMS à 4 Hz).

En parallèle, le groupe met en application les compétences acquises à travers CLIC sur d'autres projets tels que le prototype d'accélérateur linéaire nommé Accelerator Test Facility (ATF2), situé à KEK au Japon. L'objectif est la démonstration de faisabilité d'un faisceau nanométrique et dans cette perspective, le groupe est responsable des mesures vibratoires de l'instrument, des caractéristiques vibratoires des supports des doublets finaux et a récemment débuté une nouvelle implication sur le contrôle du faisceau en fonction du mouvement des aimants. De même, l'équipe prend depuis peu part à l'expérience SuperKEKB, également situé à KEK au Japon, en apportant une expertise vibratoire nécessaire à l'optimisation de la luminosité du faisceau du détecteur Belle II.

COLLABORATION & ÉQUIPE DU LAPP

SYMME

Laboratoire SYstèmes et Matériaux pour la MEcatronique de l'Université de Savoie

CERN

Organisation européenne pour la recherche nucléaire

KEK

High Energy Accelerator Research Organization

LAL

Laboratoire de l'accélérateur linéaire

OXFORD

Department of Physics, University of Oxford

Post-doc

M. Serluca (depuis octobre 2017)

Maître de conférence

A. Dominjon (depuis septembre 2017)

Équipe technique

G. Balik, J.-P. Baud, L. Brunetti, B. Aimard, A. Jérémie, S. Vilalte

Stagiaires

S. Mignocchi (2016) DUT MPH,
A. Ivanov (2017) DUT GEII.

Instrumentation & innovation
Accélérateurs de particules &
technologies associées

111

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2014

Développement d'un capteur de vibrations (brevet Français) dédié au contrôle vibratoire.

2015

Mise en service des nouveaux supports d'aimants du final focus de l'expérience ATF2 au Japon.

2016

Démonstration de faisabilité à l'échelle sous-nanométrique, à la limite des spécifications CLIC, et publication des résultats du contrôle vibratoire mis en œuvre avec une table active, un capteur de vibrations développées et des lois de commande complexes.

2017

Démonstration de la non-nécessité de développer un pré-isolateur dédié sous les aimants du final focus, mais uniquement d'intégrer une solution commerciale.

Contribution au contrôle de faisceau « feedforward » ATF2.

2018

Participation à la rédaction du document Project Implementation Plan (PIP), support des décisions CLIC – FCC.

Développement du système de monitoring de vibrations dédié à l'expérience Belle II à SuperKEKB au Japon.

La stabilisation de faisceaux au nanomètre est essentielle pour le succès des nouveaux collisionneurs linéaires avec des faisceaux nanométriques. Le groupe FLC a pour application finale et principale le projet CLIC, qui est un accélérateur linéaire électrons/positons constitué de deux faisceaux de 17 km de long face à face dont l'implantation est prévue au CERN. Sur cet accélérateur CLIC, la stabilisation est identifiée comme un problème critique de faisabilité, de performance et de coût. En effet, si les aimants ne sont pas stabilisés pour compenser en particulier le mouvement du sol, les faisceaux ne pourront pas se collisionner efficacement. Pour atteindre la luminosité désirée, les simulations ont montré que le mouvement du faisceau au point de collision doit être inférieur ou égal à 0,2 nm RMS à 0,1 Hz.

Pour obtenir de telles spécifications, différentes actions sont mises en œuvre tout au long de l'accélérateur, en particulier des contrôles de faisceau pour des basses fréquences (0 à environ 4 Hz) avec des aimants dédiés et des équipements de mesure de position du faisceau (BPM - Beam Position Monitor) ainsi que des actions mécaniques pour stabiliser au mieux les aimants de l'accélérateur à des fréquences supérieures (> 4 Hz). Dans ce cadre, l'équipe FLC est responsable de la focalisation finale du faisceau de CLIC, c'est-à-dire au niveau de la collision entre les deux faisceaux. Elle a d'ores et déjà démontré la faisabilité du contrôle de la trajectoire du faisceau [0 - ≈ 4 Hz] lors des années précédentes et elle se concentre dorénavant sur la stabilisation des aimants (> 4Hz).

Outre cet objectif dédié CLIC, le groupe FLC a pu développer une forte compétence en analyse et contrôle vibratoire qui est reconnue et sollicitée dans le domaine des accélérateurs (ex : démonstrateur d'accélérateur linéaire ATF2) et au sein de l'IN2P3.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Contrôle actif des aimants du final focus du projet CLIC

Au cours des dernières années, les études dédiées au contrôle de vibrations des aimants

du final focus ont permis des progrès très significatifs. Le groupe a en effet démontré la faisabilité d'asservir à une échelle sous-nanométrique (0,6 nm RMS à 4 Hz) une table active, conçue et réalisée au laboratoire, et qui était principalement composée de 4 actionneurs piézoélectriques. Pour ce contrôle, le système avait été équipé de quatre capteurs de deux technologies complémentaires que sont les géophones pour les basses fréquences (domaine sismique) et les accéléromètres pour des fréquences supérieures, leur association permettant ainsi de mesurer une large bande de fréquences qui couvre l'intégralité de la bande passante nécessaire. Bien que ce résultat ait été une grande avancée pour le projet, la spécification n'avait pas été atteinte ; la limitation étant liée aux performances et aux caractéristiques des capteurs utilisés. Ces derniers sont en effet très performants pour réaliser des mesures dans leur domaine d'utilisation (sismique, génie civil, structures...)

mais peu adaptés à l'utilisation en contrôle dans des applications très spécifiques telles que l'environnement d'un accélérateur. L'équipe a donc entrepris un programme de R&D afin de réaliser un capteur de vibrations dédié à cette problématique de contrôle vibratoire. Ainsi, une approche originale et innovante, basée sur une mesure de déplacement d'un système de suspension basse fréquence de haute technicité et dont les modes de résonance ont été optimisés pour exploiter une large gamme de fréquences, a été mise en œuvre et a fait l'objet d'un dépôt de brevet (FR 13 59336). Plusieurs prototypes successifs ont été mis au point et les résultats ont été de très bonne qualité puisque les performances atteintes en mesure sont comparables aux meilleurs capteurs industriels. La figure [fig. 1] est une photo du capteur, un schéma de son principe de fonctionnement et une étude comparative réalisée dans un ancien tunnel du CERN (ISR) avec des capteurs commerciaux.

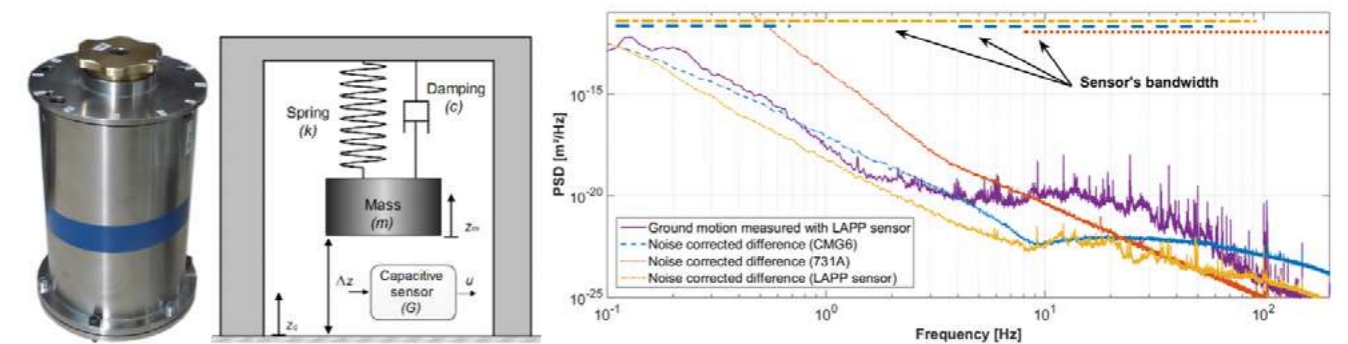


Figure 1 : Capteur de vibrations du LAPP et schéma de principe. Comparaison de capteurs réalisée au CERN (tunnel ISR)

INTRODUCTION

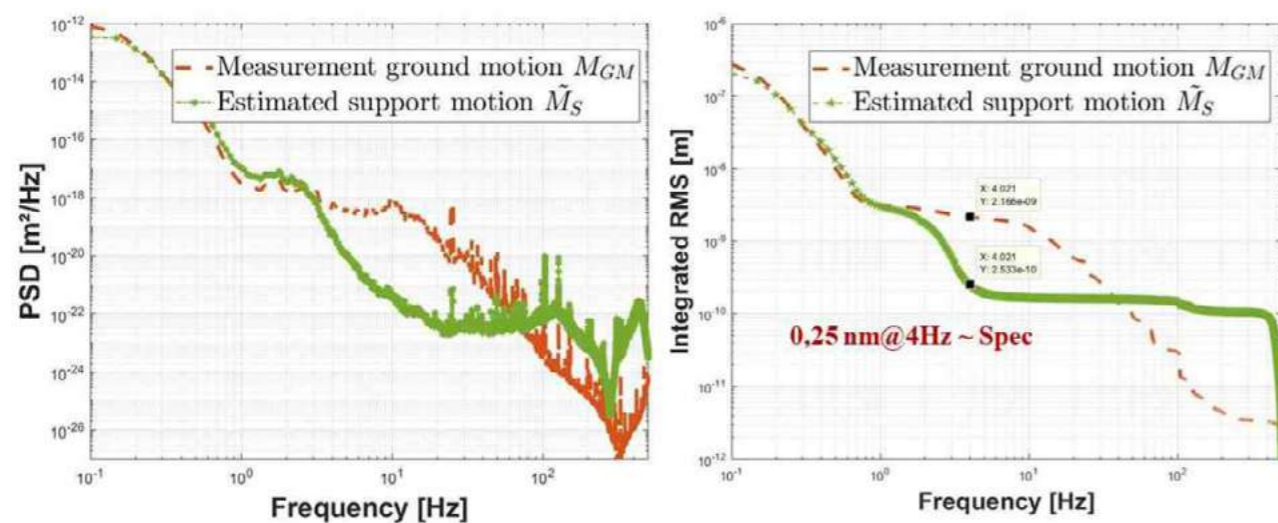
Le groupe FLC, anciennement LAViSta, a été créé en 2004 suite à l'intérêt croissant de la communauté pour les accélérateurs linéaires. FLC regroupe une équipe du LAPP ainsi qu'une équipe du laboratoire de mécatronique SYMME de l'Université Savoie Mont Blanc. Les objectifs du groupe ont suivi les différents financements obtenus (ex : projets européens) et le groupe a vraiment pu s'investir dans le sujet en 2005 avec l'arrivée d'un thésard, puis l'embauche de 2 CDD IR pendant 3 ans.

Ce capteur, efficient pour une utilisation en mesure, a principalement été optimisé pour une utilisation en contrôle. Le groupe l'a donc intégré dans le système de contrôle actif de vibrations de la table active. Avec les capteurs commerciaux, 2 capteurs étaient installés sur la partie supérieure de la table pour être utilisés en feedback (calcul rétroactif de l'action en fonction du mouvement mesuré sur la table) et 2 autres capteurs étaient installés au sol pour être utilisés en feedforward (calcul de commande prédictive en fonction de l'estimation du mouvement de la table qui est engendré par le mouvement du sol). Grâce à cette nouvelle technologie, un seul capteur a été placé sur la table pour réaliser le contrôle actif de vibrations en boucle fermée, ce qui a simplifié et optimisé les lois de contrôle, et un seul capteur placé au sol utilisé uniquement en monitoring pour estimer l'atténuation ainsi obtenue. La figure [fig. 2] est une photo du dispositif : table active et capteurs de vibrations.



Figure 2 : Table active, capteurs de vibrations (bleu: mesure du mouvement du sol, rouge : contrôle feedback).

Les résultats obtenus sont ainsi améliorés par rapport aux capteurs commerciaux et les spécifications sont presque atteintes comme en témoignent les figures [fig. 3]. A noter que ces résultats ont fait l'objet d'une publication de revue internationale.



Figures 3 : Densité spectrale de puissance (PSD) et valeur moyenne quadratique (RMS) des résultats obtenus avec la table active et le capteur de vibrations développés.

Les résultats précédents ont été obtenus dans le hall mécanique du LAPP où l'excitation due aux mouvements du sol est différente de celle que l'on peut rencontrer dans un environnement accélérateur classique. Néanmoins, comme les résultats de simulation sont en parfaite adéquation avec les résultats expérimentaux, il a été possible de transposer cette étude sur une simulation d'un cas concret. Ainsi, le mouvement mesuré sur le détecteur CMS (Compact Muon

Solenoid) au CERN a été pris en compte car il présente une amplitude d'excitation importante et réaliste même si supérieure à celle attendue sur CLIC. Celui-ci a été intégré dans les simulations et, malheureusement, la distribution des vibrations observée sur une telle structure est répartie sur une très large bande de fréquences. Par suite, le résultat obtenu est dégradé et ne répond plus aux spécifications si seul le contrôle actif initialement développé est mis en œuvre.

Pour outrepasser cette difficulté, le contrôle actif de vibrations a été couplé, en simulation, avec une solution d'isolation passive. Ainsi, l'étude réalisée révèle qu'une solution commerciale standard (résonance naturelle autour de 25 Hz) serait suffisante pour atteindre les spécifications et donc qu'un pré-isolateur dédié tel qu'imaginé initialement par la collaboration ne serait pas nécessaire, ce qui réduit considérablement le coût et simplifie un potentiel dispositif final. Les résultats obtenus ont ainsi permis de valider le principe du capteur développé, mais cet élément étant identifié comme la limite principale, il a été conjointement décidé avec le CERN qu'une comparaison multi-technologies était nécessaire afin de définir quel élément sensible devait être intégré dans le capteur final en terme de performance, bruit instrumental, fiabilité, intégration, maintenance, coût pour la mesure du mouvement différentiel de la masse interne... Cette étude a été initiée dans le cadre d'une thèse (programme Marie Curie) pour laquelle le LAPP était partenaire académique. Par la suite, quatre capteurs de déplacements nanométriques ont été sélectionnés et approvisionnés par le LAPP et le CERN : une paire d'électrode capacitive, un interféromètre commercial Fabry-Pérot, un codeur optique et un interféromètre intégré multi-pass. La stratégie choisie est d'utiliser la mécanique du capteur initial et d'y intégrer simultanément l'ensemble de ces technologies pour réaliser une comparaison temps réel simultanée. Cette étude comparative est en cours et permettra prochainement de déterminer le meilleur candidat à intégrer au capteur de vibrations du LAPP pour espérer atteindre les spécifications de CLIC.

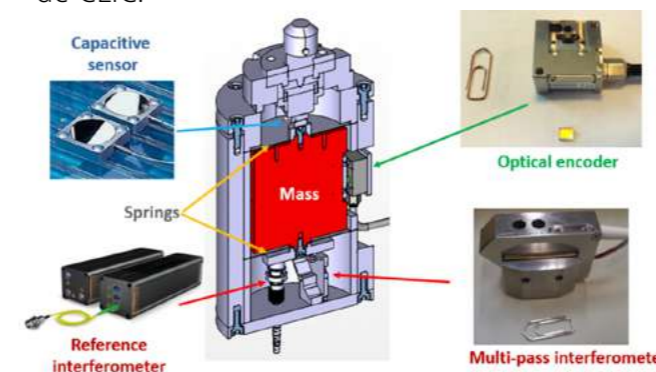


Figure 4 : Comparaison de technologies pour la mesure du mouvement différentiel de la masse interne du capteur : électrodes capacitatives, encodeur optique, interféromètre et interféromètre Multi-pass.

Optimisation du faisceau du démonstrateur d'accélérateur linéaire ATF2

Le groupe s'implique également sur d'autres projets scientifiques, en particulier sur le démonstrateur d'accélérateur linéaire ATF2 situé sur le site de KEK au Japon. L'équipe est partie prenante de la démonstration de faisabilité d'un faisceau nanométrique et a été ainsi, au cours de la dernière décennie, en charge de l'étude, la réalisation, l'installation et la mise en service des doublets finaux et de leurs supports, mais également de l'ensemble des mesures vibratoires du site et de l'identification des sources de vibrations.

Le groupe a tout d'abord réalisé une mise à jour des supports d'aimants. En effet, sur la ligne de focalisation finale, deux aimants, QF1 et QD0, jouent un rôle essentiel pour obtenir la taille de faisceau de quelques dizaines de nanomètres. L'aimant initial QF1 de 450 kg a été remplacé par un aimant plus puissant, plus grand et plus lourd de 1200 kg. Après avoir identifié que les modes propres de l'ensemble support/aimant doivent être à la plus haute fréquence possible pour minimiser leur impact sur la stabilité du faisceau d'e-, le LAPP a développé un nouveau support depuis la conception, les calculs de modes propres jusqu'à la réalisation. Une fois installé sur ATF2 au Japon, l'équipe a fait des campagnes de mesures de vibrations. Le RMS du déplacement relatif à 1 Hz a été amélioré d'un facteur 6 en direction horizontale descendant à 52 nm et d'un facteur 4 en direction verticale à 6 nm permettant ainsi de répondre aux spécifications de vibrations.

De plus, des campagnes de mesures minutieuses du mouvement du sol tout le long de la ligne de faisceau ont permis de détecter une source de vibrations parasite à 16.5 Hz intermittente, en excluant des effets de certains systèmes de refroidissement ou d'alimentations électriques. L'identification de cette source est toujours en cours.

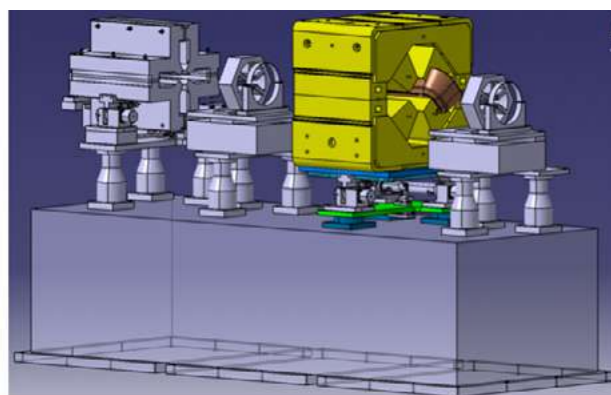


Figure 5 : CAO de la focalisation finale ATF2 : en jaune QF1, Bleu et vert, nouveau support LAPP - QF1 sur son nouveau support dans ATF2.

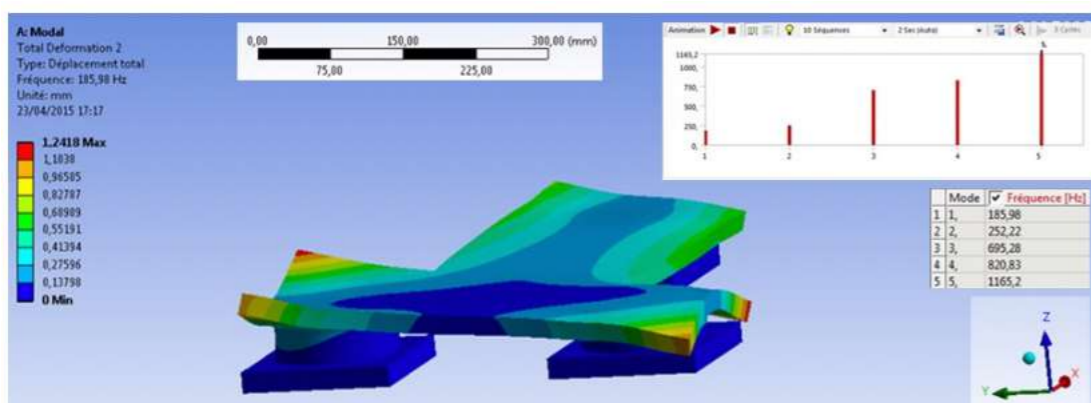


Figure 6 : Calcul modal du support LAPP

Enfin depuis 2017, le groupe participe à la mise en place d'un contrôle de faisceau spécifique nommé « feedforward ». Il s'agit d'une méthode alternative ou complémentaire au contrôle actif des éléments de l'accélérateur. A partir de la mesure du mouvement du sol et/ou des aimants, les perturbations induites sur le faisceau sont estimées et par conséquent inhibées à l'aide d'aimants dipôles spécifiques dénommés kicker, qui permettent de dévier le faisceau suivant l'axe vertical.

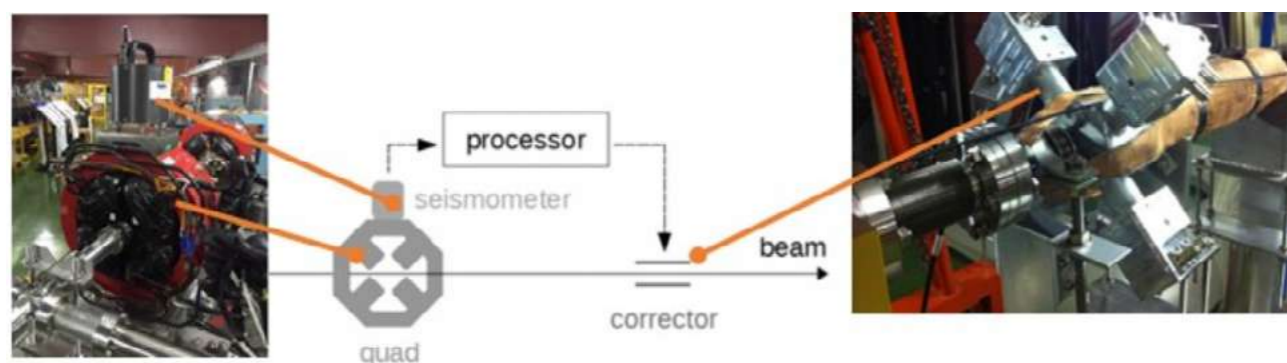


Figure 7 : Principe de fonctionnement du feedforward.

La faisabilité de cette démarche a été démontrée par une équipe du CERN. Néanmoins, les simulations optiques réalisées montrent tout d'abord l'intérêt d'une approche multi-capteurs (mesures simultanées du déplacement de plusieurs aimants) et surtout de l'intérêt de cette méthode au final focus.

Pour mettre au point les lois de commande, une mission sur site a été réalisée en 2017 afin d'évaluer les paramètres du contrôle et une mission mi-2018 pour l'apprentissage du système et la réalisation des premiers tests.

Système de mesures et d'analyses de vibrations dédié au détecteur Belle II de l'expérience SuperKEKB au Japon

L'objectif est d'installer, de part et d'autre de l'expérience Belle II, un système de mesures et d'analyses continu des vibrations du sol - aimants afin d'observer l'influence des vibrations sur l'efficacité du système d'asservissement de l'orbite faisceau qui doit maintenir les deux faisceaux en collision en X et en Y à l'IP (la taille verticale du faisceau de SuperKEKB est 60 nm, similaire à celle d'ATF2).

Dans cette optique, un système d'acquisition, déjà développé au sein du groupe, a été adapté aux besoins spécifiques de l'expérience [fig. 8].

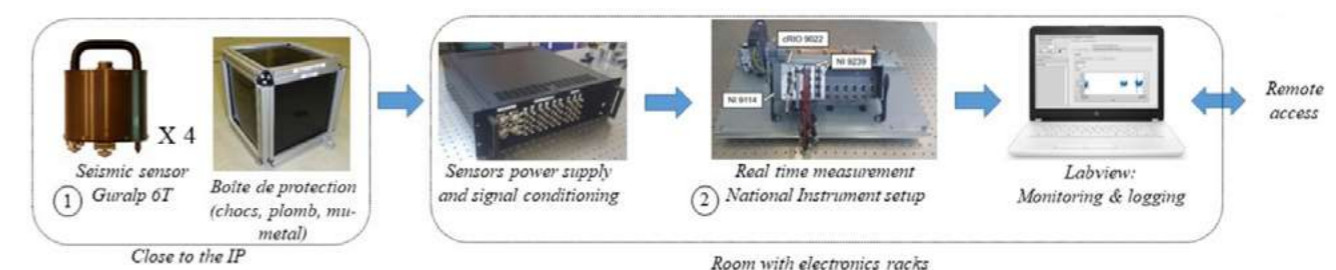


Figure 8 : Chaîne d'acquisition dédiée à l'analyse de vibrations de SuperKEKB - Belle II.

L'installation de ce système va débuter fin 2018 pour une mise en route finale début 2019.

PERSPECTIVES

A court terme, le groupe a pour objectif de finaliser les développements en cours et de publier les résultats obtenus, que ce soit sur le capteur de vibrations multi-technologie CLIC et sur le contrôle de faisceau feedforward d'ATF2. L'équipe va également réaliser la mise en service du système de monitoring dédiés à l'expérience Belle II de l'accélérateur SuperKEKB.

A plus long terme, les orientations vont fortement dépendre des prochaines décisions concernant les projets ILC, CLIC et FCC qui détermineront également l'avenir des démonstrateurs tels que ATF2 ou CTF3. Néanmoins, l'objectif est de pérenniser notre savoir-faire et de renforcer nos responsabilités sur l'analyse et le contrôle vibratoire, en particulier au niveau de la focalisation finale qui présente les spécifications les plus strictes, mais également de développer notre savoir-faire et nos implications sur le contrôle de faisceau.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

Auteurs - Publications de revue

- 1** G. Balik, B. Caron, B. Aimard, L. Brunetti, G. Deleglise,
Vibration control using a dedicated inertial sensor, IEEE Sensors Journal, Volume 18, Issue 1, 428-435 (2018)
- 2** G. Balik (LAPP), B. Caron (SYMME), D. Schulte, J. Snuverink, J. Pflingstner (CERN),
Integrated simulation of ground motion mitigation, techniques for the future compact linear collider (CLIC), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 700, 163-170 (2013)
- 3** G. Balik, J. Allibe, J.P. Baud, L. Brunetti, G. Deleglise, A. Jérémie, S. Vilalte (LAPP), B. Caron, A. Badel, R. Le Breton (SYMME),
Sub-nanometer active seismic isolator control, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 24 (15) 1785-1795 (2013)

Co-Auteurs - Publications de revue

- 4** D. Bett et al.
Compensation of orbit distortion due to quadrupole motion using feed-forward control at KEK ATF, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 895 10-18 (2018)
- 5** Pflingstner et al.,
Mitigation of ground motion effects in linear accelerators via feed-forward control, Physical Review Special Topics - Accelerators And Beams 17, 122801 (2014)
- 6** R. Le Breton, A. Badel, B. Caron, J. Lottin (SYMME) G. Deleglise, J. Allibe, G. Balik, A. Jeremie, S. Vilalte (LAPP),
Nanometer scale active ground motion isolator, Sensors and Actuators A: Physical (2013)

Auteurs - Publications de conférence

- 7** G. Balik, B. Aimard, L. Brunetti, B. Caron,
Proof of concept of CLIC final focus quadrupoles stabilization, In Proceedings of International Particle Accelerator Conference (IPAC 2017), Copenhagen, Denmark, 2017
- 8** G. Balik, B. Caron, N. Allemandou, J. Allibe, L. Brunetti, J.-P. Baud, C. Hernandez,
Active vibration isolation system for CLIC final focus, In Proceedings of International Particle Accelerator Conference (IPAC 2014), Dresden, Germany

Co-Auteurs - Publications de conférence

- 9** P. Novotny et al.,
What is the best displacement transducer for a seismic sensor?, IEEE Inertial Sensors and Systems 2017, Hawaii, USA

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

- L. Brunetti, juin 2017**
CLIC QD0 stabilisation progress, ALCWS 2017, Americas Workshop on Linear Colliders, Stanford University
- G. Balik, mai 2017**
Proof of Concept of CLIC Final Focus Quadrupoles Stabilization, IPAC 2017 8th International Particle Accelerator Conference, Copenhagen, Danemark
- G. Balik, juin 2014**
Active vibration isolation system for CLIC final focus, IPAC 2014 International Particle Accelerator Conference, Dresden, Allemagne
- L. Brunetti, novembre 2013**
QD0 stabilisation, LCWS 2013 International Workshop on Future Linear Colliders, Tokyo, Japon
- J. Allibe, mai 2013**
CLIC QD0 stabilisation, ECFA 2013 European Linear Collider Workshop, Hambourg, Allemagne

FCC

FUTURE CIRCULAR COLLIDER



LE DÉVELOPPEMENT ET LA CONCEPTION DU FUTUR SYSTÈME DE COLLIMATION POUR FCC-HH ET L'ANALYSE DE L'IMPACT DES VIBRATIONS SUR LES PERFORMANCES DES ACCÉLÉRATEURS DU PROJET FCC.

RÉSUMÉ

Le groupe FCC est responsable du développement et de l'analyse des simulations de collimation pour FCC-hh avec des imperfections des collimateurs et de l'optique de l'accélérateur (tracking des protons le long de l'anneau et interaction du faisceau avec les matériaux du collimateur pour produire des cartes de pertes : loss maps).

En parallèle, le groupe a organisé plusieurs réunions au cours de l'année 2018 pour déterminer les sujets de collaboration avec le groupe du CERN chargé du développement et de la construction des collimateurs et, aussi, pour étudier la possibilité d'appliquer les compétences en analyse et contrôle vibratoire du LAPP sur le projet FCC.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

Développement et analyse des simulations de collimation pour FCC-hh avec des imperfections des collimateurs et de l'optique de l'accélérateur.

Participation à la rédaction du document Conceptual Design Report (CDR) pour FCC.

Octobre 2017 - Le groupe FCC a été créé par G. Lamanna suite à l'intérêt croissant du LAPP pour les accélérateurs, en particulier pour FCC en raison de la position stratégique du laboratoire.

Les exigences de nettoyage du faisceau dans le FCC-hh dépassent celles des machines précédentes de plusieurs ordres de grandeur.

COLLABORATION & ÉQUIPE DU LAPP

CERN

Groupe collimateur (BE-ABP) en charge de la physique des accélérateurs et faisceaux et du développement des codes de simulation.

Post-doc

M. Serluca (depuis octobre 2017)

Maître de conférence

A. Dominjon (depuis septembre 2017)

Dans un collisionneur, les pertes de faisceau sont causées par différents facteurs : collisions aux points d'interaction, interaction des particules du faisceau avec le gaz résiduel, interactions des particules entre elles à l'intérieur des paquets, instabilités du faisceau ou variations de la dynamique au cours d'un cycle d'exploitation. Tous ces effets peuvent varier dans le temps, en fonction de divers paramètres liés au faisceau, à la machine et ils sont influencés par les erreurs de construction des collimateurs et les imperfections de l'optique de la machine.

Pour développer le système de collimation, des simulations sophistiquées avec le software SixTrack sont en cours de développement afin de prévoir les problèmes potentiels et de trouver des solutions innovantes.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

Conception et simulation du système de collimation pour FCC-hh

La figure [fig. 1] montre la structure de FCC-hh avec ses insertions : les deux insertions haute luminosité IRA et IRG, deux faibles intensités IRL et IRB, la partie accélératrice IRH, l'extraction IRD et les deux insertions de collimation bêta-tronique IRJ et du moment/énergie IRF.

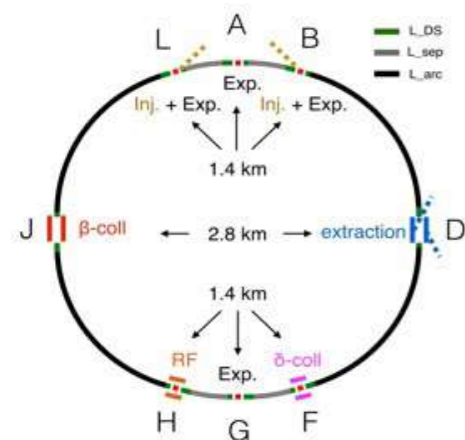


Figure 1 : La disposition de FCC-hh et ses insertions.

En fin 2017, le groupe FCC a été créé et a commencé à participer à des réunions avec le CERN pour définir les collaborations pour le projet FCC. Pour les simulations, le groupe a entrepris l'étude des performances du système de collimation, en tenant compte des diverses imperfections inévitablement présentes dans le système. Les effets dus aux imperfections mécaniques des collimateurs (non-parfaite planéité des mâchoires) et du support mécanique conduisent à des erreurs d'alignement transversal et angulaire (montré à la figure [fig. 2]). Les imperfections des champs magnétiques et les alignements des éléments de l'accélérateur induisent une variation de l'orbite qui affecte non seulement la stabilité du faisceau, mais également le système de collimation. Ces éléments, ainsi que d'éventuelles erreurs de positionnement des ouvertures mécaniques le long de l'accélérateur, affectent ses performances et doivent être pris en compte pour parvenir à une conception réaliste des futurs collisionneurs.

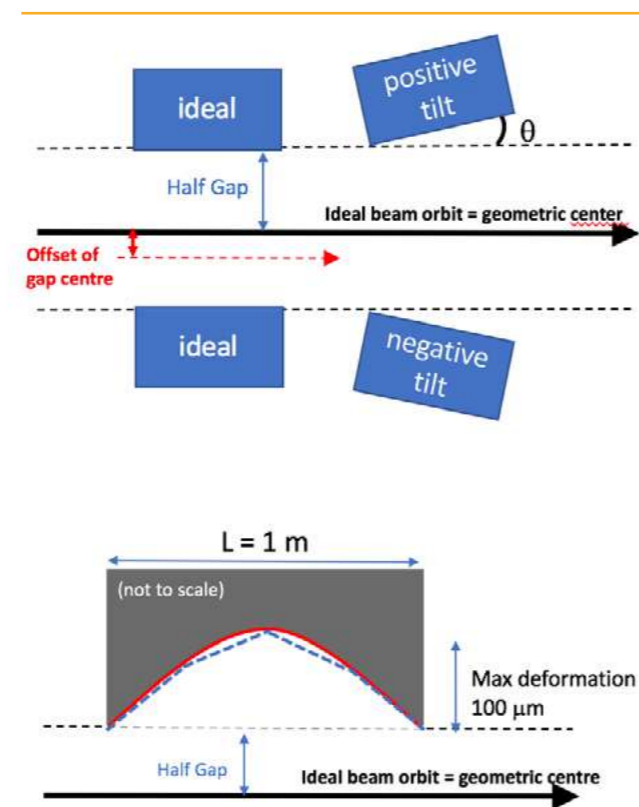


Figure 2 : Erreurs d'alignement transversal et angulaire (image en haut), non-parfaite planéité des mâchoires (image en bas).

En 2018, une campagne de simulation a été lancée pour évaluer les effets des imperfections sur les cartes de pertes (loss maps). Différents types d'imperfections et diverses combinaisons ont été envisagés, entraînant un temps de calcul de l'ordre de plusieurs dizaines d'années de temps CPU, et ont été réalisés sur les clusters du CERN. Une première campagne de simulation préliminaire a été réalisée au début de l'année 2018 et les résultats ont été présentés lors de la conférence annuelle de la FCC à Amsterdam. Des développements ultérieurs dans la conception des machines et dans l'optique ont été intégrés aux simulations et les résultats seront publiés dans le CDR qui sera achevé à la fin de 2018.

Les cartes de perte indiquent le pourcentage de protons qui sont interceptés par des collimateurs ou qui ont un impact sur les ouvertures des différents aimants. Le système de collimation doit minimiser la possibilité que des protons de haute énergie impactent les aimants chauds (température ambiante) en raison d'un problème de durabilité et des aimants froids (supraconducteurs), afin d'éviter le quench des aimants ou, au pire, leur rupture.

La figure [fig. 3] montre la carte de pertes dans le cas idéal sans imperfections (image ci-dessus) et un exemple dans le cas d'imperfections (image ci-dessous). La plupart des pertes se situent dans les collimateurs (lignes noires). Les pertes les plus intéressantes sont celles des éléments supraconducteurs (lignes bleues) qui, dans le cas idéal, sont presque absentes alors que dans le cas des imperfections, elles sont plus abondantes et localisées dans différentes zones de l'accélérateur. Le but de l'étude est de montrer que même en cas d'imperfections, le niveau d'énergie libéré dans les supraconducteurs ne dépasse pas un certain seuil menant à la quenching.

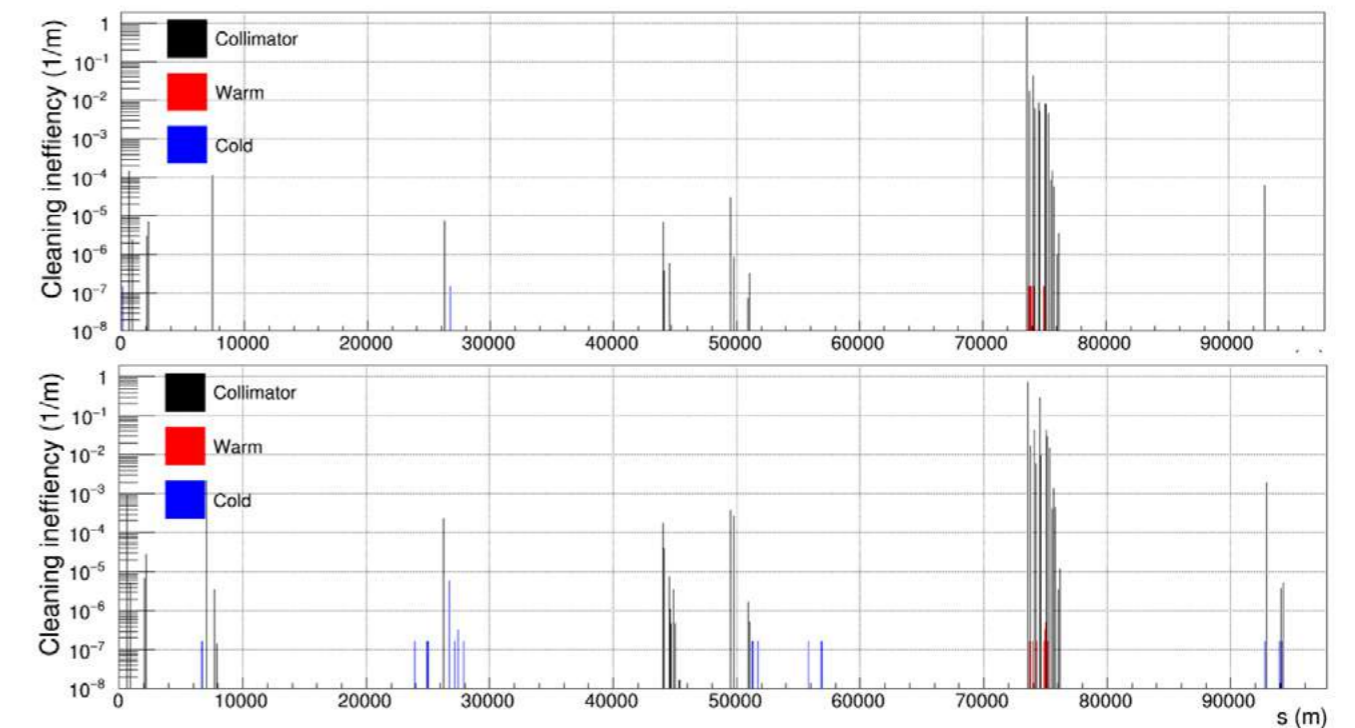


Figure 3 : Les cartes des pertes pour le cas idéal (ci-dessus) et un exemple avec imperfections. Lignes noires-collimateurs, rouges-aimants chauds et bleues-aimant froides.

PERSPECTIVES

A court terme, le groupe a pour objectif de poursuivre l'activité de simulation en suivant les développements en matière d'optique et de disposition de la machine, et de participer au développement du code de programmation avec de nouveaux outils tels que l'interface FLUKA vers SixTrack, permettant de simuler avec beaucoup de détails aussi les produits d'interaction entre les protons du faisceau et les constituants des matériaux utilisés dans les collimateurs.

Le groupe souhaite également finaliser la collaboration avec le groupe d'ingénierie du CERN afin de lancer également des activités expérimentales, en particulier pour le développement de nouveaux matériaux et des tests réalisés dans le laboratoire HiRadMat du CERN.

Un autre domaine d'intérêt concerne les effets vibrants sur les performances des accélérateurs FCC qui permettraient d'utiliser le savoir-faire LAPP. Des réunions préliminaires ont eu lieu en 2018 et se poursuivront en 2019 pour comprendre quelle contribution le LAPP peut apporter.

À plus long terme, les orientations vont fortement dépendre des sujets qui seront étudiés. Toutefois, celles-ci seront choisis de manière à utiliser les compétences en ingénierie du LAPP.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

Co-Auteurs Publications du CDR
(Conceptual Design Report)

1 FCC CDR 2018, CERN

PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

M. Serluca , 2018
FCC, Future Circular Collider week Conference
à Amsterdam

INSTRUMENTATION & INNOVATION



Calcul scientifique & données

124

GEANT 4 - ASTERICS
CALCUL HAUTE PERFORMANCE
DEEP LEARNING - BIG DATA

CALCUL SCIENTIFIQUE ET DÉVELOPPEMENT NUMÉRIQUES

RÉSUMÉ

Le calcul scientifique de haute performance prend une part de plus en plus importante en physique, car les lots de données attendus sont énormes. Il est donc nécessaire de développer des méthodes et des algorithmes capables de gérer ces données, ainsi que de mettre ces solutions en commun entre plusieurs expériences. Le LAPP participe ainsi à plusieurs projets financés par l'Europe tels ASTERICS et XDC, qui ont pour but de mettre en commun des solutions logicielles pour différentes expériences. Les équipes du LAPP travaillent sur des sujets innovants comme le machine learning, qui permet de tirer le maximum d'informations des données des expériences. La simulation Monte Carlo est également un sujet d'étude au LAPP avec un travail sur l'outil Geant 4.

GEANT 4

Le LAPP contribue aux actions de validation de la suite d'exemples Geant4 qui portent sur les processus électromagnétiques. Plusieurs exemples de la suite ont été mis à jour et sont dorénavant opérationnels dans un environnement de calcul multi-thread. Une interface graphique générique de paramétrisation et d'exécution de ces mêmes exemples a été développée dans le but d'aider les nouveaux utilisateurs de Geant4 à prendre en main cet outil logiciel.

Un projet plus avancé portant sur l'intégration de micro-parallélisme dans Geant4 est en attente. Il consisterait à collecter et grouper les événements similaires (particule, milieu et énergie de même grandeur) pour les exécuter en mode vectorisé en optimisant les appels aux boucles conditionnelles induites par les appels aux générateurs de nombres aléatoires.

Instrumentation & innovation
Calcul scientifique & données

125

ASTERICS

Le projet ASTERICS (Astronomy ESFRI & Research Infrastructure Cluster) est une infrastructure de recherche financée par la commission européenne dans le cadre du programme Horizon 2020, et rassemble 22 instituts d'astronomie, d'astrophysique et de physique des astroparticules. Le montant total du financement est de 15 millions d'euros, entre mai 2015 et mai 2019. ASTERICS a pour but de résoudre les grands problèmes de big data pour les expériences d'astrophysique, d'astroparticules et d'astronomie. L'idée est de promouvoir les synergies entre ces expériences et de trouver des solutions communes aux nouveaux défis informatiques de ces expériences. Des outils communs sont développés pour permettre d'accéder aux très larges lots de données, pour les traiter, pour les transmettre, pour gérer les bases de données, etc. ASTERICS a pour ambition de rassembler les différentes expériences afin d'en faire un observatoire multi-longueurs d'onde et multi-messagers. Les expériences ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) concernées sont SKA, CTA, KM3NET et E-ELT, ainsi que les expériences EUCLID, LSST, Virgo/EGO, LOFAR, e-VLBI, H.E.S.S., MAGIC et ANTARES.

ASTERICS est constitué de cinq work packages qui ont pour chacun le rôle de répondre aux défis posés. Un de ces work packages se dénomme OBELICS (Observatory E-environments Linked by common ChallengeS), et est coordonné par Giovanni Lamanna, avec une forte contribution du LAPP. OBELICS est l'un des packages essentiel d'ASTERICS, et a pour but de permettre l'interopérabilité et la réutilisation des logiciels pour la génération de données, l'intégration et l'analyse. Des bibliothèques sont en cours de développement qui seront utilisables par un grand nombre d'expériences différentes. OBELICS cherche également des solutions pour le transfert de données, pour les bases de données géantes, pour des algorithmes d'analyse, etc.

Le groupe OBELICS au LAPP regroupe cinq permanents (H.E.S.S./CTA/LSST), quatre postdocs, ainsi que deux étudiants en thèse.

CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR CTA

Dans le cadre d'ASTERICS, un travail d'optimisation a été produit pour accélérer le traitement des données de CTA (voir le détail dans la partie CTA). Les informaticiens (dont une thèse soutenue en 2018) et les physiciens travaillent de concert pour améliorer les algorithmes en place. Ainsi, les différentes activités ont par exemple porté sur des algorithmes de compression/décompression extrêmement rapide, sur le développement d'un générateur de format de données, sur la vectorisation des codes existants, sur la méthode SVD (Single Value Decomposition), etc.

DEEP LEARNING - GAMMA LEARN

Le projet GammaLearn, détaillé dans la partie CTA, a été développé dans le cadre d'ASTERICS. Il s'agit d'une collaboration entre le LAPP, la PME Orobix, et le laboratoire LISTIC. En particulier, une thèse en informatique sur ce sujet a lieu au LAPP depuis 2017. Le projet GammaLearn s'intéresse à l'application du deep learning pour analyser les événements collectés par les télescopes CTA. L'idée est de développer des algorithmes originaux pour analyser l'image des caméras de CTA et en extraire des paramètres physiques tels l'énergie et la direction de la gerbe électromagnétique.

BASE DE DONNÉES LSST

Le groupe du LAPP a travaillé sur le produit Qserv développé par la collaboration LSST, qui permet un accès très rapide à des bases de données. Les fonctionnalités et les performances de Qserv ont été testées dans le cadre d'analyses cosmologiques, à l'aide d'une cinquantaine de machines dédiées.

WORKSHOPS ET ÉCOLE

ASTERICS a pour vocation de rassembler différentes communautés de l'astronomie, l'astrophysique et la physique des astroparticules. Ces communautés, qui s'articulent autour de grandes infrastructures de recherches que sont les ESFRI, bien que partageant des problématiques et des buts scientifiques communs, ont rarement l'opportunité de communiquer entre elles. Les workshops OBELICS fournissent un forum de discussion à ces communautés qui leur permettent de présenter dans le détail leurs problématiques liées au traitement des données ainsi que leurs spécificités. Les partenaires académiques et industriels sont également conviés aux workshops afin de présenter de nouvelles solutions et de construire des ponts entre ces communautés. Ces workshops ont déjà contribué à créer des relations fructueuses, par exemple avec la rencontre du LAPP et de son partenaire industriel Orobix dans le projet GammaLearn. Trois workshops ont été organisés dans le cadre d'ASTERICS :

- "Science Data Cloud & Computing models", 12 au 14 décembre 2016, Rome, Italie.
- "Astronomy & Astroparticle Physics assets in building the European Open Science Cloud", 16-19 octobre 2017, Barcelone, Espagne.
- "New paths in data analysis and open data provision in Astronomy and Astroparticle Physics", 23-26 octobre 2018, Cambridge, Royaume-Uni.

Une autre des prérogatives d'OBELICS est de former les chercheurs à l'utilisation de la programmation parallèle, des nouvelles architectures, des codes liés au big data, etc. Une école a été créée pour répondre aux besoins et à la demande forte de la communauté. Le format de l'école, le programme détaillé, le choix des professeurs, la logistique, tous ces détails ont été mis en place par une équipe du LAPP. Cette école a été organisée avec succès au LAPP du 6 au 9 juin 2017 pour la première édition, et du 4 au 8 juin 2018 pour la deuxième édition. Cette école est intitulée « Efficient and fast software programming in astronomy and astroparticle physics ». Elle a visé une large audience avec des étudiants en thèse, des postdocs et des chercheurs en astrophysique et astroparticules, avec à chaque fois une soixantaine de participants et une quinzaine de tuteurs [fig. 1]. Les thèmes portaient sur comment coder efficacement, la gestion de projet, la programmation parallèle et sur carte GPU, l'utilisation des bibliothèques Python, le machine learning, etc. Le langage choisi était Python, puisque celui-ci devient le standard en astrophysique.

Cette école a été un vif succès pour les deux éditions, autant dans son nombre de participants que dans sa tenue, et a répondu à un besoin croissant dans le monde scientifique d'aujourd'hui. L'école s'inscrit donc dans un vrai besoin actuel, et sera pérennisée sur plusieurs années.



Figure 1 : Participants de la seconde édition de l'école ASTERICS-OBELICS (4-8 juin 2018).

EXTREME DATA CLOUD (XDC)

Le LAPP participe au projet eXtreme DataCloud (XDC), qui a pour but de développer une technologie pour fédérer les ressources de stockage et gérer les données dans un environnement de calcul hautement distribué. Le budget total est d'environ 3 millions d'euros, pour une durée de 27 mois à partir du 1^{er} novembre 2017.

Il est basé sur des outils existants que le projet va enrichir avec de nouvelles fonctionnalités. L'expérience CTA va être l'un des cas d'utilisation pour l'outil XDC, qui devra donc définir et tester les nouvelles fonctionnalités dans le cadre du standard OAIS (Open Archive Information System) préconisé par l'expérience et du modèle de calcul et archive distribuée prévu. CTA va effectivement produire de très grandes quantités de données : au maximum 330 To/jour, soit 40 Po/an pour 1300 heures d'observation et dans l'hypothèse d'une réduction de volume des données par intégration des pixels non significatifs. Etant limité par la connexion réseau, le volume devra être divisé par 10, et CTA accumulera 4 Po/an pour les données brutes. En comptant les données reconstruites, les données réduites, les copies, le Monte Carlo, CTA produira 27 Po/an. Ces lots de données énormes devront être archivés pendant au moins 40 ans. Le projet XDC sera essentiel pour gérer ces quantités de données sans précédent.

XDC sera capable de gérer intelligemment des données, suivant leur niveau de reconstruction, avec des règles d'archivage complexes (stockage sur disque ou cassette, nombre de copies, nombre de versions, distribution entre sites etc.). Il permettra également de gérer la façon dont les données et les métadonnées sont ingérées dans le système d'archivage. En effet, la solution XDC qui sera testée permet aux expériences d'implémenter des règles d'extraction des métadonnées à partir des fichiers. Ces métadonnées sont ensuite indexées par le logiciel d'archive dans une base de données. Ainsi, les utilisateurs peuvent interroger l'archive puis télécharger des fichiers en utilisant des critères de recherche basés sur ces métadonnées.

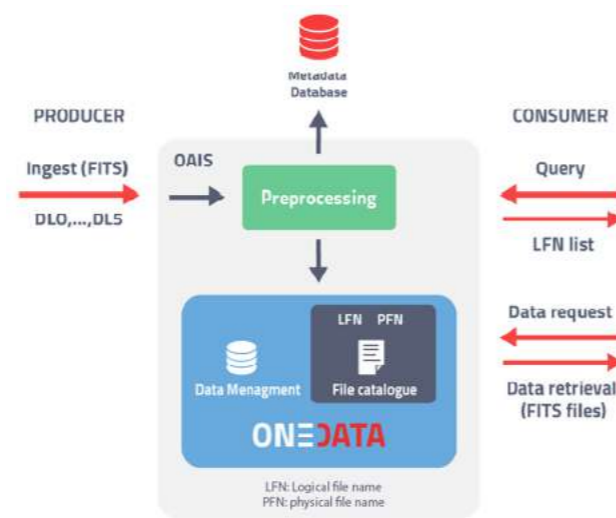


Figure 2 : Cas d'utilisation de XDC pour l'ingestion des données de CTA.

PERSPECTIVES

Il apparaît clairement que le calcul scientifique et les développements numériques vont prendre une place de plus en plus importante au sein du laboratoire et des groupes de physique. Les énormes lots de données produits par des expériences comme ATLAS, CTA ou LSST induisent des évolutions majeures pour le stockage et le calcul distribué, pour la performance des algorithmes, ou pour les méthodes de classification basées sur l'intelligence artificielle. Les groupes de physique du laboratoire utilisent les algorithmes tel le machine learning pour accélérer le traitement des données ou discriminer le signal et le bruit de fond. Les interactions entre physiciens et informaticiens, déjà bien présentes au sein du laboratoire, seront encore plus fondamentales dans le futur proche pour aider à utiliser les outils présents, les améliorer, ou utiliser du matériel ultra performant (comme le calcul sur cartes GPU). Les projets européens tels ASTERICS ou XDC permettent de tels échanges et favorisent le développement d'outils novateurs. ASTERICS prendra fin en 2019, mais ces échanges seront prolongés à l'aide du projet européen ESCAPE qui verra le jour fin 2018.

INSTRUMENTATION & INNOVATION



Plateforme MUST

130

MUST



MÉSOCENTRE DE CALCUL ET DE STOCKAGE OUVERT SUR LA GRILLE EGI/WLCCG

RÉSUMÉ

Depuis plus de dix ans, le mésocentre MUST, également ouvert à des partenaires industriels, répond aux besoins de calcul scientifique de l'Université Savoie Mont Blanc. Il présente la particularité de s'inscrire dans trois contextes : universitaire, national comme mésocentre et international comme nœud de grille au sein de l'e-infrastructure EGI.

Il prend part en tant que site Tier 2 au traitement des données scientifiques du LHC au sein de WLCG (Worldwide LHC Computing Grid). Grâce à son intégration dans l'infrastructure européenne EGI (représentée par France Grilles), MUST est utilisé par une communauté scientifique élargie dans les domaines de la Physique, Astrophysique, Sciences de la Terre et Simulation Monte-Carlo.

La spécificité de cette plateforme de calcul et de stockage tient essentiellement à son approche intégratrice. Elle s'adresse à des communautés d'utilisateurs de domaines scientifiques divers, incluant au sein d'une même plateforme des moyens de calcul et de stockage, des accès locaux ou distants et des technologies hétérogènes (HTC, HPC, GPU). C'est la convergence de besoins, des moyens et des compétences venant de l'Université, du CNRS, de l'IN2P3, des expériences (ATLAS, LHCb, CTA, ILC, LSST, GEANT...) qui en font le succès.

COLLABORATION & ÉQUIPE DU LAPP

MUST est le Mésocentre de l'Université Savoie Mont Blanc, également labellisé depuis 2017 en tant que plateforme IN2P3/CNRS. Le LAPP est le laboratoire hôte de la plateforme IN2P3.

Les cinq autres laboratoires partenaires sont : LAPH CNRS/USMB, LEPMI CNRS/USMB – calcul, High Performance Computing, EDYTEM CNRS/USMB, LAMA CNRS/USMB, LECA CNRS/USMB, UJF, LISTIC USMB – traitement d'images sur GPUs

Le LAPP collabore également avec le CC-IN2P3 et les laboratoires IN2P3 impliqués dans le projet LCG-France et l'organisation nationale France Grilles.

Dans le cadre de WLCG (Worldwide LHC Computing Grid), MUST est site Tier 2 pour les utilisateurs du CERN et des laboratoires internationaux impliqués dans les expériences ATLAS et LHCb.

La collaboration s'étend à l'international vers les communautés d'utilisateurs de l'infrastructure européenne EGI, pour les Sciences de la Terre, GEANT4, ILC, LSST et CTA.

Membres de l'équipe technique MUST (mutualisée LAPP-LAPTh)

C. Barbier, F. Chollet, M. Cottin, E. Fede, S. Garrigues, M. Gougerot, P. Séraphin

Support aux expériences

C. Barbier (CTACG), F. Chollet (LCG-France),
S. Jézéquel (LCG-France, ATLAS), S. T'Jampens (LHCb)

Support Calcul Scientifique

C. Barbier

Instrumentation & innovation
Plateforme MUST

131

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2002

Le LAPP s'implique dans le projet DATAGRID coordonné par le CERN, précurseur de EGEE (Enabling Grids for E-science in Europe) et de LCG (LHC Computing Grid) avec comme objectif de fournir des outils performants aux chercheurs du laboratoire et un accès privilégié aux données du LHC.

2005

Réponse à l'appel d'offre ministère - MUST voit le jour sous l'impulsion de la direction du LAPP et de la présidence de l'Université de Savoie, aujourd'hui Université Savoie Mont Blanc, qui désirait doter ses laboratoires de recherche de moyens de calcul performants. MUST est officiellement mésocentre national et reconnu depuis comme tel.

2007

Inauguration officielle de MUST en tant que mésocentre de l'Université de Savoie, également site Tier 2 de la grille LCG pour le traitement des données des expériences ATLAS et LHCb.

2010

MUST devient nœud de calcul et de stockage pour CTA (CTACG)

2012

MUST propose une solution Infiniband permettant le calcul de type HPC (calcul parallèle haute performance).

2013

Le mésocentre MUST déménage dans une nouvelle salle informatique (170 m²) qui lui est entièrement consacrée dans la Maison de la Mécatronique de l'Université de Savoie.

2015

L'Université de Savoie change d'identité ; MUST devient mésocentre de l'Université Savoie Mont-Blanc et propose une solution permettant d'effectuer des calculs sur GPU (processeurs graphiques).

2016

MUST est parmi les plus importants sites mondiaux Tier 2 (Nucleus ATLAS) à fournir de l'espace de stockage pour ATLAS

2017

MUST est labellisé en tant que plateforme IN2P3.

INTRODUCTION

Inauguré officiellement le 25 septembre 2007, le projet MUST a permis la mise en production progressive d'une ferme de calcul de 3000 cœurs (unités de calcul équivalent à 23 Tflops) et d'une capacité de stockage de plus de 2,2 Peta-octets (fin 2017).

En tant que mésocentre de l'Université Savoie Mont Blanc, MUST a pour vocation de répondre aux besoins de calcul scientifique des chercheurs de l'Université quelle que soit leur discipline. Un support spécifique a été mis en place dès le début du projet et apporte depuis plus de dix ans une aide aux utilisateurs de la plateforme. Ainsi, au fil des années, une dizaine de laboratoires (LAPP, LAPTH, LEPMI-LMOPS, ISTERRE, LISTIC, LOCIE, SYMME, IMEP-LAHC, EDYTEM et LAMA) a bénéficié de ces moyens informatiques mutualisés.

Grâce à son intégration dans la grille européenne EGI/WLCG, le mésocentre MUST est également utilisé par une communauté scientifique élargie dans les domaines de la Physique des Particules, de l'Astrophysique, des Sciences de la Terre et de la simulation Monte-Carlo.

Son intégration, dès 2007 comme site Tier2 de la grille LCG (LHC Computing Grid) pour ATLAS et LHCb, puis comme nœud de calcul et de stockage pour CTA (CTACG) en fait l'une des ressources parmi les plus significatives pour un bon nombre d'expériences scientifiques de l'IN2P3. Dès 2012, la plate-forme MUST intègre de façon transparente au sein du cluster de calcul, 192 cœurs interconnectés par une solution de type Infiniband, dédiés au calcul de type HPC. Puis progressivement, à partir de 2015, des machines GPU ont été introduites pour les besoins des activités de recherche consacrées au Deep et au Machine Learning.

Aujourd'hui six laboratoires de l'Université de Savoie Mont Blanc sont partenaires du mésocentre MUST : LAPP, LAPTH, LEPMI, LISTIC, EDYTEM et LAMA.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU GROUPE DU LAPP

La genèse du projet est étroitement liée au démarrage des expériences installées au CERN auprès du collisionneur de particules LHC. Pour faire face au 15 Péta-octets de données par an générées au démarrage de la prise de données, le CERN a initié et coordonné différents projets de grille de calcul et de stockage financés par la communauté européenne.

A partir de 2002, le LAPP s'est impliqué dans les projets de grille DATAGRID, EGEE (Enabling Grids for E-science in Europe) mais également dans le projet LCG (LHC Computing Grid) avec comme objectif de fournir des outils performants aux chercheurs du laboratoire et un accès privilégié aux données du LHC.

Le projet MUST de mésocentre* de calcul et de stockage ouvert sur la grille a vu le jour en 2005 sous l'impulsion de la direction du LAPP qui avait décidé de créer un nœud de grille LCG destiné à l'analyse des données LHC, de l'équipe technique et de la présidence de l'Université de Savoie qui désirait doter l'ensemble des laboratoires de recherche de moyens de calcul performants.

Le point d'orgue fut l'annonce à l'été 2012 de la découverte d'une nouvelle particule compatible avec un boson de Higgs. A cette occasion, le rôle capital qu'a joué la grille de calcul du LHC dans cette découverte fut mise en avant.

Aujourd'hui, c'est notamment à travers le projet d'infrastructure de grille européenne EGI et en particulier sa composante liée au LHC (WLCG : Worldwide LHC Computing Grid) que le LAPP et la communauté de physique des particules inscrivent leurs besoins de calcul et stockage actuels et futurs.

En 2016, les engagements pris en tant que Tier-2 ont été reconnus par l'expérience ATLAS. Compte tenu de la volumétrie stockage importante disponible et du bon fonctionnement du mésocentre, MUST a été qualifié comme site « Nucleus » à même de réaliser une plus grande variété de traitements,

avec des exigences (notamment en entrées-sorties) plus importantes.

En 2017, dans le cadre de l'initiative lancée par la direction de l'IN2P3, MUST a été labellisée en tant que plateforme IN2P3 car répondant à des critères d'ouverture et de bonne gouvernance, d'excellence scientifique et technologique.

Les projets de recherche menés par les partenaires grâce au mésocentre

Entre 2013 et 2017, le taux de disponibilité du mésocentre, est resté largement supérieur à 95 % pour l'ensemble des services liés à la grille WLCG/EGI.

Sur la même période le taux d'utilisation est de l'ordre de 90 % en moyenne avec 76 % pour les utilisateurs de la grille (ATLAS, LHCb, CTA, LC), 24 % pour les laboratoires locaux de l'Université (LAPP, LEPMI, LAPTH, LISTIC, ...). Plusieurs logiciels commerciaux sont également accessibles en local tels : MATLAB, MATHEMATICA, ABAQUS ou MAPLE et ceci grâce à la mise en place d'une solution originale de gestion des licences propres à chaque communauté.

Un mésocentre est une infrastructure de service de niveau intermédiaire entre les grands centres de calcul et les postes de travail des équipes de chercheurs, dans notre cas à l'échelle de l'Université.

Le LAPP

Les premiers utilisateurs de MUST sont les expériences ATLAS et LHCb qui participent aux programmes LHC. En tant que nœud Tier 2 pour ces deux expériences, la ferme de calcul s'intègre complètement à la production dans le cadre de la simulation d'événements et de l'analyse de données en phase de test pour l'instant. L'intérêt du nœud de grille et surtout de son statut de Tier 2 WLCG pour les utilisateurs ATLAS et LHCb du laboratoire réside dans l'accès privilégié aux données et dans la mise à jour automatique des logiciels officiels des expériences. En acceptant ce statut, le LAPP s'est engagé à la fois en terme de qualité de service et niveau de disponibilité mais également en terme de puissance de calcul et de capacité de stockage dédiées. En 2017, MUST en tant que Tier 2 « Nucleus » a fourni à l'expérience ATLAS 1,75 Péta-octets de stockage disque et 540 000 jours de calcul CPU ce qui

représente 8 % du temps de calcul fourni par la France à l'expérience ATLAS.

Des expériences hors LHC, mais qui ont des besoins moindres ou potentiellement du même ordre, utilisent la ferme MUST. Ce sont les expériences HESS (télescope de rayons gamma), CTA (Réseau de Télescopes Čerenkov) et la simulation du détecteur SiD dans le cadre du Linear Collider. Entre 2013 et 2017, le computing CTA s'est organisé pour tirer parti des ressources mises à disposition par la plateforme MUST. En 2017, MUST a fourni 120 To de stockage et 5 % du temps de calcul mondial consommé par CTA via la grille. Au total, CTA a consommé 32 650 jours de calcul CPU sur 1 an dont 71 % via la grille EGI et 29 % par des utilisateurs locaux.

Dans le cadre de l'infrastructure EGI, la ferme MUST à travers le LAPP est utilisée par la collaboration Géant4 (simulation du passage des particules à travers la matière pour la physique des hautes énergies mais aussi pour des applications médicales, spatiales...) pour valider ses nouvelles versions. Le LAPP faisant une utilisation intensive de ces logiciels, il est intéressé à participer à cette activité qui ne nécessite que de la puissance de calcul ponctuelle.

En 2017, à la demande de l'équipe du laboratoire engagée dans le projet LSST, la plateforme MUST a été également ouverte à la communauté LSST afin de prendre part à l'activité de simulation via la grille EGI qui se met en place au sein de la collaboration DESC (Dark Energy Science Collaboration).

Les autres laboratoires partenaires du mésocentre

En dehors du LAPP, d'autres laboratoires de l'Université de Savoie ont bénéficié au fil des années du mésocentre MUST à savoir : LAPTH, LECA, LEPMI-LMOPS, ISTERre, IMEP-LAHC, EDYTEM, LAMA, LISTIC, LOCIE et SYMME. En 2017, six d'entre eux restent des partenaires assidus de MUST, en étant systématiquement présents aux comités de pilotage et en interagissant très régulièrement avec le LAPP. Les thématiques de recherche de ces laboratoires sont diverses et couvrent les champs de la physique théorique, de l'étude des matériaux, des hyperfréquences, des mathématiques,

de la tectonique et de l'environnement. Ils présentent tous comme caractéristique d'avoir recouru à des besoins de calcul et/ou stockage informatique, ce à quoi répond le mésocentre MUST.

En 2016, pour répondre au besoin exprimé par le laboratoire EDYTEM, un service de gestion de données iRODS a été évalué, proposé puis déployé par l'équipe technique. Il est désormais accessible sur MUST. Ce service propose toutes les fonctionnalités nécessaires aux laboratoires ou projets qui font face à une augmentation importante de la volumétrie des données scientifiques issues de leurs instruments. Le service permet de stocker de grandes collections de données, de les enrichir par un catalogue de métadonnées (informations relatives à l'état des données et à leur description). Il est également possible de mettre en place une politique de gestion des données en automatisant certaines actions de transfert, placement, conversion, contrôle d'accès et audit.

Ouverture au monde économique via la Fondation de l'Université Savoie Mont Blanc

En 2017, la Fondation de l'Université Savoie Mont Blanc qui intervient pour soutenir des projets dans le domaine du Numérique, s'est engagée à financer une phase d'étude pour l'évaluation des capacités d'ouverture de la plateforme au monde industriel avec l'entreprise PFEIFFER VACUUM en tant qu'entreprise pilote.

En 2017, une thèse CIFRE avec la société OROBIX sur l'analyse de très grandes masses de données d'astronomie a débuté.

Les utilisateurs EGI et France Grille

Les organisations virtuelles dans le cadre EGI : ESR (Sciences de la Terre) et GEANT4 (Simulation) sont également utilisatrices du mésocentre. Depuis peu, les ressources de calcul de MUST sont également utilisables en mode opportuniste par les communautés de chercheurs de la VO (organisation virtuelle) France Grilles, organisation nationale représentant EGI en France.

RÉALISATIONS TECHNIQUES

Hébergé dans les locaux du LAPP jusqu'en 2012 [fig. 1], l'un des faits marquants de l'année 2013 fut le déménagement de MUST dans la Maison de la Mécatronique, bâtiment universitaire hébergeant des bureaux et salles techniques et notamment une salle informatique de 200 m² (170 m² utiles). [fig. 2]



Figure 1 : Armoires hébergées au LAPP constituant le mésocentre MUST en 2012, année de la découverte du boson de Higgs



Figure 2 : Le mésocentre MUST depuis son installation dans la salle informatique de la Maison de la Mécatronique

Moyens et ressources

La configuration en place en fin d'année 2017 est constituée de serveurs de calcul en technologie lame correspondant à un total de 3000 cœurs (soit autant de tâches de calcul simultanées) auxquels sont associés à minima 2 Go de mémoire par cœur pour une puissance de 30000 HEP-SPEC06 (soit environ 23 Tflops). L'infrastructure dispose également de deux types de stockage : 220 To de stockage Haute Performance en technologie SAN et 2,2 Po de stockage capacitif en technologie DAS. Le cœur de réseau de l'infrastructure est composé d'un switch en technologie 10 Gb/s sur lequel sont connectés en direct les serveurs de données. Chaque serveur de calcul possède en standard deux interfaces réseau à 1 Gb/s chacun. De plus, un sous ensemble de 16 serveurs destinés au calcul parallèle (HPC), possède également un système d'interconnexion de type Infiniband permettant des débits théoriques de 40 Gb/s entre ces nœuds de calcul.

Les cahiers des charges associés aux investissements pour la ferme de calcul ont été établis à partir des critères suivants définis selon les besoins des utilisateurs, les contraintes de l'infrastructure existante et de l'équipe d'exploitation :

- Performances en calcul scalaire dans un environnement LINUX (Scientific Linux) et support calcul parallèle.
- Evolutivité de la solution (volumétrie et performances) : pour prendre en compte les besoins futurs, une architecture qui puisse évoluer en nombre de nœuds et en type de nœuds pour profiter sans contrainte des évolutions technologiques du futur.
- Facilité d'administration : l'équipe d'administration étant réduite, la surcharge d'une solution technique de cette envergure n'est envisageable que si le maximum de moyens est fourni pour en faciliter l'administration, en particulier des outils de mise à jour du système d'exploitation et des logiciels installés sur les nœuds.
- Intégration au sein d'une même plateforme de ressources et services pour le calcul HTC, HPC, le calcul sur GPU, le stockage et la gestion des données scientifiques

● Contraintes d'infrastructure de salle informatique: le choix de lames de calcul a permis d'optimiser la consommation électrique de la ferme de calcul et la place physique occupée dans les premières années. Aujourd'hui, c'est un ensemble de bonnes pratiques qui oriente les choix technologiques et les achats matériels.

● Accès local ou distant : pour des utilisateurs Université Savoie Mont Blanc, dans un environnement batch, mais également pour des utilisateurs de communautés élargies ou virtuelles via les infrastructures distribuées à grande échelle : e-infrastructure EGI et de type grille comme WLCG.

Evolution des ressources du mésocentre

Entre 2013 et 2017, les ressources du mésocentre ont été multipliées par un facteur 2 environ à budget annuel constant [fig. 3 & 4].

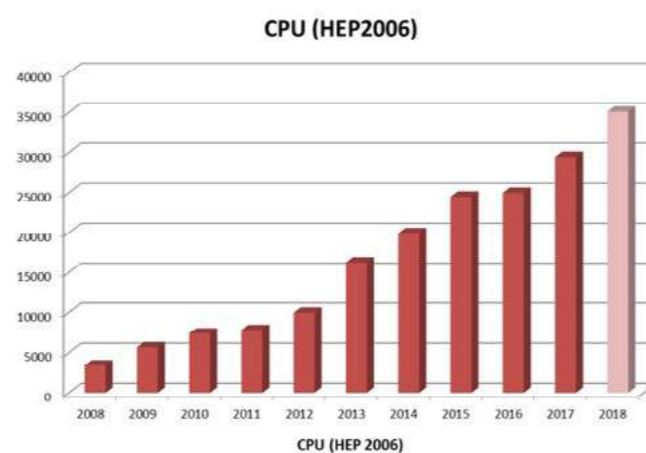


Figure 3 : Evolution de la capacité de calcul en HEP2006

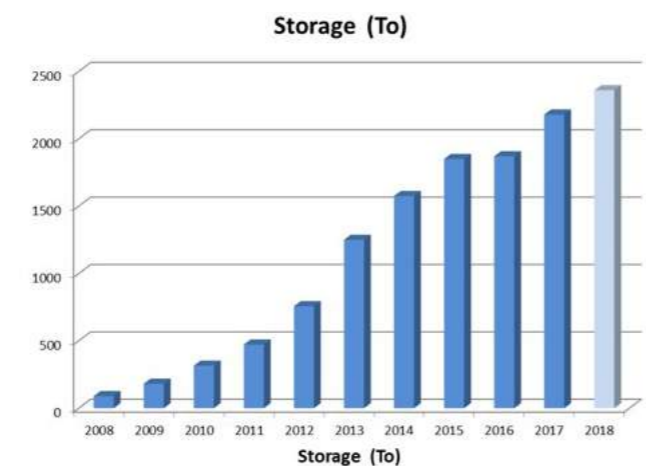


Figure 4 : Evolution de la capacité de stockage en Téra-octets

Financement

Le financement initial du mésocentre de calcul et de stockage de l'Université Savoie Mont Blanc a été obtenu en réponse à un appel d'offre du Ministère délégué à l'enseignement supérieur et à la recherche. La convergence des besoins notamment de simulation numérique, l'optimisation de la gestion des ressources et compétences et la réduction des coûts informatiques globaux ont été autant d'arguments en faveur de cette mise en commun des ressources au sein du mésocentre. Le mésocentre bénéficie de moyens financiers récurrents venant de l'Université Savoie Mont Blanc, du CNRS à travers le support aux projets de grille EGI et surtout WLCG, ainsi que du LAPP sous forme de ressources propres. Les laboratoires partenaires participent également de manière ponctuelle à ses coûts d'investissement.

La répartition consolidée des financements depuis 2005 est de 72 % pour le CNRS/IN2P3 et 28 % pour l'Université Savoie Mont Blanc et le Ministère. Même si la majeure partie des coûts de fonctionnement est à la charge du LAPP/CNRS, chaque laboratoire participe au coût de fonctionnement annuel en fonction de son utilisation.

Organisation

Le pilotage scientifique est assuré par le Conseil Scientifique de l'Université Savoie Mont Blanc qui établit une fois par an un rapport d'activité du projet MUST.

Equipe de Direction et Comité de Pilotage

L'Equipe de Direction est composée du Vice-Président Recherche de l'Université Savoie Mont Blanc en tant que Responsable Scientifique du projet et du responsable du projet MUST du LAPP en tant que Responsable Technique du projet. L'Equipe de Direction s'appuie sur un Comité de Pilotage chargé de présenter le rapport d'activité annuel du projet MUST aux représentants des laboratoires partenaires.

Le Comité de Pilotage, présidé par le Responsable Scientifique du projet, se réunit au moins une fois par an et est chargé :

- de suivre l'avancement du projet,
- de préparer les investissements,

- d'organiser la réunion annuelle de la communauté des utilisateurs,
- d'attribuer les ressources affectées au projet et d'arbitrer la répartition des ressources entre les utilisateurs.

Le Comité de Pilotage travaille en collaboration avec le responsable technique du projet et son équipe qui a la responsabilité d'établir les cahiers des charges techniques destinés à l'acquisition des matériels, de définir des conditions générales de service, de mettre en place la formation et le support aux utilisateurs.

Equipe Technique

En 2017, le départ du Responsable Technique de MUST a nécessité une réorganisation de l'administration système et du support de la plateforme. Pendant la période de transition, la répartition des tâches et la redondance entre les personnes a été revue afin de constituer une seule équipe technique composée d'un ensemble de personnes avec des profils complémentaires (experts systèmes et réseaux, infrastructures distribuées, middleware de grille, support aux expériences et calcul scientifique).

Aujourd'hui, l'équipe technique du mésocentre représente 2,8 ETP (Equivalent Temps Plein) répartis sur 6 ITAs du LAPP-LAPTh. Intégrée dans l'équipe du support général du service informatique du LAPP, elle est en charge d'administrer la plateforme et de garantir les engagements pris par le laboratoire à la fois du côté LCG et EGI mais également vis-à-vis des utilisateurs locaux. Elle est également chargée des études technologiques et des achats et appels d'offre associés. Cette équipe mène aussi les études et actions nécessaires pour spécifier les infrastructures (urbanisation, énergie, refroidissement) requises pour le mésocentre.

Support au Calcul Scientifique

Le support mis en place dès la création du mésocentre pour assister les utilisateurs a

aujourd'hui évolué pour prendre en considération toutes les questions et les demandes en lien avec le Calcul Scientifique. Ce rôle nécessite une bonne compréhension des outils et besoins des chercheurs de l'Université. La personne dédiée à cette mission organise également des formations, promulgue des conseils et méthodes notamment pour la mise en œuvre d'applicatifs commerciaux tels que MATHEMATICA, MATLAB, ABAQUS et bien d'autres.

PERSPECTIVES

La stratégie pour 2018-2022 est tout d'abord la poursuite de nos investissements afin de respecter nos engagements du côté WLCG avec à la fois le respect de la qualité de service et le maintien du support au calcul scientifique pour les chercheurs, utilisateurs de MUST.

MUST devrait se maintenir en tant que Tier 2 ATLAS de premier ordre grâce à la collaboration étroite qui s'est nouée avec les experts du Computing de l'expérience ATLAS du LAPP et du CERN. Ce travail veille à l'utilisation optimisée du stockage de MUST et à l'efficacité des différentes activités de calcul Tier 2, notamment celles ayant des besoins importants en entrée/sortie. Il sera maintenu car essentiel pour préparer l'avenir.

Le déménagement courant 2013 du mésocentre dans la Maison de la Mécatronique nous permet de bénéficier d'une infrastructure en accord avec les ambitions de MUST. Pour le long terme, une attention particulière sera accordée aux bonnes pratiques de gestion de salle informatique, notamment à l'efficacité énergétique. Un projet d'urbanisation de la salle est à l'étude.

La plateforme cherche à répondre aux besoins de ses utilisateurs et pour cela elle se doit d'évoluer en permanence, à la fois techniquement (évolution des moyens de calcul HPC et sur GPU, nouvelles technologies de stockage, nouveaux logiciels commerciaux, nouveaux services tels iRODS pour la gestion de données...). Envisager le futur du mésocentre ne sera possible qu'en s'appuyant sur une très bonne connectivité réseau (LAN et WAN) capable d'évoluer vers le 100 Gb/s. Le réseau doit, plus que jamais, être considéré comme une ressource à part entière. Des actions ont déjà été initiées dans ce sens (suivi régulier de l'utilisation réseau,

élaboration d'une feuille de route des besoins et des évolutions, estimation de certains coûts) et seront poursuivies.

D'ici 2022, il conviendra aussi de s'intéresser à la mise en place des modèles de calcul des grandes collaborations comme CTA et LSST qui, en plus des expériences ATLAS et LHCb, pourraient fortement conditionner l'évolution de MUST.

L'infrastructure de MUST (volumétrie, technologies et performances) et les applications installées ont pu, jusqu'à présent, suivre la montée régulière des besoins des expériences. Mais à l'horizon 2025, les besoins de calcul et de stockage vont augmenter bien plus rapidement et la stratégie du mésocentre devra évoluer pour relever ce défi : besoins pour le LHC Haute Luminosité et les expériences ESFRI (comme CTA), logique d'optimisation (meilleure utilisation des ressources, croissance et amélioration des performances à coût constant, réduction des coûts opérationnels), actions R&D communes au sein de l'IN2P3, cohérence avec les objectifs des projets européens H2020 auxquels le LAPP participe comme XDC et ESCAPE.

PUBLICATIONS IMPORTANTES [x]

Une grande partie des publications liées aux expériences ATLAS et LHCb s'appuient sur la grille de calcul WLCG pour laquelle le projet MUST fournit des ressources de type Tier2 (cf. ATLAS Computing Acknowledgements, ATLAS-GEN-PUB-2016-002).

Un nombre significatif de thèses ou de publications du LAPP ont bénéficié de la plateforme MUST, comme récemment :

- 1 **CERN-THESIS-2017, K. Grevtsov**
Exploring the diphoton final state at the LHC at 13 TeV: searches for new particles, and the Higgs boson mass measurement with the ATLAS detector
- 2 **F. Gaté, R. Alves Batista, J. Biteau, J. Lefaucheur, S. Mangano, M. Meyer, Q. Piel, S. Pita, D. Sanchez, I. Vovk (for the CTA Consortium)**
Studying cosmological γ -ray propagation with the Cherenkov Telescope Array
arXiv:1709.04185v2 [astro-ph.HE]

- 3 **C. Romoli, D. A. Sanchez, M. Lorentz, P. Brun on behalf the H.E.S.S. collaboration**

Intrinsic spectra of H.E.S.S. blazars : what would we see without EBL absorption
Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)
arXiv:1708.01153v2 [astro-ph.HE]

- 4 **N. Charitonidis, Y. Karyotakis and I. Efthymiopoulos**

Beam performance and instrumentation studies for the ProtoDUNE-DP experiment of CENF
CERN-ACC-NOTE-2016-0052

Enfin pour ce qui est des laboratoires extérieurs on peut citer les publications récentes suivantes :

Laboratoire LEPMI/LMOPS :

- 5 **S. Neyertz, D. Brown, M.J.T. Raaijmakers et N.E. Benes , 2016**

The influence of the dianhydride precursor in hyper-cross-linked hybrid polyPOSS-imide networks
Physical Chemistry Chemical Physics, 18, 28688-28703, 2016 DOI: 10.1039/C6CP06184B

- 6 **S. Neyertz et D. Brown**

Nanosecond-time-scale reversibility of dilation induced by carbon dioxide sorption in glassy polymer membranes
Journal of Membrane Science, 520, 385-399, 2016
DOI: 10.1016/j.memsci.2016.08.003

Laboratoire EDYTEM :

- 7 **T. Michon, 2015**

Extension du potentiel de la modélisation hydrologique: Inversions heuristiques de modèles pluie-débit pour l'identification des paramètres simultanément aux pluies ou à la courbe de tarage
Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, 2015
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01235352>

Laboratoire LAPTh :

- 8 **V. Poulin, P. D. Serpico, F. Calore, S. Clesse and K. Kohri**

CMB bounds on disk-accreting massive Primordial Black Holes
Phys.Rev. D96 (2017) no.8, 083524

- 9 **M. Archidiacono, T. Brinckmann, J. Lesgourgues and V. Poulin, 2017**

Physical effects involved in the measurements of neutrino masses with future cosmological data
JCAP, vol. 1702, p. 052, 2017

Laboratoire LISTIC :

- 10 **B. Mansencal, J. Benois-Pineau, H. Bredin, A. Benoit, N. Voiron, P. Lambert, H. Le Borgne, A. Popescu, A. L. Ginsca, G. Quénot, 2017**

IRIM at TRECVID 2017: Instance Search
Proceedings of the TRECVID challenge 2017, Gaithersburg, Maryland, USA, November 13-15, 2017

- 11 **R. Raoui-Outach, A. Benoit, P. Lambert, C. Million-Rousseau, 2017**

Deep Learning for automatic sale receipt understanding - International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, Nov 2017, Montreal, Canada, 2017,
<http://www.ipta-conference.com/ipta17/>>
<hal-01654191>
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01654191/document>

ORGANISATION, FONCTIONNEMENT MOYENS



ORGANISATION

RÉSUMÉ

Le LAPP est l'un des 20 laboratoires de l'institut IN2P3 du CNRS qui travaillent en étroite collaboration sur des projets tous internationaux. L'organisation du laboratoire est structurée autour de l'équipe de direction, du conseil du laboratoire, des équipes de recherche et des services techniques et administratifs.

FONCTIONNEMENT DU LABORATOIRE

Le laboratoire est organisé autour de projets de recherche tous internationaux, des trois services techniques et du service administratif. Le directeur du laboratoire est nommé conjointement par le CNRS et l'Université Savoie Mont Blanc., Il s'appuie sur deux sous-directeurs et une assistante de direction. Cette équipe de direction s'appuie sur le conseil du laboratoire qui a un avis consultatif. Le conseil du laboratoire et son émanation, le comité scientifique, sont composés de membres élus et nommés, y compris des personnalités extérieures au laboratoire, et traitent l'ensemble des sujets qui régissent le fonctionnement du laboratoire, et les orientations scientifiques respectivement. Le conseil se réunit au moins 4 fois par an. Un règlement intérieur approuvé par les tutelles du laboratoire, décrit un ensemble de règles générales et s'applique à l'ensemble du personnel.

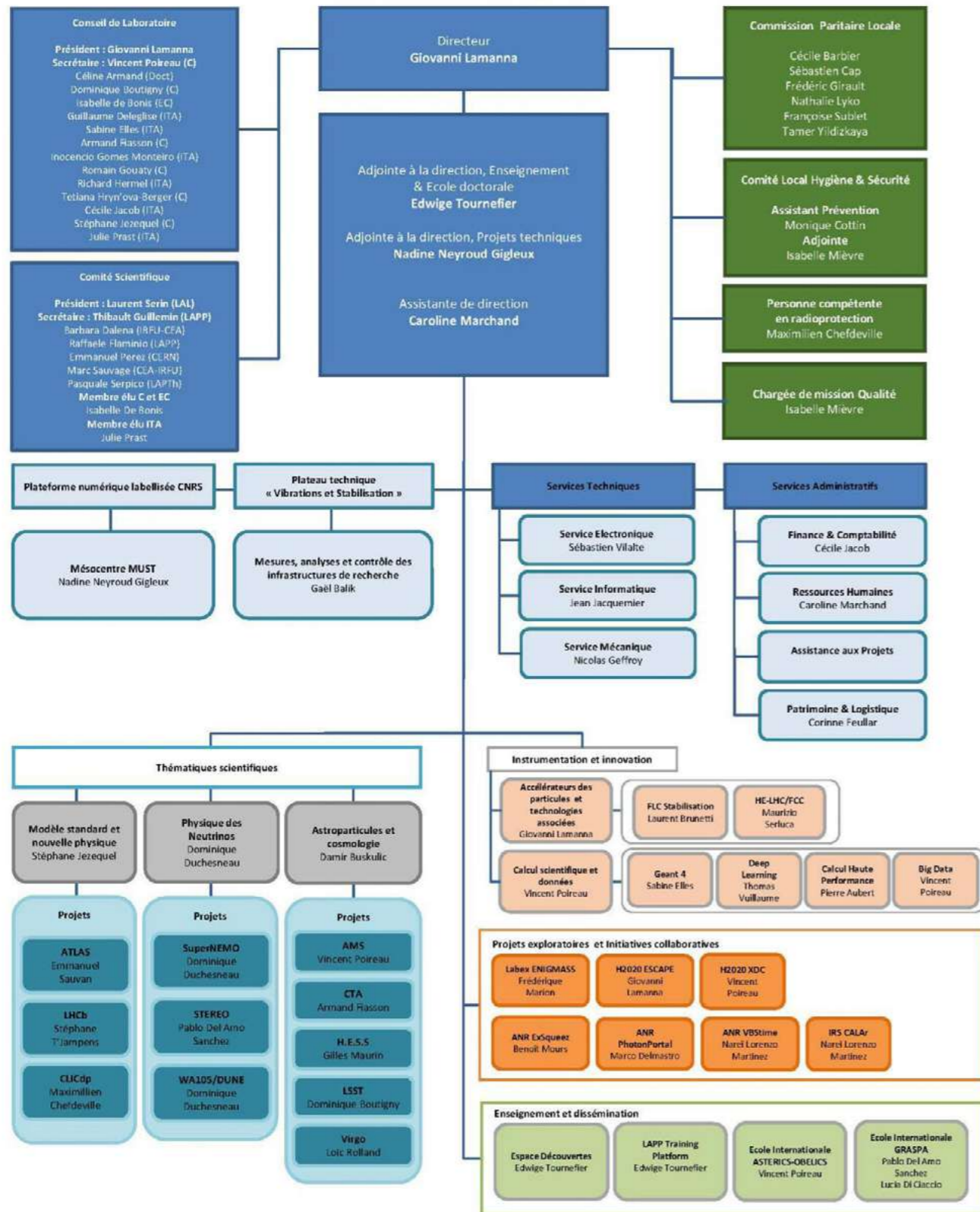
Les chercheurs sont à l'origine des projets de recherche et sont organisés en groupes de physique en fonction d'une thématique de recherche. Les services techniques et administratifs soutiennent les projets de recherche ainsi que le fonctionnement général du laboratoire. Le niveau de soutien aux projets, essentiellement des ingénieurs et techniciens, donne lieu à un contrat d'objectifs entre les groupes de recherche et la direction. Ingénieurs, techniciens et administratifs sont affectés à quatre services : électronique, mécanique, informatique et administration ; ils sont dirigés par des responsables de services.

Un système de revues internes des projets peut être utilisé pour leur évaluation qui est faite par le conseil du laboratoire une fois par an en général.

La direction réunit les responsables scientifiques des groupes et les responsables des services une fois par mois pour un échange d'informations et de vues.

Sont attachés directement à la direction le comité d'hygiène et sécurité, la cellule chargée de la communication vers le grand public ainsi que les responsables de la valorisation, de l'enseignement et de la formation permanente (voir page suivante l'organigramme du laboratoire).

LAPP Organigramme fonctionnel



RESSOURCES HUMAINES

La plus grande richesse du laboratoire est son personnel. Au 30 juin 2019, le laboratoire compte 110 agents permanents dont 66 ITA, (Ingénieurs, Techniciens et Personnel administratif) répartis par équipes comme indiqué au tableau 2, 35 chercheurs du CNRS et 9 chercheurs universitaires. A ce personnel s'ajoutent 15 stagiaires postdoctoraux, 5 émérites, 18 doctorants et 4 intérimaires de l'ITA, pour un effectif total de 151 personnes. Par ailleurs, le laboratoire accueille une vingtaine de stagiaires pour des périodes allant de 2 à 6 mois.

Le personnel est réparti entre les groupes expérimentaux et les services, suivant la politique scientifique du laboratoire. La nature internationale et la complexité de nos réalisations justifient un soutien important d'ingénieurs et de techniciens de haut niveau. Leur affectation dans les groupes fait l'objet de contrats d'objectifs. Le rôle de l'administration est capital pour faire face aux règles et lois nationales et européennes.

Après avoir connu une forte baisse (environ 20 % des effectifs) depuis 2005, le nombre de chercheurs du CNRS s'est stabilisé autour de 30 personnes au cours des 10 années suivantes pour atteindre 29 au total en 2014, les quelques entrées de jeunes chercheurs compensant partiellement les départs à la retraite. Au cours du contrat actuel, le LAPP a pu inverser la tendance et cela n'est pas uniquement dû à de jeunes recrutements (moins d'un tous les deux ans en moyenne en raison du nombre limité de postes vacants émis par le CNRS au niveau national) mais surtout à la capacité à attirer des chercheurs d'autres laboratoires (5 en deux ans). Dans le contrat actuel, le laboratoire a réussi à augmenter le nombre de chercheurs au même niveau qu'en 2005, soit 35. Le nombre de chercheurs de l'USMB, neuf, est resté constant. Le nombre total d'ITA a été maintenu presque constant, tandis que les difficultés de recrutement de techniciens qui jouent un rôle clé dans nos projets pendant les phases de construction et de déploiement se sont accrues. Suite à la politique de recrutement du

laboratoire et plus généralement du CNRS, le nombre de techniciens a diminué en faveur du recrutement d'ingénieurs.

Pour certains travaux techniques spécifiques, certaines phases critiques de R&D et de préparation, les projets reposent sur des contrats à durée déterminée dont le renouvellement est incertain et qui affaiblissent les équipes. Ces contrats, tant pour les chercheurs que pour les ingénieurs, ont augmenté au cours des dernières années, autour de 15 et 20 respectivement, principalement grâce à différentes sources de financement compétitives basées sur des projets. Ils apportent une réelle valeur ajoutée et renforcent temporairement les équipes leur permettant de développer leurs activités. Le LAPP a été en mesure d'augmenter constamment à un - à deux - postes permanents ITA par an pendant la durée du contrat actuel, donnant une chance à certains de nos ingénieurs temporaires de passer des concours sur les postes CNRS après 3 ans.

La main-d'œuvre du laboratoire pourrait être fortement touchée par les départs à la retraite futurs de certains d'entre eux. La répartition selon l'âge fait l'objet d'un suivi constant et d'un plan quinquennal de mise en accusation. Cette approche de planification des RH aide à maximiser la durabilité des profils professionnels permanents clés dont dépendent les équipes de recherche.

FORMATION PERMANENTE

La formation s'inscrit dans le projet du laboratoire et ses orientations scientifiques. Les besoins de formations sont liés aux évolutions techniques des projets. La formation des agents est programmée dans la durée afin d'anticiper les futurs développements et ainsi garantir une expertise de haut niveau dans les différents domaines techniques. La formation au LAPP couvre également les domaines de la physique avec les écoles thématiques ou les conférences, ainsi que la formation des doctorants.

PROJETS COLLABORATIFS

RÉSUMÉ

La mission principale du laboratoire est de mener des recherches expérimentales dans le domaine de la physique des particules et des astroparticules. Les moyens importants mis en œuvre pour mener des recherches dans ces domaines nécessitent une coordination nationale, européenne et mondiale, même si dans les premières phases de conception et de conception de tout nouveau projet, le défi est plus local ; l'initiative individuelle, les idées et les capacités personnelles sont essentielles ; le soutien régional (Université, collectivités territoriales) et/ou national (ANR) est essentiel.

Dans sa démarche d'évolution et de stratégie le laboratoire répond à des appels d'offre du gouvernement français (Investissements d'avenir), de l'union européenne (H2020) et de l'agence nationale pour la recherche (ANR).

LE LABEX ENIGMASS

LAPP a coordonné le LabEx ENIGMASS au cours du contrat actuel et son rôle de leader est aujourd'hui confirmé pour le prochain contrat de cinq ans pour lequel le LAPP a passé avec succès un concours national de PIA et la prolongation de la subvention est garantie : 2,8 M€ pour la période 2020-2025.

Le LabEx ENIGMASS pendant la durée du contrat actuel a fourni des ressources supplémentaires importantes (environ 600 k€/an) pour l'unité principalement dédiée aux bourses de doctorat et de post-doctorat. Depuis 2014, cela correspond à environ 700 mois-personnes, dont environ 4 bourses de doctorat pour cette période. En termes de production scientifique, certains des principaux objectifs scientifiques atteints avec ENIGMASS qui ont influencé le programme scientifique du LAPP au cours du contrat actuel sont :

- Un soutien majeur au programme d'analyse des données ATLAS visant à mieux comprendre les propriétés de Higgs et leurs implications pour la nouvelle physique.
- Un soutien et un investissement clé en faveur de la conception par le LAPP des douves alpines pour le détecteur Inner Tracker d'ATLAS.
- Un important coup de pouce à la physique des neutrinos en encourageant les activités le long des trois axes de recherche principaux (recherche d'une double désintégration bêta avec le SuperNEMO ; recherche de neutrinos stériles dans le STEREO ; R&D d'une grande chambre de projection temporelle à argon liquide pour préparer une expérience à longue base sur l'oscillation des neutrinos et la violation de la symétrie CP).

Le LabEx ENIGMASS (associant LAPP, LPSC, LAPTh et LSM) renforce la synergie des quatre laboratoires partenaires et a créé une dynamique pour construire une nouvelle fédération locale de recherche.

RESSOURCES FINANCIÈRES

Elle est donc un outil indispensable, facteur de progrès, au service des projets et de tous les agents du laboratoire, physiciens et techniciens. Elle couvre non seulement les spécialités scientifiques et techniques des métiers mais également la gestion de projet, la gestion des ressources humaines, la sécurité. Il est à noter que les formations dédiées à l'évolution des métiers sont prépondérantes.

Les différents fournisseurs de formations permettent de couvrir les besoins de façon complémentaire et cohérente: IN2P3, CNRS, LAPP, CERN. Parallèlement, les réseaux métiers IN2P3 et CNRS permettent de favoriser le partage des connaissances et des expériences. Finalement, des formations spécifiques aux nouveaux matériels ou à certains postes de travail sont organisées au cas par cas.

Un effort particulier de formation est mis en place pour les nouveaux recrutés afin de leur permettre une bonne intégration au sein des services et des projets pour lesquels ils sont amenés à travailler. Dans le même souci d'intégration, les personnels étrangers (CDD chercheurs, post-docs et doctorants) bénéficient d'une formation en langue française dès leur arrivée dans le laboratoire.

Sur la période considérée, l'effort de formation s'est traduit par 1536 jours de stages. Les ITAs ont un important taux de participation puisque 63% d'entre eux ont été formés. La répartition est homogène au sein des différents corps de métiers et des différents domaines techniques. Les formations en IAO-CAO sont coordonnées par l'IN2P3 et permettent aux services électronique et mécanique de rester performants sur des outils en permanente évolution.

Les écoles thématiques propres à nos disciplines sont indispensables pour permettre aux agents de bien appréhender le milieu scientifique dans lequel ils travaillent. Les actions nationales de formation leur permettent d'aborder les domaines spécifiques et d'échanger avec leurs collègues de l'institut. Une grande importance est également donnée aux stages de sécurité (appareils de levage, habilitation électrique, laser, secourisme...). Ces stages ont été indispensables lors des dernières grandes réalisations du service mécanique telle que CTA.

Lors de l'évaluation précédente, le budget global déclaré du laboratoire était d'environ 2 millions d'euros par an, hors salaires. Au cours du présent contrat, la direction du LAPP a réussi à obtenir des subventions compétitives telles que le LabEx ainsi qu'une série de projets importants de l'Union européenne et d'autres contrats de recherche. Elles ont entraîné une augmentation du budget de plus de 50%, avec un budget moyen de 3,1 millions d'euros par an. Le présent budget comprend deux sources de financement : Subvention de l'État (dotation annuelle) et ressources propres.

La dotation annuelle du laboratoire est elle-même divisée en deux parties :

- le soutien de base non affecté (SBNA) qui couvre un ensemble de dépenses de fonctionnement de l'unité comme les frais d'infrastructures, l'équipement scientifique de base, mais aussi la participation aux conférences, les gratifications des stagiaires ou le financement initial d'une nouvelle idée, etc. ;

- le soutien aux projets scientifiques en cours.

Le CNRS à travers son institut l'IN2P3 est le plus grand contributeur au budget « subvention d'État », suivi de l'Université de Savoie.

La notion de « ressources propres » recouvre toutes les recettes de l'unité en dehors de la subvention annuelle versée par l'État pour charge de service public. Au LAPP, ces ressources propres sont essentiellement constituées par des contrats de recherche et des subventions. En effet, les équipes des chercheurs doivent rechercher des financements supplémentaires pour leurs projets auprès de l'ANR (projets blanc, investissements d'avenir), de l'Union Européenne, des collectivités locales... La table suivante montre l'ensemble des projets acceptés et financés par l'ANR, l'UE et les collectivités locales.

LE LAPP RÉPOND AUX APPELS À PROJETS DU PROGRAMME EUROPÉEN H2020 ET EST PARTENAIRE DE PLUSIEURS PROJETS

ASTERICS

Le CNRS et le LAPP, par la coordination du sous-projet central OBELICS, sont des acteurs majeurs du projet Astronomie ESFRI et du Pôle Infrastructures de Recherche (ASTERICS), démarré en 2015 pour une durée de quatre ans.

HNSciCloud

Ce projet dont l'objectif est la création d'une plate-forme hybride de cloud computing public et commercial, a joué un rôle majeur sur les défis numériques des projets ESFRI tels que ASTERICS.

XDC (eXtreme DataCloud)

Démarré en novembre 2017 pour une durée de 27 mois, ce projet concerne le développement d'infrastructures électroniques et de solutions d'archivage pour des projets de recherche de nouvelle génération, pilotés au CNRS par l'IN2P3.

ESCAPE

Plus récemment, dans le cadre du plan de développement de l'EOSC, le LAPP a pris en charge la coordination pour la période 2019-2022 du projet H2020 ESCAPE, financé par la commission européenne à hauteur de 16 millions d'euros. Dans le cadre de l'initiative EOSC, ce regroupement d'organisations scientifiques internationales et d'entités juridiques chargées de grands projets en physique des particules et en astrophysique, contribuerait à doter les acteurs scientifiques, industriels et universitaires aux niveaux régional, national et européen d'une infrastructure numérique de classe mondiale. Il permettra aux chercheurs de traiter les grandes quantités de données scientifiques et de partager leurs résultats scientifiques tout en améliorant l'accès au savoir et, par conséquent, l'innovation. Cette infrastructure vise à encourager la fourniture de services innovants qui faciliteront la collaboration entre les scientifiques et l'industrie (y compris les PME) et le secteur public.

LE LAPP EST AUSSI PARTENAIRE DE PLUSIEURS PROJETS ANR

PhotonPortal

Démarré en 2016 pour quatre ans, PhotonPortal est un projet All-Knowledge Challenge financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour la période 2016-2020, et une collaboration des groupes expérimentaux ATLAS du LAPP, LPNHE et LAL. Son but est la recherche de nouvelle physique au LHC.

ANR ExSqueeze

L'équipe LAPP participe au projet ANR ExSqueeze avec les laboratoires LAL, LKB, LMA. Démarré en 2015 pour une durée de quatre ans, le but de ce projet est la réduction du bruit quantique des détecteurs basés sur l'interférométrie optique.

STEREO

Le projet STEREO, pour la recherche d'un 4ème neutrino auprès d'un réacteur, a été démarré en 2013 pour une durée de 3 ans et demi. Après être entrée dans la phase d'acquisition des données en 2017, l'expérience STEREO publie de nouveaux résultats en 2019 basés sur la détection d'environ 65 000 neutrinos. La précision améliorée permet de rejeter l'hypothèse d'un 4e neutrino dans une grande partie du domaine prédit par "l'anomalie de neutrinos des réacteurs".

DMAstroLHC

Démarré en 2012 pour une durée de 4 ans. Le but ultime de ce projet est la détermination des propriétés microscopiques de la matière noire en utilisant les dernières données du LHC ainsi que celles des recherches directes et indirectes.

SPLAM

Démarré en 2011 pour une durée de 3 ans. Le but de ce projet était le développement de détecteurs Micromegas de grande taille pour la détection de particules à haut flux.

QUALITÉ



Image 1 : Logo qualité

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs années maintenant, le laboratoire développe une politique de démarche qualité en son sein et dans les projets de renommée internationale (CTA et ATLAS) où les exigences qualité sont de plus en plus présentes.

En parallèle, le LAPP est fortement impliqué dans la conduite de projets.

Le chargé de mission qualité du laboratoire apporte son soutien dans la mise en place, le suivi et l'amélioration de la qualité du laboratoire. Il promeut la démarche qualité dans les activités de conduite de projets, est support au suivi technique des expériences et dans l'utilisation d'outils de gestion de projets.

Le LAPP est un membre actif des réseaux Experts de Management de Projets (EMAP) et Management de la Qualité (MAQ) de l'institut IN2P3 et membre du réseau Qualité en Recherche (QeR) du CNRS.

TEMPS FORTS ET CHIFFRES CLÉS

2015 NOVEMBRE : Changement d'outil de gestion documentaire d'EDMS à ATRIUM

2016 JANVIER : Utilisation d'ATRIUM

DEPUIS JANVIER : Journal interne du laboratoire

Approche systématique de type processus

Amélioration et pilotage du processus des Contrats d'Objectifs et Moyens

Amélioration des procédures pour les nouveaux entrants, l'organisation des missions

2018 JANVIER : Valorisation des expertises techniques sur le site CNRS/IN2P3 TECH NEWS

EXPERTISE ET COMPÉTENCES

L'enseignement supérieur et son articulation avec la recherche sont également La qualité au sein du laboratoire se matérialise par la mise en place, le suivi et l'amélioration des processus, procédures et supports documentaires spécifiques associés (modèles/formulaires).

Il a été développé une démarche innovante de formalisation des relations entre le laboratoire et les projets via le processus des Contrats d'Objectifs et Moyens (COM). Le pilotage de ce processus est assuré par le chargé de mission qualité en collaboration avec la direction. Ces contrats, généralement de 3 ans, font l'objet de renouvellements ou d'avenants en fonction de l'évolution du projet. Pour ce faire, différentes revues sont menées afin d'aider la direction dans ses choix scientifiques et techniques. C'est aussi à cette période que sont discutées lors de réunions, les demandes en ressources (humaines et locaux) des expériences et leur répartition en fonction de la priorité des projets. En parallèle à ces revues, une journée de présentations annuelles d'avancements projets (Status Report) est organisée pour toutes les expériences en cours. C'est l'occasion de faire le bilan de l'année écoulée et de présenter les perspectives de l'année à venir.

D'autres processus, internes au laboratoire, concernant l'accueil et le départ des nouveaux entrants et des doctorants, l'organisation des missions, des guides de bonnes pratiques d'utilisation de logiciels internes, des modèles de documents et formulaires ont été mis en place et font l'objet de mise à jour régulière. Cette démarche est aussi déployée dans le domaine de la sécurité.

Le basculement de l'outil de gestion de la documentation EDMS (Engineering Data Management System) utilisé au LAPP depuis 2004 s'est effectué fin 2015 et le choix de l'IN2P3 s'est porté sur l'outil ATRIUM. Cet outil d'interface web permet aux utilisateurs d'accéder à leurs espaces laboratoire depuis l'extérieur. Il est destiné à faciliter la formalisation et la sauvegarde des savoir-faire, des pratiques et des méthodes du laboratoire et des projets. Ce nouvel outil est en constante évolution depuis sa mise en service en 2016. Des formations ont été dispensées auprès des agents pour leur expliquer le fonctionnement et un accompagnement est effectué par l'administrateur local ou le chargé de mission qualité. Des guides de bonnes pratiques d'utilisation ont été rédigés. Le système se déploie petit à petit au sein de l'unité et est de plus en plus utilisé par l'ensemble des



Image 2 : La roue de Deming.

personnels du laboratoire. Il est aussi utilisé par la direction technique de l'IN2P3 qui met à disposition des laboratoires de l'institut, dont le LAPP, des référentiels communs ainsi que des méthodes et des outils permettant l'amélioration de la qualité, la gestion des risques, la gestion de projet et un soutien aux projets.

La démarche qualité se développe dans les projets de renommée internationale et devient de plus en plus présente. Pour ce faire, le chargé de mission qualité apporte son soutien dans la rédaction de documents spécifiques projet, apporte son aide dans la gestion de projet : établissement et suivi plannings, gestion des risques, documentation, locaux. Dans le projet CTA, le chargé de mission qualité s'est occupé de rédiger les modèles de documents, de prendre part à la rédaction des documents projet, du planning, de participer au processus de vérification et validation dans le cadre du développement logiciel. Il a été une aide à la gestion de projet lors du développement de l'instrument mécanique de l'arche du grand télescope.

Pour le projet ATLAS, la démarche qualité est en train de se mettre en place au vu de l'engagement du laboratoire dans le cadre de la production du détecteur pixel ATLAS pour HL-LHC.

La promotion, le développement de l'esprit et de la culture qualité au sein du laboratoire et des projets se font lors d'interventions régulières sous forme de flash info qualité et de présentations sur des thèmes plus spécifiques en réunions du jeudi. L'information est aussi diffusée par l'intermédiaire du journal du laboratoire.

Le chargé de mission qualité du laboratoire a aussi le rôle de relais entre l'institut et son unité. Il participe activement en tant que représentant du laboratoire aux différents réseaux de l'IN2P3. Il est membre du Réseau des Experts en Managements de Projets (EMAP) et Management de la Qualité (MAQ) de l'institut IN2P3. Il est intégré dans différents groupes de travail comme la planification, le retour d'expérience, les métiers autour du chef de projet. Lors des différentes réunions organisées en visio et en présentiel des échanges ont lieu entre les différents homologues des autres laboratoires et la direction technique de l'institut. Ce qui permet de mettre en commun les expériences, recueillir et partager des informations, échanger des bonnes pratiques et des savoir-faire, répondre à nos interrogations et faire le point sur les différents groupes de travail et mettre en commun des outils. La valorisation des expertises techniques et des informations se retrouvent sur le site web : CNRS/IN2P3 TECH NEWS.

Il aussi membre du réseau Qualité en Recherche (QeR) du CNRS, ce qui lui permet d'échanger, de partager des informations, de se tenir informé des évolutions et des actions de formations dans le domaine de la qualité.

PERSPECTIVES

Pour les années à venir, les missions de la qualité seront de continuer les actions entreprises dans les démarches pour le laboratoire, les projets, la conduite de projet, et la démarche d'amélioration continue. Poursuivre l'implication dans les différents réseaux de l'institut et du CNRS.

Les prochains objectifs seront de mettre en place des outils qualité : analyses de risques, AMDEC, résolutions de problèmes..., d'intervenir en support et d'animer des groupes de travail sur ces thèmes dans les projets en fonction des besoins. De renforcer la démarche qualité assurance produit/projet dans les expériences internationales, actuelles et futures, où les exigences qualité sont de plus en plus formalisées. C'est le cas du projet ATLAS avec l'engagement du laboratoire dans les activités de production du détecteur pixel pour HL-LHC. Mais aussi dans le cadre de futurs projets, de pouvoir déployer la compétence et obtenir des responsabilités dans les activités de production.

Puis dans un second temps, de développer le plan de communication qualité et voir les indicateurs qu'il est possible d'adapter au secteur de la recherche.

HYGIÈNE & SÉCURITÉ

RÉSUMÉ

Il incombe au directeur de veiller à la sécurité et à la protection des personnels du LAPP et d'assurer la sauvegarde des biens du laboratoire. Il s'appuie sur différents acteurs : les assistants de prévention et les différents référents et la secrétaire médicale.

Ces acteurs ont pour but de veiller à la santé et à la sécurité des agents (prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles), du public et des intervenants extérieurs ainsi qu'à la protection de l'environnement du laboratoire.

Les assistants de prévention sont en contact avec leurs homologues des autres laboratoires du CNRS et des universités (UGA et USMB) lors des différentes réunions. Ils travaillent en étroite collaboration avec le service prévention de la délégation Alpes.

ÉQUIPE DU LAPP

Assistants de prévention (AP)

Monique Cottin, Isabelle Mièvre

Personne compétente en radioprotection (PCR)

Maximilien Chefdeville

Référent laser

Romain Gouaty

Référent produits chimiques

Fabrice Peltier

Secrétariat médical LAPP

Claudine Bombar

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

- 2016
2017** Mise en place et affichage des différents plans nécessaires pour faciliter l'intervention en cas d'urgence des services de secours internes et/ou externes : plan d'intervention, plan d'évacuation et plan des zones.
- 2017** Evolution au sein de l'équipe Hygiène et Sécurité : départ de l'assistant de prévention (AP) remplacé par l'adjointe, renforcement de l'équipe avec une nouvelle adjointe AP et les référents laser et produits chimiques et formation de la nouvelle personne compétente en radioprotection (PCR)

Mise en service de l'outil FEVAR (logiciel d'évaluation de l'exposition aux produits chimiques) avec édition d'une Fiche Individuelle d'Exposition pour chaque agent (FIE)
- 2017
2018** Mise en conformité des machines-outils

1^{er} trimestre. Mise en conformité avec la législation espagnole des mesures réglementaires en matière de formations et d'habilitations des agents pour l'expérience CTA (Canaries) [fig. 1 & 2]

Avril. Changement du Système Sécurité Incendie (SSI)

Fin. Modification des zones Etablissement Recevant du Public (ERP) du laboratoire



Figure 1 : Montage de l'arche du grand télescope de l'expérience CTA

Figure 2 : Installation finale de l'arche



EXPERTISE ET COMPÉTENCES

Activités Hygiène et Sécurité

Le laboratoire est doté d'un **Comité d'hygiène et sécurité** (CHS) qui se réunit une fois par an. Il est composé du directeur, des AP LAPP-LAPTh, des référents, de la secrétaire médicale, des représentants des équipes et services ainsi que du médecin de prévention, de l'assistante sociale et des représentants de nos instances (IN2P3, CNRS et Université Savoie Mont Blanc). A cette occasion, les assistants de prévention présentent le bilan de l'année écoulée et les actions à venir.

Il est de la responsabilité des **AP** de vérifier régulièrement le registre Santé Sécurité au Travail, registre en libre accès où sont consignés tous les incidents, accidents ou propositions d'améliorations. Ces relevés sont communiqués à la délégation Alpes à leur demande.

Diverses procédures ainsi que les pages intranet du laboratoire sont en place et mises à jour régulièrement.

Les **informations de prévention** sont fréquemment diffusées aux agents du laboratoire lors de réunions d'information, par voie d'affichage (panneaux dédiés à la sécurité), dans le journal du laboratoire, par mail ; elles

sont systématiquement délivrées aux nouveaux entrants dans le mois qui suit leur arrivée.

Nous sensibilisons également les nouveaux entrants aux risques présents dans les bâtiments LAPP et maison de la mécatronique en fonction de leur secteur d'activité et aux obligations réglementaires. Cette sensibilisation est suivie d'une visite des bâtiments expliquant les consignes et zones d'évacuation et points de rassemblement en vue des deux exercices d'évacuations annuelles obligatoires. Ces derniers recevront également une formation obligatoire à la manipulation des extincteurs.

Une évaluation des **risques professionnels** via le logiciel EvRP pour le LAPP et ALTHUSS pour l'Université (les AP ont reçu la formation nécessaire à l'utilisation de ces logiciels) permet de recenser les risques et mettre en place des actions de prévention (besoins d'équipement et de protection, de formations, de travaux, de contrôles et mesures...). Le résultat de chaque évaluation est consigné dans un Document Unique (DU) du LAPP et de l'Université Savoie Mont Blanc (bâtiment de la Mécatronique).

Des plans de préventions sont réalisés avec le logiciel du CNRS avec l'aide des services généraux et administratifs lors de l'intervention des entreprises extérieures dans le cadre de travaux.

La mise en service du nouveau registre de sécurité où sont consignés tous les contrôles et maintenances périodiques (électricité, équipements mécaniques, extincteurs, trappes de désenfumages, centrales gaz, sources (suivi par le PCR), amiante...) a été effectuée début 2017.

Début 2018, le service H&S a été grandement mobilisé pour la constitution du dossier sécurité de l'expérience CTA pour le montage de l'arche du grand télescope sur le site de La Palma aux Canaries, Espagne. En effet, pendant plusieurs mois, il a été amené à élaborer les dossiers de prévention, administratifs, médicaux et formations/habilitations des agents appelés à intervenir sur site, en accord avec la réglementation espagnole.

Diverses commissions règlementaires

Suite au passage de la **commission CNRS** sur le contrôle des machines-outils il y a quatre ans dans tous les laboratoires, il s'est avéré que beaucoup de machines n'étaient pas conformes. En 2016, une société mandatée par la délégation régionale a relevé et consigné un bilan des actions à mener sur les machines. Une campagne de mise en conformité a eu lieu entre 2017 et 2018 et a permis de lever les observations. [fig. 3]

Fin 2016, une visite du Comité régional d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CRHSCT) a eu lieu. Un rapport avec observations et préconisations a été rédigé. En fonction des remarques, des corrections ont été apportées.

En 2017, la Commission intercommunale de sécurité a effectué une visite périodique du LAPP au titre de ses locaux classés « établissement recevant du public » (ERP). Cette commission vient tous les cinq ans et comprend des représentants de la mairie et du Service départemental d'incendie et de secours (SDIS).

Suite à l'évolution de la réglementation concernant l'accessibilité des personnes handicapées dans les locaux ERP, des travaux de mise en conformité vont être réalisés au rez-de-chaussée et au sous-sol du bâtiment 4 ainsi que sur les voies d'accès.

En 2018, une visite exceptionnelle concernant l'autorisation de recevoir du public pour un nouvel « espace découvertes » aura lieu.



Figure 3 : Machine-outil tour à commande numérique

Formations

Des formations diverses en matière de sécurité au travail sont régulièrement proposées aux agents par la délégation régionale. Une base de données interne nous permet de savoir quelles sont les personnes devant suivre un recyclage ou une formation initiale (électricité, Certificat d'aptitude à la conduite en sécurité (CACES), secourisme, laser, travail en hauteur, nacelles, extincteurs, pontier-élingueur...).

Pour les agents permanents, le dossier de carrière annuel permet de remonter les demandes de formations futures.

Pour les nouveaux entrants, la fiche de renseignements sécurité permet de lister les formations à organiser et les Equipements de Protection Individuels (EPI) à prévoir.

Environnement

Depuis plusieurs années, le laboratoire est sensible au **tri et à l'évacuation des déchets** (déchet industriel banal (DIB), cartons, informatique, Déchet d'équipement électrique et électronique (DEEE)). Plusieurs bennes sont à disposition du laboratoire et les services généraux gèrent leur rotation.

Concernant le recyclage spécifique des déchets informatique, le suivi est fait par une société spécialisée et éco-solidaire.

L'évacuation de ces produits est effectuée par une société spécialisée.

Médecine de prévention

Les agents travaillant au laboratoire sont suivis périodiquement par la médecine de prévention (visite avec le médecin tous les 5 ans, alternant avec une visite avec une infirmière qui détectera d'éventuels problèmes en amont). La secrétaire médicale du LAPP se charge de la prise de rendez-vous pour les suivis spécifiques tels que le suivi pour travail sous radioprotection, travail avec un laser, pour la validation des habilitations, les visites d'embauches et de reprise après arrêt maladie ou accident du travail supérieur à 30 jours et les diverses demandes spécifiques. Elle assure la vérification des trousse de secours.



Figure 4 : Pictogrammes produits chimiques

Rôle des référents

Le référent « produits chimiques » est chargé de fournir les fiches de données sécurité de chaque produit acheté et utilisé au laboratoire. Un inventaire de tous les produits chimiques est ainsi réalisé. Depuis le plan «Vigipirate» une copie de l'inventaire de ces fiches est adressée à la délégation Alpes. [fig. 4]

Les agents manipulant des produits chimiques ont un suivi annuel à travers une fiche individuelle de risques à remplir dans le fichier FEVAR fourni par le CNRS (qui a nécessité une formation pour les AP et le référent). Cette fiche est ensuite communiquée à la médecine de prévention qui la conserve pendant 50 ans dans le cadre d'une éventuelle maladie professionnelle.

Le référent « laser » gère les formations de sensibilisations au travail sur laser, l'inventaire des lasers, les protections associées aux salles et aux personnes.

La personne compétente en radioprotection (PCR) gère les sources du laboratoire et les contrôles, suit la dosimétrie avec l'aide de la secrétaire médicale et établit au préalable les fiches de suivi individuelles d'exposition aux rayonnements ionisants (FIERI).

PERSPECTIVES

Ces dernières années, les réglementations et les évolutions de la société ont amené l'équipe de sécurité du laboratoire à se former, à s'organiser et formaliser la documentation sécurité. Beaucoup de nouveaux logiciels concernant la sécurité sont mis en place sur différentes plateformes.

Le laboratoire est en perpétuelle évolution : nouvelles expériences, besoins en locaux, évolution de la façon de travailler (mise en place du télétravail), travaux, modifications à la maison de la mécanique, réflexion sur les travaux de modifications et rénovation du bâtiment 2 dans le cadre de modifications réglementaires ERP...

Dans les années à venir, l'équipe sécurité souhaite :

- S'intégrer plus en amont dans les projets de travaux.
- Impliquer plus fortement les agents du laboratoire en matière de sécurité.
- Sensibiliser les personnes des différents services et expériences pour leur rappeler les consignes et les risques liés à leurs projets.
- Anticiper des moyens de prévention à mettre en place au sein des expériences (formations, documentations, EPI, suivi médical, habilitations).

La sécurité est avant tout l'affaire de tous !



Clon padre

Flammable materials	Explosion risk	Toxic	Corrosive	Danger overhead crane	Fork lift trucks	High voltage
General Warning	Laser Radiation	Biohazard	Oxidising	Hot surface	Danger of entrapment	Danger of death
Irritant	Slippery floor	Watch your step	Cutting	High temperatures	Glass hazard	Danger of suffocation
Gas bottles	Watch for falling objects	Electricity	Danger for cutter	Entrapment hazard	Battery hazard	Rotating parts
Low temperature	Strong magnetic field	Optical radiation	Non ionizing radiation	Radiation	Hazardous to the Environment	Danger of harming your hands

ÉLECTRONIQUE

RÉSUMÉ

Le service électronique du LAPP comprend 16 personnes, ingénieurs et assistants ingénieurs. Sa mission est la conception et la mise en œuvre de systèmes électroniques indispensables au fonctionnement des expériences. Les agents du service développent toute la chaîne de lecture du détecteur, depuis l'amplification bas bruit et faible consommation du signal, sa numérisation, son traitement par des systèmes rapides et performants et finalement l'envoi des données vers le système d'acquisition informatique de l'expérience. Le service conçoit également des systèmes permettant le fonctionnement périphérique des détecteurs tels que les systèmes de distribution des bases de temps, les services électriques ou encore les systèmes de sécurité et de contrôle.

INTRODUCTION & ÉQUIPE DU LAPP

Quelles que soient les techniques initiales de détection des phénomènes observés, les capteurs du détecteur produisent toujours un signal électrique. Ainsi, l'exploitation scientifique des détecteurs nécessite des systèmes électroniques de grande qualité et fiables, leur accès sur site étant souvent réduit en raison de la sévérité des environnements (vide, radiations, spatial...). Les générations de détecteurs se succèdent et leur complexité s'accroît considérablement. La vitesse des signaux à traiter, leur précision et leur grand nombre sont autant de défis à relever. Des systèmes « sur-mesure » sont le plus souvent indispensables. Ainsi, le service électronique développe et met au point l'intégralité des chaînes d'acquisition depuis la préamplification analogique des signaux issus des capteurs, leur échantillonnage, leur traitement grâce à des cartes numériques complexes, jusqu'à leur transmission aux systèmes informatiques. L'électronique occupe une position centrale dans les détecteurs et les électroniciens collaborent étroitement avec les autres services techniques : le service mécanique qui développe les détecteurs d'une part et le service informatique qui réalise le traitement des données d'autre part.

Le service électronique du LAPP comprend 11 ingénieurs de recherche, 3 ingénieurs d'études et 2 assistants ingénieurs. Les électroniciens sont des spécialistes de haut niveau dans les différents domaines de l'électronique et ont des compétences très spécifiques. Ils privilégient le travail en équipe afin de développer des systèmes complets qui répondent aux critères de qualité demandés par les expériences.

L'évolution rapide des techniques et de la technologie, notamment de l'industrie microélectronique et des composants programmables, a placé l'électronique numérique au centre des systèmes. Grâce à des convertisseurs analogiques-numériques de plus en plus rapides et précis, les signaux sont numérisés plus tôt dans la chaîne et le traitement des données s'est fortement accru.

LES SERVICES

Ces techniques de pointe permettent la construction de nouveaux détecteurs et l'explosion du nombre de leurs canaux de mesure, de leur vitesse et de leur précision. Les signaux électriques provenant des détecteurs restent analogiques et sont l'image d'un phénomène variable. Les électroniciens analogiciens conçoivent des systèmes d'amplification et de mise en forme des signaux pour les convertisseurs. Le service compte 10 numériques et 3 analogiciens. Le service comprend parmi ses concepteurs 6 experts en dessin des cartes électroniques. Il a également en son sein des experts en instrumentation qui prennent en charge des systèmes plus larges dans les détecteurs. Finalement, le service participe à des projets de microélectronique analogique pour la lecture des capteurs. Les électroniciens du LAPP travaillent au sein de collaborations internationales où ils exercent des responsabilités importantes. Le service est autonome dans son fonctionnement puisque les agents assurent la maintenance des outils de conception, les relations avec les industriels ou encore la gestion des matériels. Le succès des projets passe par un grand esprit d'équipe et par le partage du savoir-faire et des connaissances de ces techniques de pointe.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2013
2018

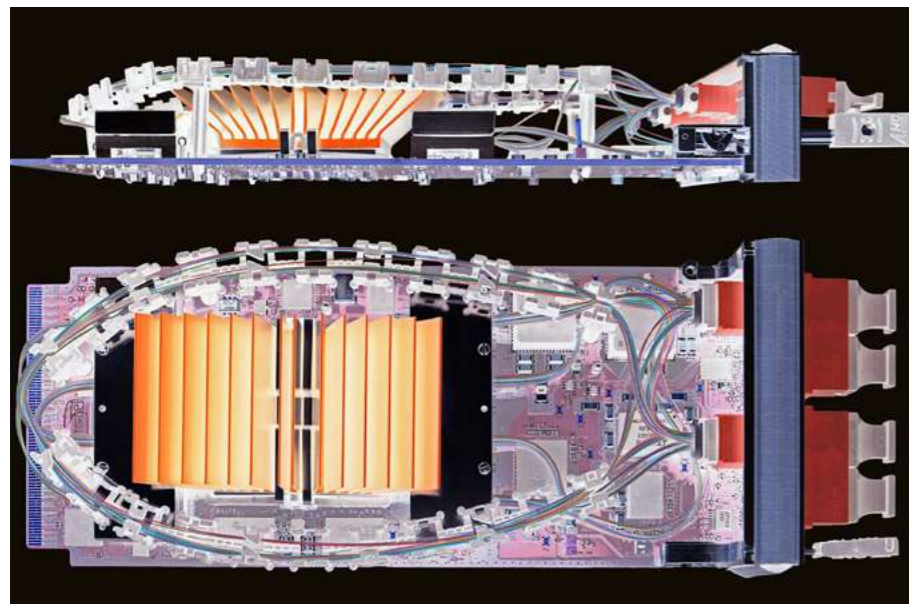
Les électroniciens du LAPP ont été fortement impliqués dans toutes les expériences du laboratoire en phase de développement et ont pris la responsabilité de grands projets internationaux.

2014

Installation des services du détecteur de trace IBL pour l'expérience ATLAS au CERN.

2018

Mise en production d'une nouvelle version de l'électronique d'acquisition VIRGO.



Carte LATOME de déclenchement rapide du calorimètre à argon liquide ATLAS.

EXPERTISE ET COMPÉTENCES

Dans le cadre des projets expérimentaux, de nombreuses compétences ont été acquises ou renforcées :

Upgrades des expériences ATLAS et LHCb au CERN

Pour l'expérience ATLAS, le service électronique a conçu et réalisé les services du détecteur de trace IBL et a participé à leur installation en 2014.

En parallèle, à travers différents prototypes, l'équipe des électroniciens a développé et validé le nouveau système de déclenchement rapide du calorimètre à argon liquide pour la future phase I. Ce projet aboutira en 2019 avec l'installation de 150 cartes.

Pour le passage à la version phase II haute luminosité du LHC, l'équipe est en charge des développements des services électriques du futur détecteur de trace. Ils permettront l'alimentation des détecteurs et la récupération de leurs données.

Au sein de la collaboration, les microélectroniciens du service participent aux développements des circuits intégrés de lecture des détecteurs à Pixels.

Pour l'upgrade phase I de l'expérience LHCb, le groupe du LAPP est responsable de la coordination des différents programmes des composants (FPGAs) présents sur les cartes d'acquisition. Ces cartes développées par la collaboration permettent le traitement des données issues de tous les sous-détecteurs de l'expérience. Les électroniciens du LAPP développent les programmes de traitement des données communs à tous les sous-détecteurs ainsi que le traitement spécifique de certains.

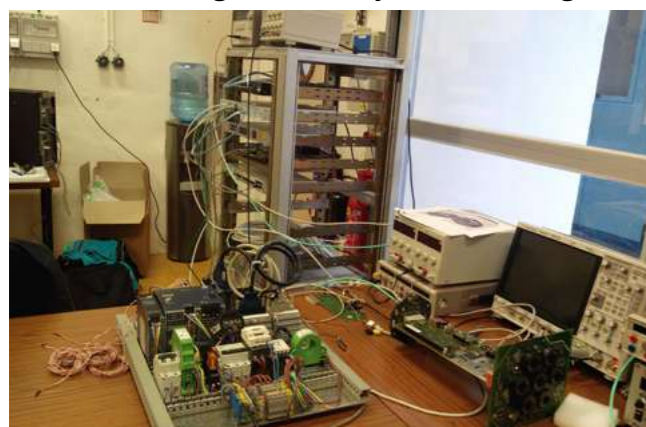
Expériences d'astrophysique et astroparticule du laboratoire

Pour l'expérience de détection des ondes gravitationnelles VIRGO, l'équipe a entièrement repensé et produit l'électronique d'acquisition des signaux de physique, ainsi que la distribution des horloges et des signaux de synchronisation. Cette nouvelle version du système est essentielle et centrale dans le fonctionnement de la nouvelle version Advanced VIRGO, opérationnelle depuis 2018.



Carte DAQ BOX et cartes mezzanines multifonctionnelles, système de timing et transmission de données VIRGO.

Depuis 2014, au sein de CTA, les électroniciens du LAPP sont responsables de la coordination technique des caméras NectarCAM ainsi que des activités sécurité et "slow control" pour les caméras des télescopes de grande taille (LST) et de taille moyenne (MST). Ils développent des systèmes compatibles avec tous les types de télescopes qui permettront leur surveillance et leur exploitation en toute sécurité. L'équipe coordonne également les systèmes auxiliaires du LST : systèmes de calibration, distribution des alimentations, surveillance globale du système, câblage...



Banc de test des châssis de contrôle et sécurité des caméras CTA.

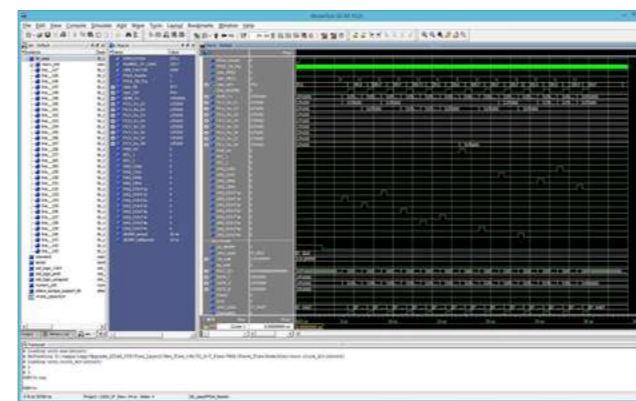
Expériences de physique des neutrinos

- Pour l'expérience SuperNEMO, le service a coordonné la centralisation des sous-systèmes du détecteur. En collaboration avec les informaticiens du laboratoire, l'équipe identifie et décrit les interfaces des sous-systèmes de la collaboration avec le système central et définit les spécifications de l'architecture.
- Au sein de l'expérience WA105/ProtoDUNE-DP, le service a, depuis 2014, la responsabilité de l'électronique d'acquisition des 36 photomultiplicateurs de l'expérience. Ce système a été testé avec succès et sera installé sur le détecteur début 2019. Ce système a permis de valider l'architecture électronique finale qui devra être développée en 2019. L'équipe a également contribué, en collaboration avec le service mécanique du LAPP, à mettre au point la technique de tissage des grilles d'anodes du détecteur ainsi que la mesure de leur position.

Plus généralement, le service électronique participe à des programmes de recherche et développement au sein du laboratoire ainsi que dans des collaborations internationales. Ces R&D visent à développer de nouvelles techniques de détection des particules ou encore de nouvelles techniques de mesure et d'acquisition. Ainsi le service a participé aux développements des détecteurs gazeux Micromégas, destinés aux futurs détecteurs ainsi qu'à la mesure des signaux d'un capteur de vibration pour l'expérience LAVISTA.

Grâce à ces projets, le service possède des compétences avancées dans les principaux domaines de l'électronique :

- En électronique numérique, le service est expert en programmation des composants de dernière génération (FPGA, DSP, microcontrôleur...) et des langages associés (VHDL...). Ces composants performants sont au cœur des architectures d'acquisition des signaux et permettent de traiter des flux gigantesques de données pour lesquels les débits peuvent atteindre 40 Terabits par seconde et par carte (ATLAS, LHCb). Le formatage, la recherche d'erreurs, l'application d'algorithmes complexes de traitement numérique du signal tel que le filtrage, ou encore le calcul de paramètres physiques, font partie des savoir-faire du service électronique. Le service est spécialiste de l'utilisation des FPGA : intégration de cœurs de processeurs (NIOS, DSP...) et d'interfaces complexes (liens séries haute vitesse, mémoire DDR3, PCI express, 10 gigabits Ethernet...). L'écriture des codes de programmation pour les grandes expériences est une tâche devenue si considérable qu'elle est partagée dans les collaborations. Les ingénieurs du service assurent la responsabilité de leur mise en commun et leur bon fonctionnement grâce à des méthodes et des logiciels spécialisés.



Simulation du code d'un FPGA avec le logiciel ModelSim.

- En électronique analogique, le service conçoit des systèmes bas bruit, faible consommation et possédant une grande gamme dynamique, adaptés aux spécificités des détecteurs de physique des particules. Il est expert de l'amplification et de la mise en forme des signaux avant numérisation. Les analogiciens possèdent également une solide expérience en modulation-démodulation, notamment dans les domaines des radiofréquences et micro-ondes. Les électroniciens spécialisés en microélectronique appliquent les mêmes techniques à la réalisation d'ASICs (Application Specific Integrated Circuit), des circuits intégrés spécifiques à l'électronique frontale des détecteurs, où leur faible encombrement et niveaux de bruit sont de réels atouts. De plus, certaines technologies permettent une meilleure tenue aux radiations, indispensable lorsque l'ASIC est situé près du point de collision de l'expérience.
- Le service est expert dans la conception de cartes électroniques multicouches, de haute densité, mettant en œuvre des signaux rapides et des liens séries atteignant la dizaine de gigabits/s. Les concepteurs apportent un souci constant au respect de l'intégrité du signal et de sa compatibilité électromagnétique. De la phase de prototypage à la phase de production, le service électronique travaille en étroite collaboration avec les industriels et tire ainsi profit des meilleures techniques de fabrication de cartes (PCB multicouches, impédance contrôlée, câblage de composants en boîtier BGA, utilisation de via lasers...). Les

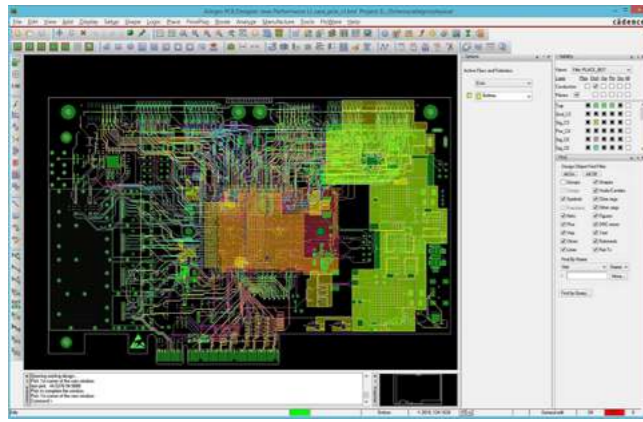
enjeux financiers sont souvent importants et exigent de faire appel aux procédures de marchés publics. Le service maîtrise toutes les étapes de la fabrication des cartes dans le respect des normes internationales : dessin sur logiciels de conception (CAO), étude des coûts, gestion de l'approvisionnement et de la production, tests en série, validation, installation et mise en service dans les expériences, maintenance à long terme.

- Les électroniciens instrumentalistes assurent d'importantes responsabilités au sein de collaborations internationales en définissant globalement les différents systèmes des expériences. Ils ont une vue d'ensemble et leur connaissance poussée des différentes architectures interconnectées permettent d'assurer le fonctionnement et la sécurité des détecteurs. En partenariat avec le service informatique, ils développent les bancs de tests nécessaires à la mise au point de ces systèmes. Ils assurent leur installation sur site et leur maintenance tout au long de la durée de l'expérience.

MOYENS ET INFRASTRUCTURES

Le service électronique du LAPP utilise l'ensemble des techniques de pointe indispensables à la réussite des projets. Les concepteurs utilisent des logiciels de conception, notamment la chaîne Cadence :

- Implémentation des composants programmables de type FPGA (simulation, synthèse de langage VHDL et Verilog, placement/routage, débogage), et ce, pour différentes familles de composants : Altera, Xilinx, Actel.
- Conception des cartes électroniques (simulation, schématique, routage, vérification de l'intégrité du signal).
- Conception des circuits intégrés (simulation, schématique, routage).



Dessin d'une carte au format PCIe 16 couches avec le logiciel Cadence.

ACTIVITÉS TRANSVERSES

Les électroniciens partagent leurs compétences en participant à l'enseignement en école d'ingénieurs ou en IUT, ainsi que lors des formations de l'IN2P3. Deux ingénieurs du LAPP font partie du comité de pilotage des écoles électroniques de l'IN2P3. Ils ont organisé l'école analogique et l'école numérique de l'institut. Le service accueille régulièrement des stagiaires, depuis les classes de 3ème jusqu'au niveau ingénieur, en passant par les élèves d'IUT. Le service présente régulièrement ses réalisations lors de réunions de collaboration, de conférences internationales, ainsi que dans des publications et sur le site web du laboratoire.

PERSPECTIVES

Dans les prochaines années, le service électronique devra assurer les engagements pris, mais également relever de nouveaux défis :

- Assurer le fonctionnement des expériences en cours (ATLAS, LHCb, VIRGO...).
- Installer et assurer le bon fonctionnement des systèmes pour AdvancedVIRGO, pour la phase ATLAS et LHCb, pour le slow-control CTA.
- Poursuivre les développements en cours pour les upgrade phase II d'ATLAS : nouveau système de calibration, participation aux codes de programmation de l'acquisition du calorimètre à argon liquide, services pour le futur détecteur de traces.
- Poursuivre les développements pour VIRGO afin d'améliorer encore les performances du détecteur.
- Contribuer aux expériences futures sur les neutrinos.

Le service bénéficie des moyens et du support du service informatique qui lui procure la puissance de calcul nécessaire aux logiciels. Il a également à sa disposition des logiciels spécialisés en étude thermique des cartes, en étude de l'intégrité des signaux ou encore en gestion des projets multi-développeurs.

Les électroniciens disposent d'appareils performants qui leur permettent de tester et mettre au point les réalisations. Parmi eux, des oscilloscopes, des générateurs de signaux, des analyseurs de spectre/réseau, ainsi qu'un testeur de connectivité Boundary Scan. Les électroniciens automatisent les bancs de test avec Labview. Ils disposent également d'un atelier qui inclut une fraiseuse pour le prototypage rapide de circuits imprimés double face, des stations de soudage/dessoudage et un four à refusion.

Pour se maintenir au meilleur niveau et maîtriser les nouvelles techniques et méthodes, les membres du service attachent une grande importance à la veille technologique et participent régulièrement à des formations (formation CNRS ou IN2P3, formations Cadence...).

ADMINISTRATION

RÉSUMÉ

Le service administratif du LAPP apporte son soutien aux activités de recherche en assurant aussi bien la gestion administrative des personnels, le secrétariat scientifique, la gestion de la documentation du laboratoire, la gestion financière, le support aux missions et aux commandes, l'organisation des colloques, écoles, séminaires et autres réunions.

De leur côté, les services généraux patrimoine et logistique assurent la logistique, la maintenance immobilière et les travaux nécessaires au fonctionnement général, aux bâtiments et aux équipements d'intérêt général.

LE SERVICE ADMINISTRATIF

Il est organisé en un pôle « ressources humaines (RH) » composé de trois personnes, un pôle « finances » regroupant cinq personnes et un pôle patrimoine & logistique regroupant 5 personnes. Pour permettre d'assurer la continuité du service lors des absences, une redondance est prévue pour les différentes activités.

Le service administratif du LAPP est en relation avec la délégation Alpes du CNRS, avec l'Université de Savoie et avec l'IN2P3. Un réseau « responsable administratif » existe d'ailleurs au sein de l'IN2P3. Le responsable administratif participe également aux réunions du bureau logistique du site universitaire d'Annecy-le-Vieux, avec les autres composantes de l'Université Savoie Mont Blanc.

GESTION DES PERSONNELS ET DES RESSOURCES HUMAINES

Le pôle « ressources humaines » réalise le suivi administratif des 151 agents du laboratoire, chercheurs, enseignants-chercheurs et ITA, et des personnels non permanents, contractuels ITA, chercheurs, CDD chercheurs, doctorants... Il gère également une vingtaine de stagiaires qui viennent au LAPP pour une durée moyenne de trois mois.

ÉQUIPE DU LAPP

Service financier

C. Jacob, N. Lyko, R. Nabet, B. Putanier, F. Sublet

Service ressources humaines

C. Bombar, M. Froger, C. Marchand

Services patrimoine & logistique

M. Cortat, E. Grouas, C. Feullar, C. Jazarguer, P. Letournel

Chercheurs	35
Enseignant chercheurs	9
ITA	70
CDD chercheurs	10
CDD ITA	8
Doctorants	17
Émérites	6

Chiffres de l'HCERES 2019 au 30/06/2019

L'ensemble de la gestion administrative des personnels permanents et non permanents se fait en lien avec le service des ressources humaines de la délégation régionale Alpes, de l'IN2P3 ou de l'Université de Savoie Mont Blanc.

Le pôle « RH » assure les démarches nécessaires au recrutement des agents permanents (concours, campagne de mobilité interne de printemps (NOEMI)...) et non permanents (offres d'emploi, sélection des candidatures, organisation des entretiens, conclusion du contrat de travail...) ainsi que la gestion administrative de la carrière des agents en poste que ce soit pour les promotions, les concours, les sélections professionnelles, la gestion des positions d'activités ou le suivi des rapports d'activité annuels des agents.

Le pôle « RH » garantit également le suivi des aspects liés au temps de travail (gestion des congés, absences, maladies, congé parental, temps partiel, compte épargne temps (CET)...). Au sein du LAPP, un agent assure la fonction de correspondant « formation » (COFO) du laboratoire ce qui consiste à diffuser l'offre de formation, à gérer les demandes et les inscriptions.

Le LAPP accueille de nombreux stagiaires issus de formations très diverses allant de la 3ème (stage de découverte de la vie professionnelle) à des stages de master 2 ou stages d'ingénieur. Le pôle « RH » gère alors, en lien avec les services techniques, les sujets de stage, les demandes, les conventions à conclure avec les établissements, les gratifications à verser.

Une procédure a été mise en place pour l'accueil des nouveaux arrivants et des visiteurs étrangers. Un circuit au laboratoire permet de familiariser les agents avec leurs futurs interlocuteurs. L'accueil de visiteurs étrangers impose des formalités particulières et une aide plus importante pour des personnes ne parlant souvent pas le français. Il s'agit alors de conclure une convention d'accueil, de faciliter l'installation et l'obtention d'un visa, d'un logement...

Médecine de prévention - Hygiène et Sécurité

Dans le cadre de ses attributions en matière de ressources humaines, le service administratif est chargé du suivi médical des agents et est aussi un appui pour l'assistant de prévention du LAPP et la personne compétente en radioprotection (PCR) dans leurs missions.

La gestionnaire chargée du suivi médical assure l'interface entre l'association de médecine du travail et les agents. Elle conserve les informations que le LAPP doit détenir en interne pour assurer un suivi efficace des personnels.

Le pôle gère les visites médicales annuelles des agents du LAPP et du LAPTh, soit environ 200 personnes, et les suivis médicaux spécifiques pour certains agents en matière de :

- radioprotection, en relation avec l'IPNO (cartes de suivi médical, demandes de fourniture de dosimètres individuels passifs, fiches individuelles d'exposition aux rayonnements ionisants) ;
- risques relatifs aux produits chimiques : établissement de fiches de sécurité ;
- surveillance de la plombémie, surveillance audiométrique et ophtalmologique ;
- formations (en relation avec le correspondant formation du laboratoire) et habilitations liées à la sécurité électrique, à la conduite des chariots élévateurs, au travail en hauteur etc.

Une fiche de sécurité LAPP est établie à chaque demande de fourniture de substances industrielles et de produits dangereux. Cette fiche est mise en ligne sur le site internet du LAPP pour visibilité par les utilisateurs.

Enfin, toute la documentation relative à la sécurité est également assurée au service administratif, en collaboration avec les assistants de prévention (AP) : suivi des vérifications périodiques en matière de sécurité (extincteurs, installations électriques, chaudières, ascenseurs...) et en matière de maintenance des équipements du laboratoire (compresseurs à air, détecteurs de gaz...) ; suivi de l'élimination des déchets et des produits chimiques.

SECRETARIAT DE DIRECTION, ORGANISATION DES COLLOQUES, GESTION DOCUMENTAIRE

Secrétariat de direction

Le directeur d'unité et les autres membres de l'équipe de direction sont aidés par une assistante de direction qui est également en charge du pôle ressources humaines. Elle coordonne et réalise des activités de soutien aux missions du directeur de l'unité, depuis la gestion de sa communication, de la documentation, la gestion de son agenda et des échéances associées. Elle assure également les activités de soutien à la coordination des projets scientifiques portés par le directeur dans un contexte international.

Organisation des colloques, écoles, séminaires et autres réunions de travail

En lien avec les physiciens responsables du projet, le service administratif, avec les services généraux, assume la logistique des événements organisés par le LAPP dans ses murs ou à l'extérieur. La gestion concerne aussi bien la détermination des besoins, le recours à des prestataires extérieurs que l'accueil des participants. Une douzaine d'événements ont ainsi été organisés par le laboratoire.

Service financier

Le 1er janvier 2012, une convention de délégation globale de gestion (DGG) est entrée en vigueur. Cette convention signée entre les deux tutelles du laboratoire a pour objet de confier au CNRS la gestion du LAPP pour les aspects suivants : moyens techniques et financiers, achats de biens et services, recrutement de personnel sur ressources propres, négociation, signature et gestion des contrats liés à ces activités, sécurité et gestion des locaux.

Cette DGG a eu un impact concret sur le travail des gestionnaires du service financier. A compter de l'exercice 2012, seul le logiciel de gestion financière du CNRS est utilisé, seules les règles d'achat du CNRS sont à appliquer, les contrats de recherche sont gérés de manière uniforme. Ce changement a donc simplifié la gestion sans entrainer de difficultés particulières.

Budget

Le pôle « financier » assure la gestion de l'exécution du budget du laboratoire dont les crédits proviennent de l'IN2P3, de l'Université de Savoie et de ressources propres au LAPP (contrats de recherche européens, ANR, subvention des collectivités locales, valorisation...). Selon les expériences en cours de construction, ce budget représente un montant d'environ 2 millions d'euros par an, hors dépenses de personnel.

Le budget est réparti entre différentes entités dépensières attribuées aux groupes de recherche et aux services. Le pôle assure la tenue de tableaux de bord budgétaires et financiers nécessaires au directeur, au responsable administratif ou aux tutelles ainsi que diverses opérations budgétaires (transferts internes, externes...). Le contrôle des comptes du laboratoire se fait à la fois en interne, avec les responsables de groupe, et en externe avec le contrôle régulier de la cohérence BFC/ GESLAB pour le CNRS (pointages des comptes, corrections), et SIFAC/XLAB pour l'université (jusqu'à la mise en place de la DGG). Le suivi des recettes du laboratoire et la justification des contrats de recherche est aussi de la responsabilité du pôle.

Achats

L'ensemble des achats du LAPP est géré par le pôle « financier », que ce soit les achats sans formalités ou les mise en concurrence avec publicité pour les montants plus importants, voire les procédures formalisées (appel d'offres). Le LAPP utilise également les marchés nationaux du CNRS dans les domaines où ils existent : ordinateurs, gaz, téléphonie mobile...

La réalisation de ce travail impose la connaissance de l'outil financier du CNRS, des règles de la comptabilité publique et celles applicables aux marchés passés par les établissements publics à caractère scientifique et technologique (EPST). Le service est donc là pour apporter conseil et assistance aux services techniques et aux groupes d'expérience lors de la réalisation de leurs achats.

Carte achat

Ces cartes, au nombre de cinq, permettent d'effectuer des achats chez les fournisseurs locaux, de payer des frais d'inscription aux conférences organisées en dehors du CNRS, ou d'acheter des biens sur internet. Une gestionnaire

du service financier assure la responsabilité du contrôle mensuel des dépenses sur carte achat.

Missions

Les agents du laboratoire effectuent en moyenne 2 200 missions par an dont les destinations reflètent la dimension internationale des collaborations de recherche dans lesquelles le LAPP est impliqué. Du fait de la situation géographique du LAPP et de l'engagement sur les expériences LHC, environ 60 % des missions sont à destination du CERN. Les principales destinations (hors CERN) sont la France, l'Italie, l'Allemagne, les Etats-Unis. Trois personnes consacrent une partie de leur temps de travail à aider les agents et à réaliser les formalités nécessaires aux déplacements que ce soit pour les aspects financiers (paiement des indemnités) ou pratiques (billetterie, hôtels...).

Bibliothèque

La bibliothèque possède plus de 5 000 ouvrages et comptes rendus de conférences, 2 000 thèses et rapports ainsi que de nombreux documents multimédias (vidéos et DVD). Chaque année, une centaine de nouveaux ouvrages vient enrichir ce fonds. Tous ces documents sont répertoriés dans la base Koha commune à tous les laboratoires de l'IN2P3. La bibliothèque est abonnée à une quarantaine de périodiques techniques et scientifiques, en version papier ou numérique. Elle offre également à ses utilisateurs l'accès en ligne aux principales revues de notre discipline par l'intermédiaire du portail Bibliosciences.

Le service administratif a aussi en charge la collecte et la saisie des publications du laboratoire dans la base institutionnelle d'archives ouvertes HAL-IN2P3 (entre 200 et 300 par an).

SERVICES PATRIMOINE & LOGISTIQUE

Missions

Les activités du service sont variées et concernent aussi bien l'accueil, la maintenance immobilière et des équipements techniques collectifs (ascenseurs, climatisation, alarme incendie...), la gestion des fluides, le courrier, les achats de proximité que l'entretien du parc de véhicules. Une bonne partie de ces tâches nécessite un suivi des entreprises intervenantes, principalement pour les travaux et le nettoyage.

Les travaux les plus importants (infrastructure) sont assumés par le service technique de la Délégation Alpes, en collaboration avec les services généraux. Les travaux nécessitant peu de moyens sont réalisés en interne. Un agent du service fait partie du réseau des correspondants techniques « bâtiment » pour le CNRS.

En relation avec le Comité Hygiène et Sécurité et les assistants de prévention, les services généraux veillent à la sécurité des installations et au respect des règles par les entreprises extérieures.



Figure 3 : Bâtiments et espaces verts.

INFORMATIQUE

RÉSUMÉ

Le service informatique comprend 23 ingénieurs et assistants ingénieurs pour assurer deux missions essentielles : la mise en œuvre et la maintenance des outils de travail informatiques, des systèmes et des réseaux et le soutien aux expériences dans des phases de type acquisition de données, contrôle commande des détecteurs ou simulation, production et analyse de données. Le service est impliqué dans plusieurs projets de grille de calcul et de stockage grâce à son mésocentre de calcul MUST. Afin d'assurer ces deux missions, le service est reparti en deux sous-services, le service général et le support aux expériences.

INTRODUCTION & ÉQUIPE DU LAPP

Afin d'assurer ses deux missions, le service informatique, fort de 23 personnes, est reparti en sous-services, le service général (qui gère le matériel et les services informatiques fournis au laboratoire) et le support aux expériences.

Le service général est constitué d'une équipe de 8 ingénieurs et assistants ingénieurs, mutualisée avec le laboratoire du LAPTh, qui prend en charge la gestion des postes de travail, l'administration des serveurs, du réseau et de tous les équipements informatiques. Depuis 2005 un axe de développement important a été le mésocentre MUST, nœud de grille EGI et Tier2 WLCG mutualisé à l'échelle de l'Université Savoie Mont Blanc. Une mission importante du service est de prévoir l'évolution des outils pour anticiper ou répondre aux besoins des utilisateurs et des expériences. Un ingénieur est en charge de l'administration et de la maintenance des sites web et des outils collaboratifs.

Le service organise chaque année une réunion avec les utilisateurs. C'est l'occasion de présenter le bilan de l'année écoulée mais également les nouveautés et changements à venir. Elle intervient en complément de points techniques précis régulièrement présentés en réunion hebdomadaire du laboratoire.

Le soutien aux expériences est constitué d'une équipe de 15 ingénieurs regroupés selon plusieurs profils de compétences. Une partie des ingénieurs sont impliqués dans plusieurs projets.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

2013
2018

Le service a participé à 6 expériences internationales et 2 projets européens H2020. Il assure également la gestion de 100 serveurs et 350 postes de travail, indépendamment du mésocentre MUST.

2013

Salle de calcul de 170 m² pour le mésocentre MUST inaugurée dans la Maison de la Mécatronique.

2015

Premier projet de développement en calcul haute performance (HPC)

Mise en production du logiciel de contrôle du système de chargement/déchargement et du système de gestion de la sécurité du 5^{ème} télescope de HESS en Namibie

2017

Le nœud de grille Tier2 voit ses qualités reconnues en tant que Nœud Nucleus pour ATLAS

Premier projet d'intelligence artificielle.

EXPERTISE ET COMPÉTENCES

Service Général

Le service général a mené de nombreux chantiers ces dernières années afin d'accompagner l'émergence de nouveaux besoins et de nouvelles technologies. Ces évolutions portent autant sur les performances et les capacités des services existants que sur l'introduction de nouveaux services, incluant la prise en compte des aspects sécurité et qualité de service.

En particulier, le démarrage du LHC au CERN en 2009 et les prises de données qui l'accompagnent depuis cette date, ont débouché sur des analyses de physique et des résultats scientifiques de tout premier plan, qui n'ont été possibles que grâce à l'existence de la grille de calcul WLCG et surtout à sa capacité à répondre aux défis qui lui avaient été assignés.

Depuis novembre 2007, le mésocentre MUST est Tier2 de la grille WLCG pour les expériences ATLAS et LHCb. Dans le but de satisfaire les engagements de capacité et de qualité de service associés à cette responsabilité, des études approfondies et permanentes sont nécessaires. Ces études portent non seulement sur l'architecture matérielle et logicielle de cette ferme de calcul, sur son administration, mais aussi sur les infrastructures telles que l'électricité et le refroidissement de salles informatiques.

L'utilisation de technologies liées à la virtualisation des serveurs informatiques fait partie depuis plus de quinze ans des moyens fréquemment mis en œuvre par le support général et cela afin de répondre aux différentes contraintes de place, consommation électrique, fiabilité, et redondance des services.

Une attention particulière est portée sur la qualité de service, c'est-à-dire la fiabilité, l'évolutivité et la pérennité des procédures et services mis en place. La stratégie s'est orientée vers la mutualisation des outils et savoirs ainsi que la mise en production et l'utilisation d'outils collaboratifs. De nombreuses actions ont été entreprises en ce sens :

- mise en place d'une architecture réseau redondée sur l'ensemble des bâtiments,
- mise en place de haute disponibilité pour les services les plus critiques,
- déploiement d'un système de stockage distribué (CEPH) permettant la migration d'une machine virtuelle d'un serveur à un autre et résistant à l'arrêt d'une des deux salles informatiques,
- installation et configuration automatisées d'une grande partie des services fournis aux utilisateurs,
- migration vers le service de messagerie collaborative de l'IN2P3,
- migration vers le système antispam de RENATER,
- mise en place progressive d'une authentification centralisée via Active Directory,
- déploiement d'un outil de gestion parc avec inventaire automatisé.

Par ailleurs la politique de sécurité repose d'une part sur l'application des directives du CNRS, en particulier en ce qui concerne le chiffrement des postes de travail mais également sur la mise en place de zones réseaux sécurisées (VLAN) et d'une authentification forte du matériel se connectant au réseau du laboratoire. Enfin, la responsabilisation des utilisateurs fait partie de la politique de sécurité portée par le service ; cela passe par de l'information régulière et des formations.

Projets expérimentaux

Dans le domaine de l'acquisition, du traitement en ligne des données et du contrôle commande, l'implication des informaticiens au sein des expériences permet d'apporter des solutions techniques innovantes à la plupart des expériences du laboratoire : caractérisation et optimisation de systèmes Linux temps-réels pour l'acquisition de données, mise en œuvre de systèmes de traitement des données au plus près des détecteurs dont la mise au point de pilotes de cartes électroniques spécifiques, enfin développement de codes Digital signal processor (DSP) et de codes embarqués sur des microcontrôleurs. Le groupe possède également une expertise très pointue dans les domaines techniques du contrôle commande d'interface avec les instruments, la mise en œuvre des bancs de tests instrumentés et la gestion de

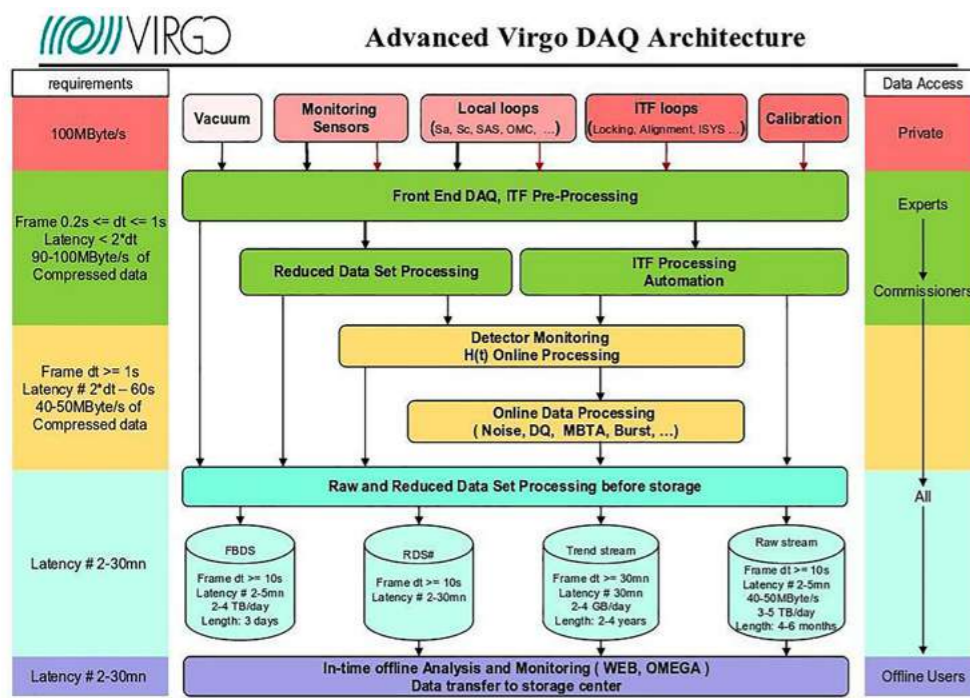
flux vidéo. Dans le domaine de la simulation et de l'analyse des données expérimentales, le développement et la mise en œuvre de logiciels propres à la discipline sont assurés.

Les projets majeurs suivants sont en développement ou en production :

VIRGO

Le service informatique du LAPP participe à ce projet depuis plus de vingt ans mais depuis 2013, les développements suivants ont été réalisés et mis en production pour le projet AdVIRGO d'amélioration de la sensibilité de cette expérience :

- Logiciels temps réels de pilotage des nouveaux boîtiers d'acquisition (DAQbox) et de leurs mezzanines,
- Mise à jour du logiciel utilisé pour différents contrôles locaux (bancs suspendus, output mode cleaner) et verrouillage de l'interféromètre (ACL),
- Logiciel de monitoring de l'ensemble des serveurs (VPM),
- Validation globale et mise en production du système de Timing et réseau de Fibres Optiques (cartes TOLM) pour le contrôle de l'interféromètre et du système d'acquisition d'AdVirgo

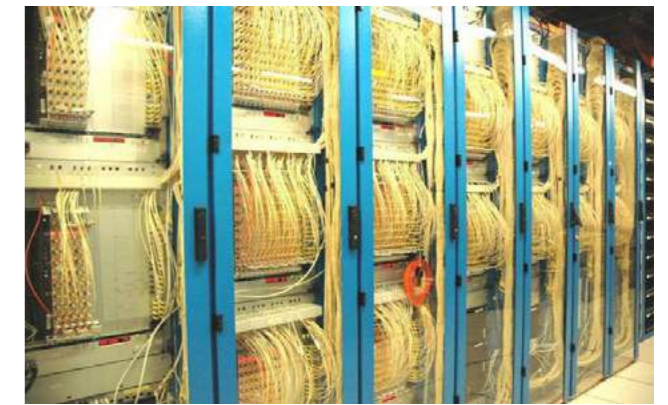


Advanced virgo DAQ Architecture

ATLAS

ATLAS - Acquisition du Calorimètre à Argon Liquide

Depuis 2001, le LAPP a pris des responsabilités importantes dans les développements informatiques liés à l'acquisition et au contrôle du Calorimètre Electromagnétique de l'expérience. En particulier, sur la période 2013-2018, l'équipe a dû faire face à une charge importante de maintenance et d'évolution des systèmes existants dont l'évolution et la maintenance d'un système de contrôle commande et d'un système de surveillance de cartes électroniques, du système de lecture et de traitement des données issues du calorimètre, en collaboration avec l'équipe électronique en charge de la carte d'acquisition ROD (Read Out Driver).



LAr readout electronics

ATLAS projet IPMC

Depuis 2012, dans le cadre de l'upgrade d'ATLAS pour la phase-I (2019-2020), la collaboration a pris la décision de changer de technologie de châssis et de format de cartes électroniques pour des cartes répondants aux spécifications techniques de l'informatique industrielle et des télécommunications (ATCA). En équipe avec les électroniciens du laboratoire, les ingénieurs du service ont donc pris en charge la conception et le développement de la partie logiciel d'un contrôleur IPMI générique basé sur deux microcontrôleurs et destiné aux interfaçages de la carte avec le monde extérieur (Carte mezzanine IPMC).



IPMC board



ATLAS simulation IBL puis Stave Alpine dans GEANT4

Entre 2011 et 2016, dans le cadre de l'évolution du détecteur interne d'ATLAS (IBL), un ingénieur du LAPP a proposé une extension du package géométrie de la collaboration pour mieux modéliser le détecteur en apportant plus de modularité. Une nouvelle version du même outil a permis de modéliser la proposition innovante de détecteur pixel "Géométrie Alpine" faite par les physiciens du laboratoire. Cette proposition d'extension a été retenue par la collaboration, elle a ensuite été utilisée par les groupes en compétition sur les détecteurs pixels pour permettre leur comparaison et c'est grâce à ce logiciel que la solution de géométrie proposée par le LAPP a pu démontrer ses atouts et être retenue.

HESS

A partir de 2011, le LAPP a mené le développement du logiciel de contrôle et monitoring du système de chargement/déchargement de la caméra du 5ème télescope de HESS ainsi que du système de contrôle et sécurité de la caméra (Gestion des températures, de l'humidité, ...) et l'intégration au « framework » HESS. Ces logiciels sont en opération depuis 2015 sur le site en Namibie.

SuperNemo

Depuis 2013, l'équipe a pris en charge le développement d'un système de Slow Control CMS (Control and Monitoring System) constitué d'un cœur d'application et d'un ensemble de MOS (Multipurpose OPCUA Server) s'appuyant sur le standard OPCUA, ainsi que des clients graphiques permettant le monitoring. Il permet une intégration logicielle homogène de divers matériels hétérogènes. Le CMS fournit au système de contrôle général, l'accès aux composants matériels grâce à une communication basée sur les technologies RabbitMQ, Protobuf et XML.

CTA - Contrôle Commande LST

En parallèle, les mêmes ingénieurs ont pris en charge le développement et la coordination globale du contrôle/monitoring de la structure du grand Télescope (LST), mais également le développement de la couche « Semi-Experte » du contrôle/monitoring du LST intégrant notamment le contrôle des mouvements de « haut niveau » tels que le suivi de sources, le

positionnement du télescope. Ils implémentent également la couche logicielle d'interface permettant à chaque composant logiciel du LST (Drive, Système de miroirs, Camera, Systèmes auxiliaires, ...) de s'intégrer au « framework » ACS (Alma Common System) choisi par CTA.

CTA DATA Management

Entre 2012 et 2016, dans le cadre du rôle de Project Manager en soutien au Project Investigator (PI) du traitement des données offline de CTA, les réalisations suivantes ont été menées à bien : mise en place des simulations sur la grille EGI, mise en place d'une plateforme de développement collaboratif du logiciel au CCIN2P3, gestion du projet et des équipes internationales dont le développement du cadriciel et des algorithmes du pipeline de traitement des données, responsabilité des études sur les e-infrastructures hors des sites et finalement coordination de la dernière version du « Technical Design Report » (TDR). De plus le LAPP a été impliqué dans la définition de l'Architecture Logicielle globale et l'identification des besoins.

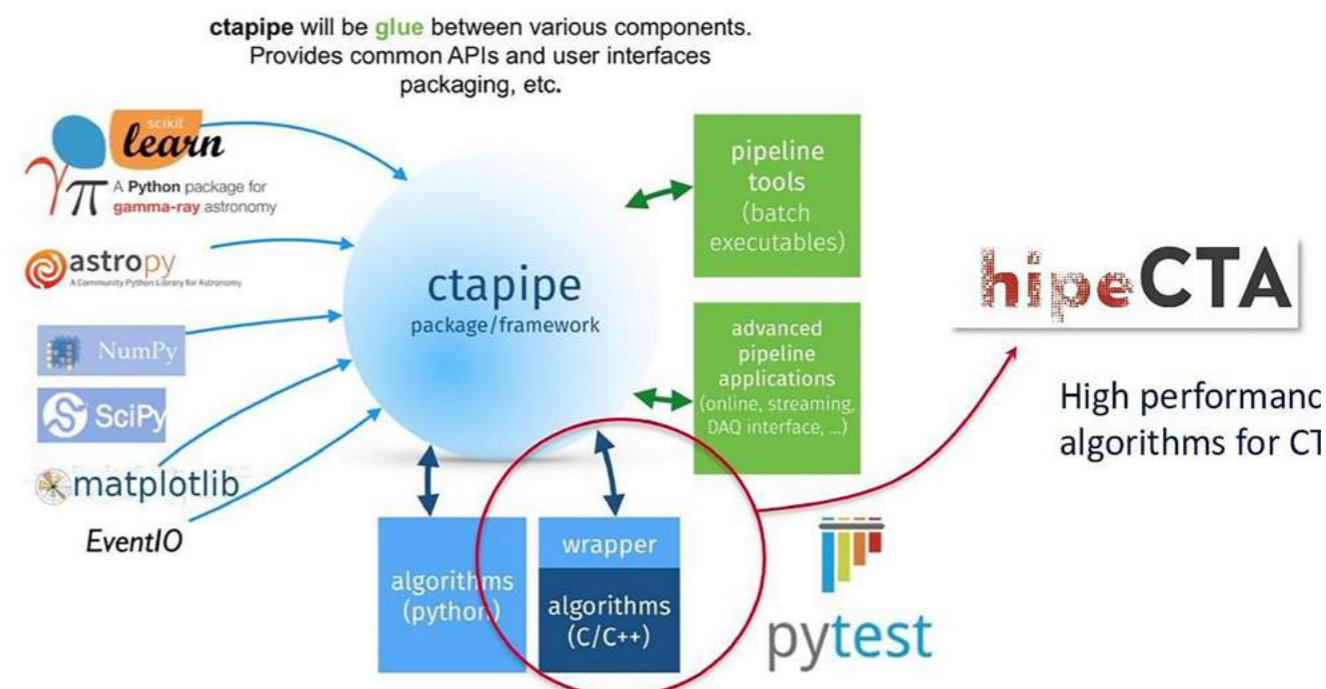
CTA e-infrastructure

Dans le cadre de ce sous-projet de CTA dirigé par le LAPP, les études du flux de données à traiter, du modèle de calcul et distribution des données (Computing Model), et l'étude des réseaux informatiques longue distance ont été menées à bien. Depuis 2017, l'un des membres du laboratoire continue à gérer la direction de ce groupe de travail en tant que consultant externe pour l'observatoire CTA.

CTA pipeline

Depuis 2014, une équipe participe à la conception et à la mise en œuvre du pipeline de reconstruction des données en collaboration avec les développeurs d'autres instituts, notre spécialité étant la conception et développement d'algorithmes ultra optimisés grâce aux méthodes de calcul haute performance. Une thèse en informatique appliquée à l'Astrophysique pour CTA a démarré fin 2017 ; elle porte sur l'utilisation de l'intelligence artificielle et plus particulièrement des méthodes de Deep Learning.

En parallèle, une étude a été menée sur la faisabilité d'utiliser l'écosystème Hadoop pour une solution BigData du traitement des données.

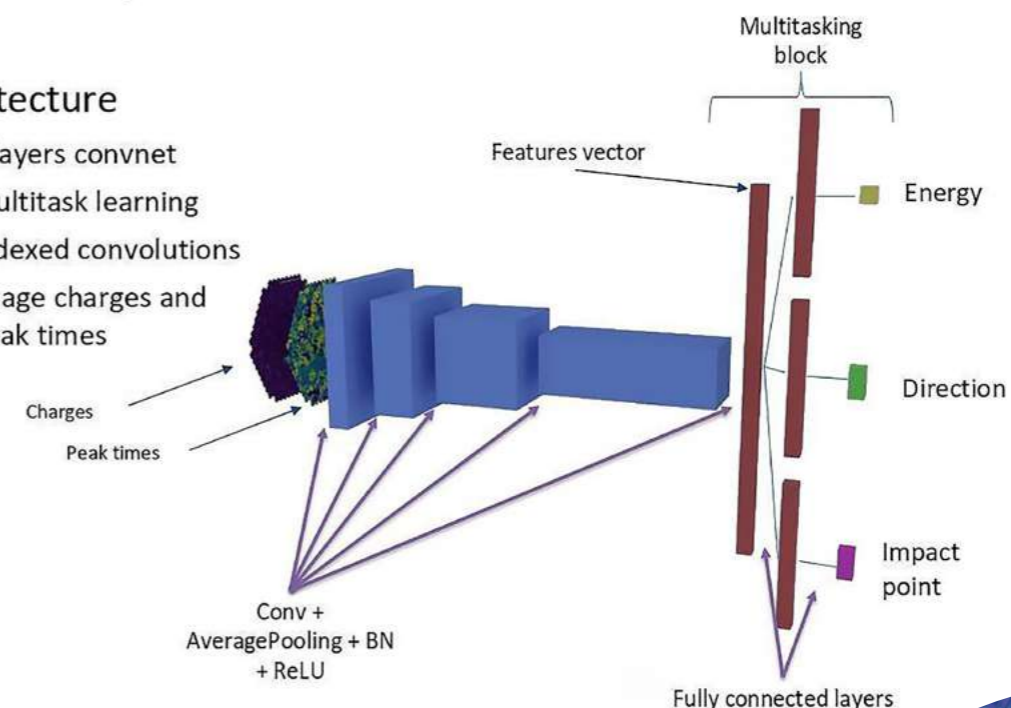


Le pipeline de traitement des données CTA

CTA LST analysis: Event reconstruction

Architecture

- 5 layers convnet
- Multitask learning
- Indexed convolutions
- Image charges and peak times



L'Architecture deeplearning de l'analyse des évènements CTA

LSST

Le LAPP développe un outil de chargement, test et validation des données DESC (Dark Energy Science Collaboration) dans la base de données Qserv retenue par la collaboration LSST et installée au CC-IN2P3.

MOYENS ET INFRASTRUCTURES

Le laboratoire est équipé d'une salle informatique de 60 m² qui héberge les services informatiques aux utilisateurs des laboratoires LAPP et LAPTh et, depuis 2013, d'une salle de 170m² principalement pour les services du mésocentre MUST. L'équipe s'est fortement impliquée dans la conception et l'urbanisation de cette nouvelle salle. Le parc actuel comprend environ 100 serveurs (physiques et virtuels), sans compter ceux du mésocentre MUST et près de 350 postes de travail sous les 3 principaux systèmes d'exploitation (Windows, MacOS et Linux).

Pour l'authentification des utilisateurs, une architecture autour d'Active Directory a été mise en place au niveau IN2P3, son usage a été étendu au laboratoire et permet de gérer les accès à des services pour l'ensemble des utilisateurs du laboratoire (postes de travail, serveurs de calculs, messagerie...).

Dans le domaine du stockage, une solution centrale de type NAS d'une capacité de 40 To offre aux utilisateurs un accès aux fichiers à travers les protocoles NFS et SAMBA, assurant une disponibilité très élevée des données.

La sauvegarde des données sensibles est effectuée de façon quotidienne vers le centre de calcul de l'IN2P3.

Un service baptisé « myDrive@LAP » permet d'offrir un service de synchronisation de fichiers. Il vise à sécuriser les données présentes plus particulièrement sur les ordinateurs portables. Cet outil permet également d'envoyer de gros fichiers de manière sécurisée.

Un cluster interactif d'une quinzaine de serveurs destinés aux travaux de prétraitement et aux calculs interactifs des expériences, en frontal du mésocentre MUST, est mis à la disposition des utilisateurs.

Au niveau du réseau, les salles informatiques sont connectées via un double cœur de réseau hautement-disponible et à hautes performances. Le mésocentre MUST dispose de plus d'un cœur de réseau dédié à haute densité de ports 10 et 40 Gbps afin de répondre aux besoins de performance des services. Les postes de travail bénéficient d'une connexion filaire à 100 Mps. Deux réseaux sans-fil sont déployés pour couvrir les salles de réunions et l'auditorium : Eduroam et un réseau « visiteurs » à distribution de coupons nominatifs.

Pour son accès à Internet, le LAPP est actuellement relié au réseau régional AMPLIVIA par une ligne à 1 Gbit/s et une ligne directe à 10 Gbps avec le centre de calcul de l'IN2P3 sur le réseau « LHCONe » déployée pour répondre aux besoins de MUST.

De nombreux services utilisés sont mutualisés au niveau de l'IN2P3 : messagerie collaborative (Zimbra), gestion documentaire (Atrium), gestion des réunions et conférences (INDICO), sauvegarde (TIVOLI).

ACTIVITÉS TRANSVERSES

Un ingénieur anime le Réseau des Informaticiens IN2P3 et IRFU (RI3)

Participation au projet IN2P3 REPRISE autour du calcul haute performance et reproductibilité des calculs à virgule flottante.

Plusieurs ingénieurs du service informatique assurent des heures d'enseignement au sein de l'USMB.

PERSPECTIVES

L'explosion du volume de données prévue par les nouvelles expériences (CTA, HL-LHC, LSST) nous a incité à nous former aux technologies dites "Big Data", aux nouveaux outils destinés aux Data Scientist, à l'intelligence artificielle (machine learning) et enfin au calcul haute performance qui permet de réduire les temps de calcul de nos algorithmes. Pour cela en plus des formations, le LAPP a choisi d'encadrer en cotutelle des thèses d'informatiques appliquées à la recherche fondamentale en astrophysique. Ces compétences nous permettront dans l'avenir de proposer de nouveaux services, comme par exemple la maintenance préventive qui viendra enrichir les applications de contrôle et de monitoring ainsi que de nouvelles techniques de traitement et d'analyse de données.

Le service général poursuit sa stratégie double et indissociable axée d'une part sur les services apportés au sein de la grille EGI/WLCG et auprès des laboratoires de l'Université Savoie Mont Blanc, et d'autre part sur les services destinés aux utilisateurs locaux du LAPP. Les avancées des uns sont amenées à profiter aux autres : par exemple, le niveau de qualité de service imposé dans l'environnement grille permet de mettre en place des outils génériques qui profitent à l'ensemble des utilisateurs.

Un objectif connexe est aussi de valoriser auprès d'autres expériences telles que CTA, l'expertise acquise sur des infrastructures de calcul et stockage déjà en production telles que la grille de calcul WLCG.

Les architectures de stockage en « Data Lake », poussent le laboratoire à réévaluer ses besoins en terme de performance et de disponibilité de la connectivité extérieure. La nouvelle feuille de route prévoit 40 Gbps début 2019 via deux liens physiques redondants. À partir de 2022, une connectivité à 2x100 Gbps pourra être envisagée en fonction des besoins des expériences. Faire croître en qualité les services rendus par le support général aux utilisateurs et expériences reste un objectif fort. Cela passe par encore plus de redondance au niveau des infrastructures, des services et des expertises.

L'utilisation de plus en plus forte de la virtualisation et les demandes des différents services techniques et des expériences nous amène à étudier des solutions de type «Cloud» qui permettrait l'optimisation de l'utilisation de nos ressources et une plus grande autonomie des utilisateurs.

MÉCANIQUE

RÉSUMÉ

Le service de mécanique du LAPP comprend 19 ingénieurs, assistants ingénieurs et techniciens. Sa mission est de prendre en charge des développements techniques nécessaires à la construction des expériences de physique auxquelles le laboratoire contribue. Son champ d'action dépasse le cadre strict de la mécanique puisque ses équipes mènent des projets à caractère multidisciplinaire où les thèmes de mécanique, automatisme, automatique, instrumentation, vide, mécatronique, systèmes de refroidissement, matériaux composites et optique sont abordés.

INTRODUCTION & ÉQUIPE DU LAPP

Le service de mécanique du LAPP a pour mission de prendre en charge des développements techniques nécessaires à la construction des expériences de physique auxquelles le laboratoire contribue. Pour assurer cette mission, le service mécanique est organisé en trois équipes : Atelier (3 assistants ingénieurs et 3 techniciens), Automatisation (2 ingénieurs et 1 assistant ingénieur) et Bureau d'Études (8 ingénieurs et 3 assistants ingénieurs).

Pour chaque expérience, le service met en place un groupe « projet » comprenant un responsable et une équipe regroupant les compétences complémentaires nécessaires. L'équipe ainsi formée suit le déroulement d'un projet depuis les étapes de pré-étude jusqu'au démantèlement en passant par les études, les réalisations, les tests, les installations, les mises en route et la maintenance.

Conception et réalisation sont intimement liées dans nos projets. Les assistants ingénieurs et techniciens assurant la réalisation et le montage sont associés à la conception et les concepteurs suivent les travaux de réalisation et d'installation. Cette organisation permet de limiter les risques de non-conformité. Les membres du service peuvent être amenés à collaborer à plusieurs expériences en fonction des besoins.

TEMPS FORTS & CHIFFRES CLÉS

De 2013 à 2018, les mécaniciens et automaticiens du LAPP se sont fortement impliqués dans toutes les expériences du laboratoire :

2014

Installation au CERN des lignes de refroidissement CO₂ diphasique du détecteur IBL d'ATLAS

2015

Installation et commissioning du système de débarquement et autofocus de la caméra pour le 5^{ème} Télescope HESS

2016

Installation et mise sous vide des 5 bancs optiques pour l'expérience VIRGO
Installation du système de blindage et du système de calibration STEREO à l'ILL

2018

Installation des 36 feuilles sources installées au cœur de l'expérience SuperNEMO
Installation de l'Arche du premier grand télescope CTA sur le site de La Palma aux Canaries et premiers tests de motorisation du télescope.
Fabrication des 4 plans de détection de l'expérience ProtoDUNE-DP.

EXPERTISE ET COMPÉTENCES

L'organisation du service de mécanique permet à la fois de répondre aux demandes des projets de physique et de développer les compétences métier nécessaires pour apporter aux expériences des contributions techniques reconnues.

Dans le cadre des projets expérimentaux, de nombreuses compétences ont été acquises ou renforcées :

Upgrades de l'expérience ATLAS au CERN

La contribution mécanique à l'upgrade phase 1 du détecteur interne ATLAS s'est concrétisée en 2014 par la production et l'installation des lignes de refroidissement CO₂ diphasique du détecteur IBL. Le LAPP a conçu à cette occasion un raccord ultra compact en alliage de titane sans joint qui n'existait pas sur étagère. Il a également développé conjointement avec un industriel un isolateur électrique (assemblage titane, céramique, acier inoxydable brasé).

Dans le cadre de l'upgrade HL-LHC, le LAPP a participé au développement des structures mécaniques du projet de détecteur PIXEL type « Alpin » initié par un physicien du laboratoire. L'un des défis majeurs a été de garantir un ratio rigidité/masse optimum grâce à l'utilisation de composites carbonés.

Le groupe a pu également élargir sa compétence dans la mise en œuvre des systèmes de refroidissement CO₂ diphasique. Des simulations numériques dans le domaine thermique ont été réalisées et un travail important de mesures de performances thermiques a été mis en œuvre sur des bancs de tests élaborés au LAPP.

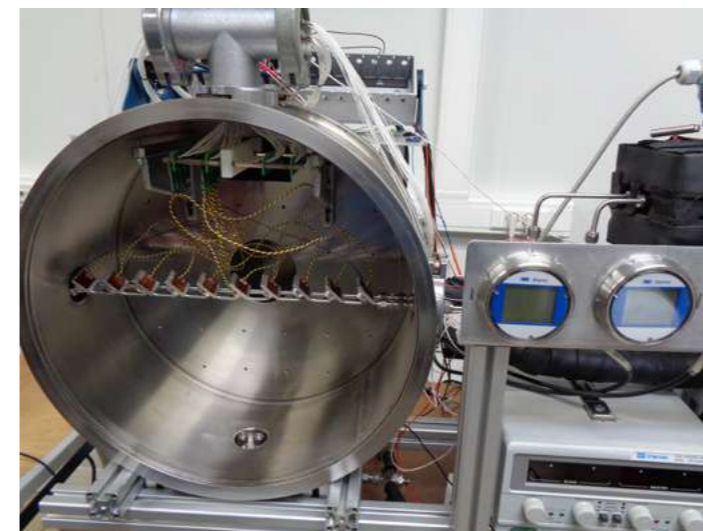


Photo ATLAS : Banc de test CO₂ diphasique.

Expériences d'astrophysique et astroparticules du laboratoire

Dans la continuité des réalisations du projet HESS, le LAPP s'implique depuis une dizaine d'années sur les télescopes de grande taille du projet CTA et notamment en tant que responsable de la conception, de la fabrication et de l'installation de la structure de support de la caméra. Cette arche haubanée est une structure de 28 m x 24 m destinée à maintenir en position une caméra de deux tonnes au-dessus des miroirs du télescope. Elle est constituée de tubes en fibres de carbone surmontés du cadre de caméra également fabriqué en matériaux composites. Au cours des années 2013-2018, le service a assuré la finalisation du design et des calculs structuraux associés, le suivi de production chez le sous-traitant et le montage du premier télescope aux Canaries qui s'est achevé, pour la partie mécanique, fin septembre 2018. De plus, de par la taille de la structure et la nature des opérations à réaliser, ce projet a nécessité la mise en œuvre de nouvelles compétences telles que la conduite de nacelle élévatrice, les travaux sur cordes, et le rôle d'officier de prévention et de sécurité. Le LAPP est également responsable de la partie contrôle/commande des mouvements du

télescope dans le respect des règles de sécurité et sûreté de fonctionnement. Cette partie ("Drive System") est associée à un défi important puisque non seulement le télescope doit avoir une précision de pointé très importante mais il doit surtout être capable d'effectuer des mouvements à très grande vitesse en toute sécurité : 180° en 20 secondes en cas d'alerte scientifique. Il faut rappeler que le poids total du télescope dépasse les 100 tonnes. L'installation sur site a débuté en juin 2018 et les premiers tests de mouvements ont eu lieu à l'automne 2018.

Entre 2012 et 2016, dans le cadre du projet ondes gravitationnelles Advanced Virgo, qui est une amélioration de la sensibilité de l'appareil, le service mécanique a eu en charge la mise sous vide des cinq bancs optiques de l'expérience. Ces bancs en aluminium, dont le poids est de 350 daN, ont été équipés de supports de contrôles locaux et d'un système d'introduction dans les enceintes à vide. Ils sont par ailleurs suspendus par un fil à un système d'atténuateurs de vibrations. De plus, deux de ces enceintes à vide (minitours) ont reçu une structure mécanosoudée qui sert de salle propre.



Photo CTA :
l'Arche du télescope



Photo VIRGO :
Banc de détection dans sa mini-tour
(Fichier SDB2)

Expériences de physique des neutrinos

Dans le cadre du projet ProtoDUNE DP, prototype de détecteur de neutrino pour le futur projet DUNE, le LAPP est depuis 2014 en charge de la conception, de la réalisation et de l'installation sur site des quatre plans de lecture (CRP) au-dessus d'un volume d'Argon liquide, ainsi que de l'automatisation permettant d'assurer leur suspension et déplacements verticaux dans le cryostat. La réalisation des CRP a amené l'équipe à mettre en œuvre différents matériaux comme l'Invar et la fibre de verre, et à concevoir le système de découplage cryogénique qui permet d'assurer la planéité du système en conditions cryogéniques. Un système de fabrication de la grille d'extraction en fil inox de 0,1 mm de diamètre a également été construit et utilisé. Un travail collaboratif entre mécaniciens et automaticiens a été mené sur les douze cheminées de suspension et de positionnement des CRP pour assurer un mouvement vertical automatique synchronisé de suivi de hauteur du liquide, en conservant l'étanchéité du cryostat.



Photo ProtoDUNE :
Un module CRP sur sa structure de
construction et de transport.



Photo ProtoDUNE :
Une cheminée de suspension et
positionnement des CRPs.

Dans le cadre du projet STEREO, le LAPP a pris une part active dans la conception et la réalisation du détecteur qui est actuellement en phase de prise de données auprès du réacteur nucléaire de l'ILL à Grenoble. Entre 2013 et 2016 l'équipe du LAPP a notamment assuré la conception et le pré-dimensionnement des blindages plomb et polyéthylène, ainsi que du châssis mécano-soudé permettant de les maintenir en place. Les agents impliqués ont également assuré la conception, la réalisation et la maintenance du système de calibration automatisé permettant de faire circuler des sources radioactives à l'intérieur de ce détecteur dans un contexte associé à de très fortes contraintes d'encombrement. Ceci a nécessité l'utilisation de moteurs électriques de très petite taille. C'est également l'ingénieur automaticien qui a développé l'Interface Homme Machine pour son pilotage.

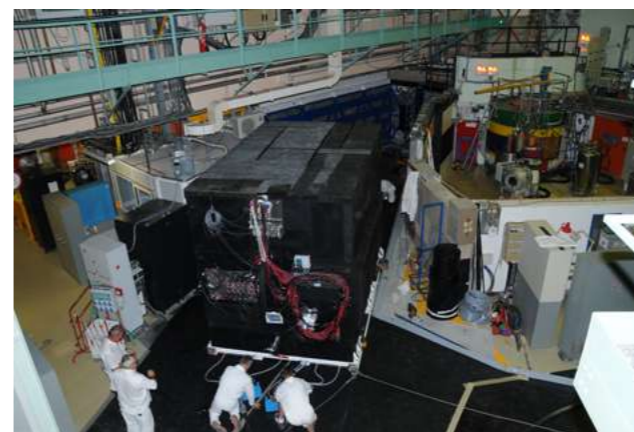


Photo STEREO :
Le détecteur Stereo en cours de déplacement

Dans le cadre du projet SuperNEMO, bientôt installé au LSM à Modane, une véritable percée dans le développement des feuilles source de Sélénium a été réalisée. Ces feuilles sources sont le cœur de l'expérience. Les innovations ont porté sur deux axes : l'amélioration du processus de préparation de la poudre de Sélénium par les équipes de Dubna en Russie et le développement d'une nouvelle méthode de fabrication des feuilles au LAPP, ayant nécessité plusieurs années de R&D. Le LAPP a développé une méthode de fabrication de feuilles originale et novatrice. Les feuilles sources sont composées essentiellement de Sélénium ^{82}Se , avec 10 % de colle PVA d'une épaisseur moyenne de $300\ \mu\text{m}$, le tout entouré d'un film de Mylar de $12\ \mu\text{m}$ d'épaisseur pour la tenue mécanique. Ces feuilles sont longues de 2,7 m, larges de 13,5 cm. Pour satisfaire les critères de l'expérience ces feuilles devaient être exemptes de toute impureté en terme de radioactivité. Pour cette raison la préparation s'est déroulée en salle blanche. Elles ont été installées dans le détecteur au LSM fin 2018.

Groupe automatisme

Le service mécanique a la particularité d'intégrer un groupe automatisme qui couvre deux



Photo SUPERNEMO :
36 feuilles sources installées au cœur de l'expérience SuperNEMO

aspects : l'automatisation de procédés (HESS, CTA, ProtoDUNE-DP et STEREO) et le contrôle de systèmes dynamiques (FLC).

Le groupe développe des lois de commandes linéaires et adaptatives dans le cadre de projets de R&D orientés mécatronique pour des systèmes dynamiques et plus particulièrement dédiées au contrôle vibratoire (Projet FLC). Il est ainsi amené à réaliser des études de robustesse et des adaptations de contrôleurs spécifiques au domaine fréquentiel. Il est également à même d'intégrer des contrôleurs et des modèles dynamiques dans des outils de simulation de faisceaux et de réaliser des tests sur des bancs de tests ou sur des expériences en fonctionnement. Le groupe a également développé un capteur de vibrations (brevet français FR 13 59336) pour répondre aux besoins du projet d'accélérateur linéaire CLIC.

Par ailleurs le groupe met en œuvre des systèmes automatisés à partir de spécifications définies par les utilisateurs finaux. Le groupe est également en charge de la partie électrotechnique des projets ; il réalise ainsi l'ensemble de l'étude électrique.

MOYENS ET INFRASTRUCTURES

L'Ingénierie Assistée par Ordinateur est implantée depuis longtemps au LAPP ; la majorité des concepteurs modélisent leurs systèmes à l'aide de CATIA et la plupart des projets gèrent leurs données CAO avec SmarTeam, ce qui permet de garantir l'intégrité et la traçabilité des données. C'est aussi un moyen puissant de travail collaboratif avec les autres laboratoires de l'IN2P3. Les simulations numériques dans le domaine de la mécanique et la thermique sont réalisées grâce aux logiciels ANSYS, SAMCEF et ABAQUS. L'outil ISIGHT nous offre la possibilité de gérer globalement les simulations et d'effectuer des optimisations grâce à ses interfaces avec de nombreuses applications de calcul.

Le groupe automatisme quant à lui réalise l'analyse fonctionnelle avec les outils classiques de l'automatisme (GEMMA, GRAFCET...). Cette étape permet ensuite d'implémenter la partie logicielle des automates et des communications inhérentes en utilisant les logiciels de programmation de chaque constructeur.

L'ensemble est généralement testé sur des bancs de tests au sein du laboratoire. De plus, pour la partie électrotechnique des projets les logiciels de CAO électrique sont utilisés.

Par ailleurs, le groupe développe des lois de commandes linéaires et adaptatives pour des systèmes dynamiques et il utilise des outils de calculs scientifiques (MATLAB) et des interfaces graphiques associées (SIMULINK) permettant la modélisation et le contrôle de systèmes dynamiques ainsi que de systèmes temps réel tels des centrales d'acquisition temps réel dédiées (National Instrument, DSpace).

Si les réalisations de grande ampleur sont confiées à l'industrie, nous disposons d'équipements nous permettant de réaliser des ensembles mécaniques de taille moyenne ou des prototypes. En plus de machines conventionnelles, nous sommes équipés d'un tour et d'un centre d'usinage à commande numérique. Nous avons de plus complété notre équipement en investissant dans des équipements de chaudronnerie (plieuse et poste de soudage TIG).

Nous sommes équipés de nombreux matériels de test et mesures : test ultrasons, binoculaire à caméra CCD, détecteur de fuites, chambre de cyclages thermiques, machine de traction, machine de contrôle géométrique 3D, bras de mesure 3D, système d'analyse dynamique (PULSE).

ACTIVITÉS TRANSVERSES

Actions Nationales et Internationales

Le service de mécanique participe également à des actions nationales (organisation d'écoles de calculs et d'écoles de mécatronique, direction du réseau calcul mécanique IN2P3, participation aux réseaux métiers). Ces collaborations permettent d'améliorer l'efficacité des pratiques et garantir un haut niveau de technicité.

Certains membres du service mécanique de par leurs compétences reconnues sont amenés à participer à des actions nationales en tant qu'experts dans des jurys de concours, ou internationales avec des responsabilités dans les collaborations, comme les revues techniques.

Enseignements

Des agents du groupe automatisme assurent des enseignements à l'IUT d'Annecy et plus

particulièrement au département Génie Electrique et Informatique Industrielle.

Analyse et contrôle vibratoire

Le groupe Accélérateurs réalise des expertises en analyse et contrôle de vibrations sur des sites d'expériences. Par exemple, le groupe est intervenu à plusieurs reprises sur le site de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) de Cadarache dans le cadre de l'installation d'une nouvelle ligne microfaisceau. De même, le groupe a réalisé une évaluation vibratoire d'une salle de l'IPHC de Strasbourg pour vérifier que celle-ci respectait les normes nécessaires à l'installation d'une nouvelle machine de soudure à haute précision (échelle micrométrique).

PERSPECTIVES

Les années à venir vont être marquées par l'évolution du système de CAO. En effet, le logiciel utilisé depuis plusieurs années, CATIA V5 avec SmarTeam, sera remplacé par la solution CATIA V6 avec ENOVIA. Utilisé par près de 80 % des personnes du service, cette évolution aura un impact important au sein du service mécanique.

Le service mécanique devra assurer ses engagements sur les projets techniques :

- Assurer les maintenances des équipements en opération (Virgo, CTA, HESS, LHCb, STEREO, ProtoDUNE-DP,...)
- Développer des compétences en terme de contrôle de systèmes dynamiques dans le cadre de FCC.
- Participer à la construction des trois télescopes de grande taille du réseau CTA et à leur motorisation
- Participer à la construction des 80 modules constituant le plan de détection de l'expérience ProtoDUNE-Double Phase
- Participer à la construction de nouveaux équipements pour Advanced VIRGO
- Participer à la construction du détecteur ITk d'ATLAS

COMMUNICATION

RÉSUMÉ

La communication est un levier majeur pour promouvoir l'image institutionnelle d'un laboratoire aussi bien auprès des tutelles que des autres laboratoires. Cela passe par une bonne identité visuelle, des supports de communication complets et modernes ou encore des événements officiels. Durant la période 2013-2018, le LAPP a recruté plusieurs chargées de communication et a ainsi pu développer cette d'activité.

ÉQUIPE DU LAPP

Correspondante communication
Edwige Tournefier

Chargées de communication
Delphine Pelloux, Alix Guillaume,
Mathilde Patoux (stage)

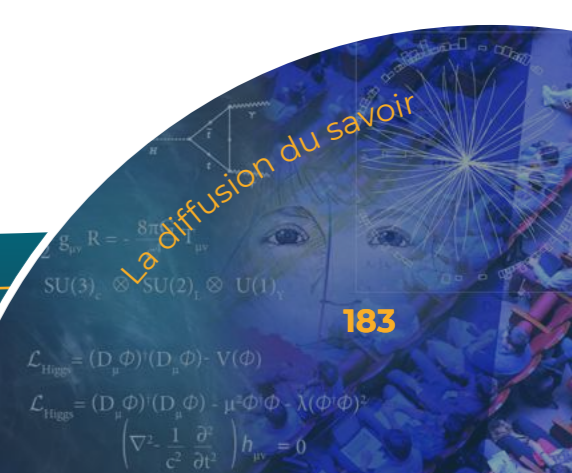
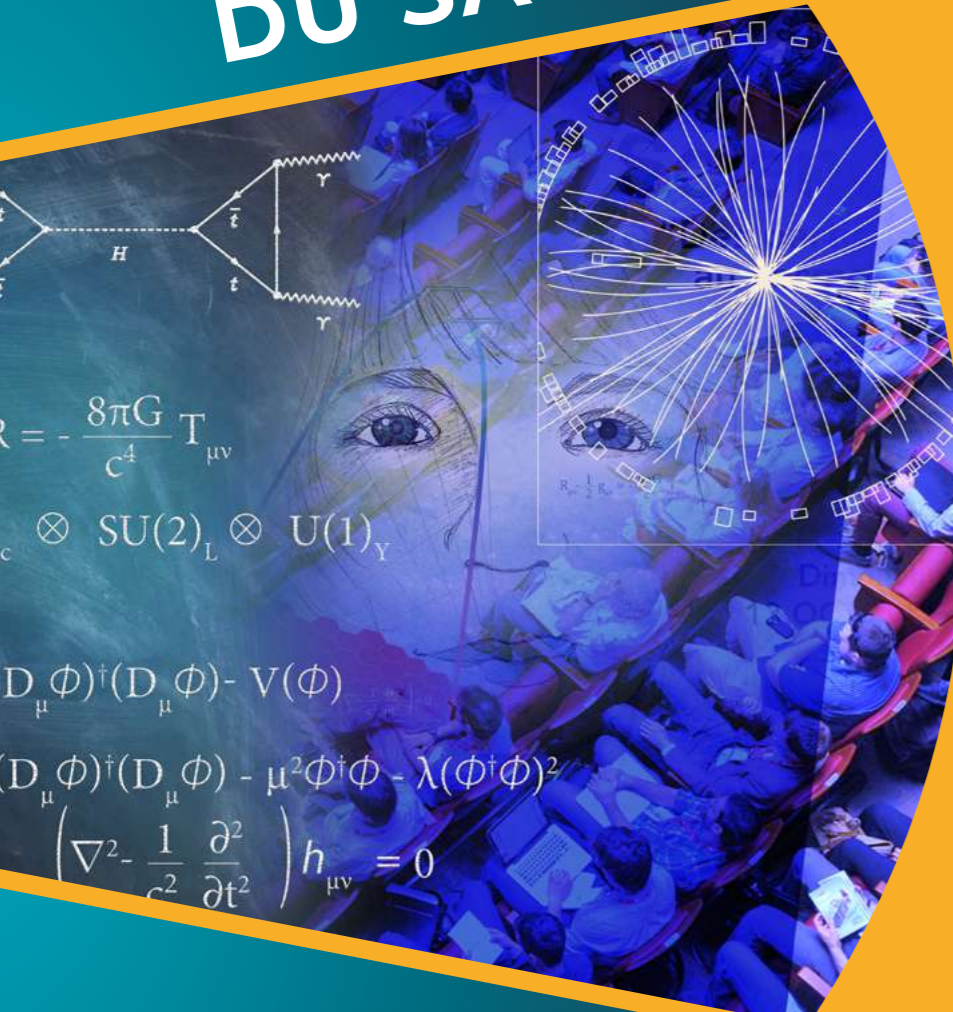
REFONTE DU SITE INTERNET DU LABORATOIRE

Le site internet du laboratoire vieux d'une dizaine d'années a été remplacé par un site plus moderne en 2016 (lapp.in2p3.fr). A cette occasion l'organisation du site a été revue et l'ensemble des pages ont été mises à jour. Le site du LAPP contient d'une part les pages tout public et d'autre part l'intranet du laboratoire. La migration a concerné ces deux éléments. La quasi-totalité des contenus a aussi été traduite en anglais. De nouvelles fonctionnalités ont ainsi pu être déployées, comme par exemple l'accès à tout l'historique des actualités.



Figure 1 : Site Web

LA DIFFUSION DU SAVOIR



REFONTE DE LA CHARTE GRAPHIQUE

En 2016, il a été décidé de donner un coup de neuf à l'image du laboratoire en mettant au goût du jour sa charte graphique et notamment son logo. Des couleurs et des typographies plus modernes et dynamiques ont été choisies, tout en préservant l'aspect institutionnel. Tous les modèles de documents dérivés (enveloppes, cartes de visite, diaporamas...) ont également été mis à jour.



Figure 2 : Plaquette LAPP

PLAQUETTE DU LAPP

En 2016, pour asseoir la nouvelle identité graphique du laboratoire et renouveler les supports de communication, une plaquette institutionnelle a été réalisée (<http://fr.calameo.com/read/0050290713cdab7e71458>). Elle présente l'historique du laboratoire et toutes ses activités de recherche, support à la recherche et de diffusion de la culture scientifique et technique. Elle est distribuée largement au public, aussi bien aux personnes en visite officielle qu'aux élèves en stage au laboratoire.

40 ANS DU LAPP

En 2016, le LAPP fêtait ses 40 ans. Pour l'occasion, un événement spécial a été organisé. Cette journée officielle a regroupé environ 250 invités du monde scientifique international ainsi que les partenaires du laboratoire et représentants des collectivités locales. Cette journée a été ponctuée de discours de plusieurs personnalités locales, de scientifiques et de représentants des tutelles du laboratoire, d'une visite du laboratoire et d'un cocktail. Afin d'immortaliser cet anniversaire, un logo du LAPP spécial « 40 ans » a été utilisé sur les supports de communication.

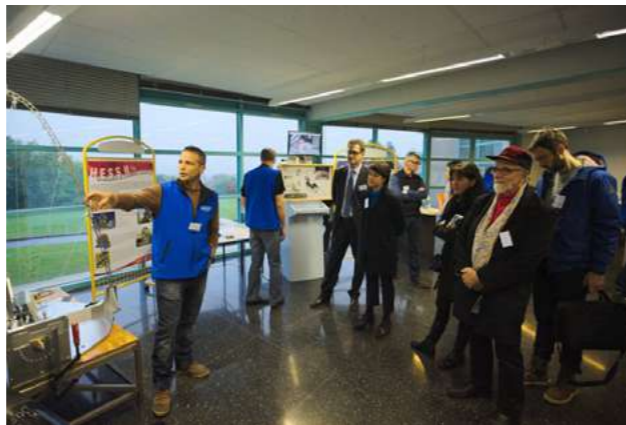


Image 3 : 40 ans du LAPP

VIDÉOS

En 2016, le LAPP fêtait ses 40 ans. Pour l'occasion, un événement spécial a été organisé. À l'occasion de la cérémonie des 40 ans du laboratoire une vidéo de présentation du laboratoire a aussi été créée sous forme d'un motion design. Cette vidéo (<https://www.youtube.com/embed/uPSXV4rAYPw>) présente les activités de recherche du laboratoire, ses compétences techniques et le présente dans le contexte local. Elle a aussi été traduite en anglais. Une vidéo sur le métier de technicien en mécanique a aussi été réalisée au LAPP par l'IN2P3. Les personnels de l'atelier mécanique du LAPP ont été acteurs de ce film de trois minutes.

SCIENCE & SOCIÉTÉ

ÉVÉNEMENTS

Fête de la science

Le LAPP ouvre traditionnellement ses portes une année sur deux lors de la Fête de la Science. Ces journées portes ouvertes sont organisées conjointement avec le LAPTh. Des classes de scolaires (de la primaire à la Terminale) sont accueillies pendant la semaine, à raison de deux ou trois classes par jour, et le grand public le samedi et le dimanche. La fréquentation est généralement autour du millier de visiteurs, sauf en 2016 lors des 40 ans du laboratoire où nous avons reçu 2500 visiteurs. Les scolaires sont reçus sur une demi-journée, un parcours sur trois ou quatre stands leur est proposé afin de leur faire découvrir le monde de la recherche (activités, métiers, démarche scientifique). Beaucoup de demandes de visites scolaires sont reçues et il n'est en général pas possible de toutes les satisfaire. Lors du week-end le public visite librement les stands où des chercheurs, enseignant-chercheurs, ingénieurs et techniciens présentent leurs activités et leur métier. Ces échanges sont très appréciés par le public. Quatre conférences d'une heure présentent également les différents thèmes de recherche du laboratoire tout au long du weekend. Lors des années impaires quelques actions ponctuelles sont proposées comme des interventions au village des sciences ou des conférences au laboratoire.

ÉQUIPE DU LAPP

Correspondante communication
Edwige Tournefier

Chargées de communication
Delphine Pelloux, Alix Guillaume,
Mathilde Patoux (stage)

**Organisation des stages de 3ème
et visites**
Myriam Froger



Image 1 : Fête de la science

Des évènements sont aussi organisés ponctuellement, par exemple à la suite de découvertes scientifiques, comme celle des ondes gravitationnelles. Le 20 mars 2017, à l'initiative du CNRS et de la Société française de physique, la nuit des ondes gravitationnelles fut organisée simultanément dans plusieurs villes de France et d'Italie. Grâce à des conférences scientifiques, des visites virtuelles de laboratoire et un quizz, le public et les scientifiques ont pu célébrer la découverte des ondes gravitationnelles annoncée en février 2016, 100 ans après leur prédiction par Albert Einstein. À Annecy, la soirée organisée par le LAPP a eu lieu à l'Imperial Palace. Elle a été animée par la troupe d'improvisation « les souffleurs aux Gradins » et complétée par une performance de l'artiste urbain Jordan Saget qui a créé une œuvre en direct. Environ 200 visiteurs ont été accueillis.

ÉCOLES D'ÉTÉ

Les chercheurs et enseignants-chercheurs du LAPP interviennent dans des écoles d'été à destination d'étudiants allant de la troisième année de licence au master mais aussi de doctorants et post-doctorants. Deux sont organisées au LAPP : l'école GRASPA dont le but est d'introduire la physique des particules et astroparticules aux étudiants de troisième année de licence et de première année de master et l'école ASTERICS-OBELICS dédiée au développement informatique pour les projets d'astrophysique et d'astroparticules. Chacune a lieu sur une semaine et regroupe entre 30 et 60 participants. Le LAPP participe aussi aux interventions données à l'école ESIPAP, à Archamps, à destination des doctorants et post-doctorants de physique des particules.



VISITES SCOLAIRES ET ACTIONS POUR LE GRAND PUBLIC

Le LAPP propose régulièrement des visites pour des scolaires et répond ponctuellement à des demandes de visites d'associations ou de partenaires.

Depuis 2012, le LAPP participe au programme de Masterclass internationales organisées par le CERN. Deux à trois classes de Première ou de Terminale S sont accueillies chaque année pour une journée au laboratoire. Après un aperçu de la recherche effectuée au LAPP et une visite du laboratoire, les élèves sont mis dans la peau d'un chercheur en analysant de vraies données enregistrées auprès du LHC. Ils peuvent ensuite échanger leurs résultats avec les autres classes ayant participé à la Masterclass à travers le monde. Ces journées sont parfois précédées par une présentation donnée en classe par un chercheur ou un enseignant-chercheur du laboratoire.

D'autres classes sont aussi accueillies, de la sixième, jusqu'au niveau de master 1, sur une demi-journée. Après un aperçu de la recherche au LAPP, les élèves ou étudiants visitent différents stands animés par des chercheurs ou des ingénieurs. Ces échanges sont très appréciés de nos visiteurs. Chaque visite est adaptée en fonction du niveau des classes accueillies. Des élèves de troisième sont accueillis pour trois jours au LAPP à l'occasion de leur stage d'observation. L'occasion pour eux de découvrir les différents services du laboratoire et de visiter les installations du CERN avec des chercheurs des équipes LHCb, ATLAS ou neutrinos.

Les chercheurs et enseignants-chercheurs répondent aussi à des demandes d'intervention dans les lycées et donnent des conférences grand public dans le cadre des « Amphis pour Tous » et du cycle de conférences de l'Université Populaire. Les conférences des Amphis pour Tous sont données sur trois sites différents (Chambéry, Annecy et Alberville/Archamps/Chamonix). Le personnel du LAPP anime occasionnellement des cafés scientifiques à Annecy ou dans des villes de la région. En particulier, depuis 2016, nous animons le festival Pint of Science, avec une participation plus importante en 2018 puisque cette année a marqué la première édition à Annecy. Ces interventions ont lieu dans des bars et ont pour but de faire découvrir la recherche au grand public dans un cadre détendu.

Des chercheurs du LAPP sont aussi guides officiels du CERN et participent aux événements pour le grand public : les journées portes ouvertes en 2013, les 60 ans du CERN en 2014 et la Nuit des chercheurs au CERN qui a lieu chaque année. Ils ont aussi participé à divers événements auxquels le CERN était invité : le Royaume du Web à Palexpo Genève, les Automnales de Genève en 2017 et la Nuit de la Science à Genève en 2018.

Les chercheurs et enseignants-chercheurs participent aussi à l'animation du festival Oufs d'Astro du planétarium de Vaulx en Velin en dialoguant avec le public au sein du planétarium.

D'autres actions vers le public sont réalisées ponctuellement : articles pour la presse écrite, grand public ou spécialisée (Dauphiné Libéré, Les Echos, Science et Avenir, Jitec, Reflets de la Physique, Journal du CNRS...), interview et émissions de radio ou de télévision (radios locales, France 3, France Inter).

La période 2015-2018 a été marquée par un accroissement de l'ensemble de ces activités suite aux découvertes des ondes gravitationnelles.

VISITES OFFICIELLES

Le LAPP reçoit aussi des visites officielles lors d'échanges avec les collectivités locales et les divers partenaires locaux.

Lors de ces visites les activités du LAPP sont présentées puis une visite du laboratoire d'environ une heure et demi est proposée. Nous avons reçu en particulier la visite du vice-président de la région Rhône Alpes Mr Neuder en 2015, de la députée Mme Duby-Muller en 2016, de la commission économie du Grand Annecy et de la Fondation USMB en 2018.

ESPACE DÉCOUVERTES ET PLATEFORME DE TRAVAUX PRATIQUES

Afin de répondre au nombre croissant de demandes de visites et de moderniser notre offre nous avons souhaité doter le laboratoire d'un espace dédié aux visiteurs, l'Espace Découvertes. Les stands proposés lors des visites sont installés de manière temporaire et largement basés sur des posters. Ce nouvel Espace Découvertes est quant à lui permanent mais modulable afin de pouvoir s'adapter aux évolutions du laboratoire. Il est basé sur des contenus multimédias pouvant facilement être mis à jour. Installé dans une salle de 200 m², il peut recevoir jusqu'à 40 personnes à la fois. Les visites sont uniquement guidées et le but est de favoriser les échanges entre le public et le personnel du laboratoire. Le projet a été lancé mi 2017. L'agence de scénographie ATAOUK a été recrutée pour mettre en œuvre ce projet. La conception et la réalisation ont eu lieu en 2018 afin de démarrer les premières utilisations en 2019.

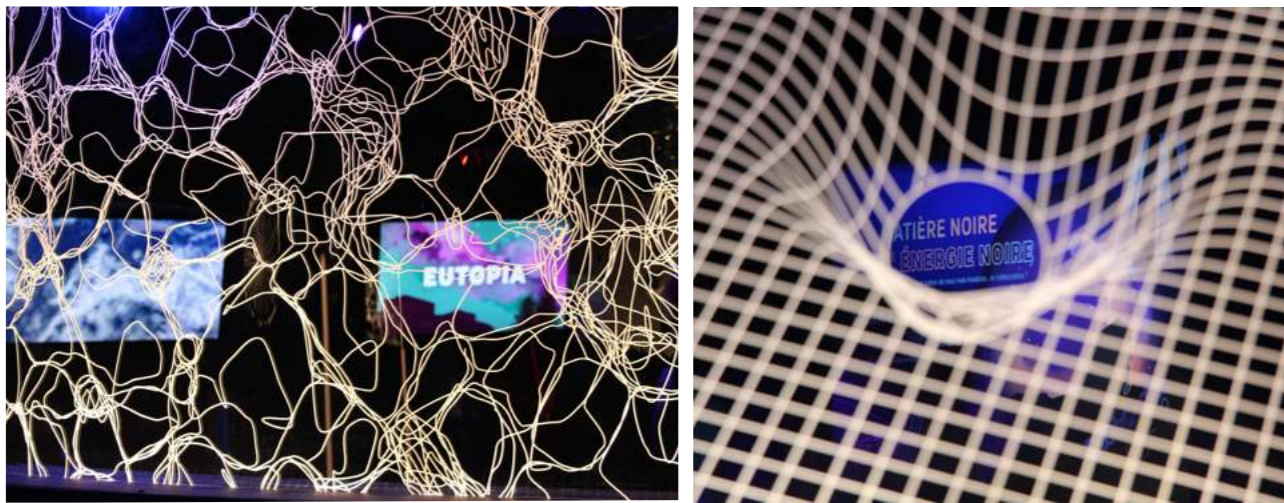
Pour compléter l'offre de visite, une salle de contrôle est par ailleurs en phase d'installation dans le bâtiment de la mécatronique hébergeant la salle de calcul et de stockage MUST. Cette salle de contrôle sera utilisée par les personnels des expériences telles que Virgo ou CTA afin de contrôler les expériences à distance et fera partie du parcours de visite.



Elle pourra aussi servir d'outil pour l'introduction à la visite de MUST.

Afin d'élargir son offre à destination des scolaires et universitaires le LAPP a démarré la mise en place d'une plateforme d'ateliers scientifiques (LAPP training platform, LAPP-TP). Les élèves et étudiants de différents cursus pourront découvrir la recherche scientifique avec des ateliers modulables et adaptés à leur niveau. Ce mode de fonctionnement permettra à chaque élève ou étudiant d'être acteur de son apprentissage, et de se trouver confronté aux vraies problématiques des métiers de la recherche. Deux ateliers sont en phase de mise en place pour un démarrage en 2019 avec les étudiants de licence de l'USMB et ceux de l'école d'été GRASPA : l'astronomie gamma, de l'observation aux résultats et la détection des ondes gravitationnelles par interférométrie.

L'ensemble de ce projet a été soutenu financièrement par le Grand Annecy, le département de Haute Savoie, la Région Auvergne Rhône Alpes, l'IDEX UGA, le LABEX ENIGMASS et l'USMB.



Photos 2 & 3 : Espace Découvertes

FEMMES EN SCIENCE

Conformément aux directives du CNRS, notamment via la mission pour la place des femmes au CNRS, le LAPP est impliqué dans la question de l'égalité professionnelle femme-homme avec notamment deux actions récentes : un article de sensibilisation sur le site internet du LAPP (<https://lapp.in2p3.fr/spip.php?article2479>) et l'organisation d'une réunion non mixte en interne pour discuter des discriminations liées au genre, dans l'espace public, le monde professionnel (en particulier académique) pouvant entraîner des inégalités de rémunération, d'avancement ou de recrutement.

VIE SCIENTIFIQUE

RÉSUMÉ

L'animation scientifique du laboratoire s'articule autour de plusieurs actions auxquelles tous les membres du laboratoire peuvent participer : des séminaires scientifiques et techniques, des réunions d'information internes, des journées de retraite et de prospective mais aussi des conférences internationales, des réunions de collaborations et des écoles thématiques. L'ensemble de ces événements permet à nos personnels de se retrouver ensemble, de faire le bilan, d'échanger des idées et de s'ouvrir à de nouveaux horizons.

ÉQUIPE DU LAPP

Séminaires

Isabelle DE BONIS Loïc ROLLAND,
Rémi LAFAYE, Julie PRAST

Journées du laboratoire

M. Froger, Julie Prast, E. Tournefier

SÉMINAIRES AU LAPP

Des séminaires de physique expérimentale sont organisés au LAPP les vendredis après-midi (liste en annexe) deux à trois fois par mois. Les sujets abordés par des chercheurs français et étrangers contribuent à la diffusion de l'information et à la discussion des derniers résultats importants en physique des particules et astroparticules et des avancées technologiques liées à ces domaines. Grâce à la participation des post-doctorants du LAPP et de chercheurs invités dans les groupes pour une période déterminée, les séminaires permettent aussi de suivre les activités de recherche en cours au laboratoire. Régulièrement, des séminaires traitant de sujets plus généraux connexes à notre discipline sont également organisés, souvent en partenariat avec d'autres laboratoires de l'USMB et de l'UGA.

RÉUNIONS DU JEUDI

Les réunions « du jeudi » sont des réunions internes au laboratoire et sont l'occasion d'échanger des informations d'intérêt général. Les doctorants y exposent l'état d'avancement de leurs recherches à la fin de leur première année de thèse, des informations sur le fonctionnement et la vie du laboratoire y sont échangées et discutées, et les nouveaux arrivants (stagiaires, visiteurs, doctorants, nouveaux entrants) sont présentés à l'ensemble du personnel. Ces réunions d'une durée d'une heure ont lieu une à deux fois par mois.

JOURNÉES DU LABORATOIRE ET DE PROSPECTIVES

Environ tous les quatre ans l'ensemble du personnel du laboratoire se réunit pendant trois journées en dehors du laboratoire. Ces journées constituent un lieu de discussions et d'échanges sous forme conviviale entre les divers acteurs de la vie du laboratoire : physiciens, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs. Par des présentations synthétiques et vulgarisatrices, les orateurs partagent avec tous les membres du laboratoire les projets de leurs groupes et services. C'est donc également une occasion unique pour chacun, et particulièrement les plus jeunes d'entre nous et les nouveaux collaborateurs, de s'insérer dans la vie du laboratoire en

apprenant à connaître les activités de leurs collègues et de se faire connaître en présentant leurs propres activités. Ces journées nous permettent de mieux nous connaître et contribuent à la cohésion du laboratoire. Les dernières journées du laboratoire ont eu lieu du 23 au 25 octobre 2015 à Aussois.

Des journées de prospective sont aussi régulièrement organisées à destination des chercheurs et ingénieurs. Elles ont pour but de discuter des orientations et activités futures du laboratoire. Les dernières journées de prospective ont eu lieu le 3 octobre 2013 à la Fondation Mérieux (Veyrier du Lac) et le 4 mai 2018 au LAPP. Cette dernière a, en particulier, été l'occasion de discuter du renouvellement du LABEX ENIGMASS sur la période 2020-2025.

Les cérémonies de remises de médailles (voir chapitre Prix et Distinctions) sont aussi l'occasion d'échanges et de retours sur les carrières des personnels du laboratoire.



Photo 1 : Journées du laboratoire 2015 à Aussois

RÉUNIONS DE COLLABORATION, ÉCOLES ET ATELIERS DE TRAVAIL

Le laboratoire organise et accueille des écoles thématiques, réunions de collaboration et ateliers de travail. La plupart de ces réunions réunissent entre 60 et 100 participants et sont hébergées au LAPP. Certaines, d'une plus grande ampleur, comme la conférence GWPAW (sur les ondes gravitationnelles) sont organisées dans des centres de congrès d'Annecy. Le LAPP accueille environ quatre événements de ce type par an. Ces événements sont aussi l'occasion de faire découvrir notre laboratoire et notre région à nos collaborateurs.



Advanced software programming for astrophysics and astroparticle physics.

3-8 juin 2018, 61 participants
Organisateur LAPP : Jayesh WAGH

3rd workshop on LHCb upgrade II

21-23 mars 2018, 80 participants
Organisateur LAPP : Stéphane T'JAMPENS

Statistical methods for particle physics

5-7 février 2018, 15 participants
Organisateur LAPP : Nicolas BERGER

HSF Workshop

26-30 juin 2017, 90 participants
Organisateur LAPP : Frédérique CHOLLET

Advanced software programming for astrophysics and astroparticle physics.

6-9 juin 2017, 79 participants
Organisateur LAPP : Jayesh WAGH

Gravitationnal Waves Physics and Astronomy Workshop

30 mai-2 juin 2017, 115 participants
Organisateur LAPP : Frédérique MARION

WIMS outil de pédagogies innovantes

27-29 juin 2016, 103 participants
Organisateur LAPP : Damir BUSKULIC

SuperNEMO collaboration meeting

8-10 juin 2016, 55 participants
Organisateur LAPP : Dominique DUCHESNEAU

ATLAS-SM Workshop

2-5 février 2015, 100 participants
Organisateur LAPP : Lucia DI CIACCIO

CTA-LST General meeting

2-5 février 2015
Organisateur LAPP : Giovanni LAMANNA

FJPL-ATF2 Workshop

24-26 février 2015, 25 participants
Organisateur LAPP : Andrea JEREMIE

ATLAS e/gamma Workshop

9-13 novembre 2015
Organisateur LAPP :

ATF2 Workshop

17-18 mars 2014, 11 participants
Organisateur LAPP : Andrea JEREMIE

HEPiX Spring 2014

19-23 mai 2014, 102 participants
Organisateur LAPP : Frédérique CHOLLET

STEREO meeting

10-12 septembre 2014,
Organisateur LAPP : Pablo DEL AMO SANCHEZ

Workshop HIGGS

27-29 novembre 2013
Organisateur LAPP : Stéphane JÉZEQUEL

GDR Terascale

28-30 octobre 2013, 71 participants
Organisateur LAPP : Rémi LAFAYE

45 ème école de Gif

16-20 septembre 2013, 43 participants
Organisateur LAPP : Giovanni LAMANNA

CALICE collaboration meeting

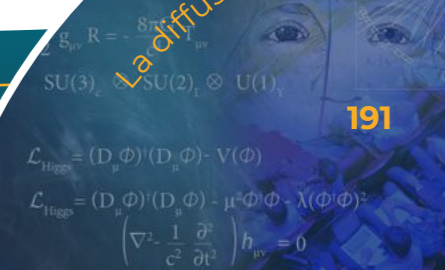
9-11 septembre 2013, 73 participants
Organisateur LAPP : Yannis KARYOTAKIS

Rencontres LHC France 2013

2-6 avril 2013, 190 participants
Organisateur LAPP : Emmanuel SAUVAN et Stéphane T'JAMPENS

9th Franco-Italian meeting on B physics

18-19 février 2013, 35 participants
Organisateur LAPP : Marie-Noëlle MINARD



ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

RÉSUMÉ

Le LAPP est une unité mixte de recherche CNRS-Université Savoie Mont Blanc (USMB) depuis 1995.

Les enseignants-chercheurs, les chercheurs et les ingénieurs du LAPP sont fortement impliqués dans l'enseignement de cours universitaires, l'encadrement de stages et de thèses et dans les instances universitaires. Le personnel du laboratoire contribue ainsi à la formation des futurs chercheurs et ingénieurs, et affirme sa volonté de partager son savoir-faire et de faire découvrir les différents métiers de la recherche.

PRÉSENCE DU LAPP DANS L'UNIVERSITÉ

Le LAPP est rattaché à l'unité de formation et de recherche (UFR) Sciences et montagne (SCEM), née en 2016 du regroupement de l'UFR Sciences fondamentales et appliquées (SFA) et du Centre interdisciplinaire scientifique de la montagne. De janvier 2003 à 2016, le LAPP a été rattaché à l'UFR SFA.

En 2018, dix enseignants chercheurs en poste à l'USMB ont effectué leurs recherches au LAPP. Ce nombre a baissé d'une unité par rapport au dernier rapport d'activité (2009-2012) : il comprend quatre professeurs et six maîtres de conférences. Trois enseignants-chercheurs sont rattachés à l'UFR SCEM sur le campus du Bourget du Lac, cinq à l'Institut universitaire technologique (IUT) d'Annecy-le-Vieux et deux à l'École d'ingénieurs Polytech'Annecy-Chambéry. En 2018 douze chercheurs, ingénieurs et techniciens CNRS et une dizaine de doctorants ont également participé aux enseignements.

Le LAPP a des représentants au conseil académique, à la commission de la recherche de ce conseil, au conseil d'administration de l'université, au conseil de l'UFR SCEM, au Conseil de l'école doctorale de physique de

Grenoble Alpes et à la Commission doctorale de l'Université Savoie Mont Blanc (CODUSMB). Un enseignant-chercheur du LAPP exerce la responsabilité de vice-président du conseil scientifique de l'université.

Des enseignants-chercheurs et quelques chercheurs du LAPP sont fortement impliqués dans les instances universitaires comme membres du conseil national universitaire, membres/président de comités consultatifs et de comités de sélection. Des enseignants-chercheurs du LAPP assurent la tâche très chronophage de responsable pédagogique de filières d'enseignement.

ÉQUIPE DU LAPP

Professeurs

UFR SFA

D. Buskalic,

IUT d'Annecy-le-Vieux

R. Kossakowski, Y. Zolnierowski

Polytech'Annecy-Chambéry (Annecy)

L. Di Ciaccio

Maîtres de Conférences

UFR SFA

P. Del Amo Sanchez, G. Maurin

IUT d'Annecy-le-Vieux

I. De Bonis, I. Koletsou,

A. Dominjon (depuis 2017)

Polytech'Annecy-Chambéry (Annecy)

C. Adloff

Doctorants avec service d'enseignement

A. Burger, M. Eisenmann, D. Estevez,

F. Gillardo, L. Labit, L. Portales,

T. Vuillaume

L'enseignement

Au total, ce sont environ 2 000 heures d'enseignement par an qui sont dispensées chaque année en licence et master à l'IUT et à Polytech'Annecy-Chambéry par les enseignants-chercheurs du LAPP, auxquelles s'ajoutent quelque 900 heures assurées par le personnel CNRS et les doctorants.

Niveau Licence

Les enseignants-chercheurs du LAPP participent aux enseignements des trois années du niveau licence du secteur science, technologies et santé de l'UFR SCEM : licences de physique, de mathématiques, physique et chimie, informatique, sciences et technologies.

Ils participent également aux enseignements dès les première et deuxième années du Parcours des écoles d'ingénieurs Polytech (PeiP), de la troisième année de l'école d'ingénieurs Polytech'Annecy-Chambéry et aux enseignements de mathématiques, physique, électronique, informatique et réseaux dans les départements Mesures physiques et Génie électrique & Informatique industrielle à l'IUT d'Annecy.

Niveau Master

Sur le site du Bourget du Lac, les enseignants-chercheurs du LAPP assurent les enseignements de physique du master Métiers de l'enseignement (MEEF) dans le parcours Sciences physiques chimie.

En ce qui concerne la deuxième année de master, les enseignants-chercheurs du LAPP ont participé jusqu'en 2015 aux enseignements de la spécialité du master recherche Sciences de la matière intitulé « Champs, particules, matière condensée » en convention avec l'École normale supérieure de Lyon et l'Université Lyon 1. Un enseignant-chercheur du LAPP a aussi contribué en 2014-2015 aux enseignements de master 2 « Informatique haute performance et simulation » de l'Université Versailles Saint Quentin-en-Yvelines.

L'université est co-habituée avec la Communauté universitaire de Grenoble Alpes pour la spécialité du master recherche Physique intitulé « Physique subatomique et cosmologie ». Les enseignants-chercheurs du LAPP contribuent

significativement aux enseignements de cette spécialité de master.

Par ailleurs, deux enseignants-chercheurs du LAPP dispensent des enseignements dans la quatrième et la cinquième année des filières « Instrumentation, automatique, informatique » et « Mécanique et matériaux » de Polytech'Annecy-Chambéry et plusieurs ingénieurs et techniciens assurent des cours dans les autres filières d'ingénieurs de Polytech'Annecy-Chambéry.

Enseignements pré et post-doctoraux

Des enseignants-chercheurs du LAPP sont engagés dans des enseignements ponctuels à l'École doctorale de Grenoble et dans plusieurs enseignements d'écoles internationales d'été ou de spécialisation :

- l'école d'été GRASPA de la durée d'une semaine organisée chaque année au LAPP à destination d'étudiants de la troisième année de licence et de la première année de master. Les disciplines couvertes par l'école sont la physique des particules et l'astrophysique ;
- l'école ESIPAP, une école annuelle de spécialisation en Instrumentation de la durée de deux mois de niveaux master 2, doctoral et post-doctoral ;
- l'école ASTERIX-OBELIX, une école de spécialisation d'environ une semaine organisée chaque année au LAPP dédiée au développement de projets de programmation avancée pour l'astrophysique et l'astroparticule, de niveaux master 2, doctoral et post-doctoral.

La formation par la recherche

Le LAPP attache une grande importance à la formation par et pour la recherche et à la diffusion des connaissances. En plus de l'accueil de doctorants préparant leur thèse au laboratoire, les équipes et les services du LAPP accueillent de nombreux stagiaires qui découvrent au LAPP des méthodes de travail, des compétences, en plus de l'intérêt de la recherche fondamentale. Ceci explique la forte demande de stages au LAPP chaque année.

Les stages

Le LAPP reçoit un grand nombre de stagiaires de tous niveaux, DUT, licence, master, école d'ingénieurs. Entre 2013 et 2018, le LAPP a accueilli en moyenne par an, quatre étudiants d'IUT, un étudiant ingénieur, trois étudiants de troisième année de licence, trois étudiants de master 1, quatre étudiants de master 2 pour une durée cumulée de 43 mois de travail de stage par an. En les encadrant, les personnels du laboratoire accomplissent la mission de faire découvrir les différents métiers de la recherche et de partager leur savoir-faire pour contribuer à la formation de ces jeunes.

Les stages techniques, concernant les étudiants de DUT, d'écoles d'ingénieurs, de master 2 professionnalisant, se déroulent au sein des équipes de recherche ou des services techniques. Tous les corps de métiers (mécanique, électronique, informatique) sont représentés. Les stages d'ingénieurs, plus longs, peuvent être l'occasion d'aboutir à des réalisations intéressantes et complètes qui seront, pour ces étudiants, une référence.

Les stages encadrés au laboratoire, effectués en master 2 avec un profil recherche, sont l'occasion de découvrir et de s'initier au métier de chercheur, une découverte approfondie par la suite au cours de la thèse. Une grande partie de ces stagiaires de master 2 poursuit une thèse au laboratoire.

Les thèses

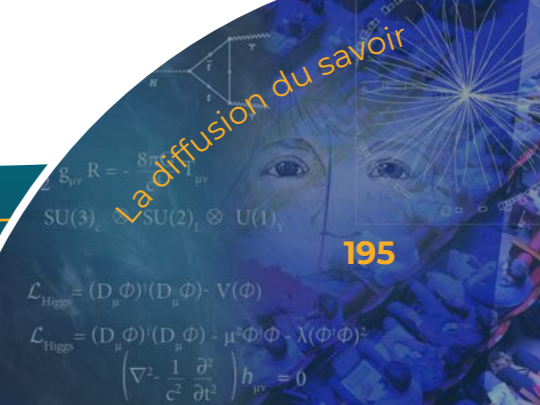
Le nombre d'étudiants accueillis en thèse au LAPP par an a légèrement augmenté par rapport au dernier rapport d'activité et a oscillé entre quatre et huit doctorants par an en incluant les thèses en cotutelle. En particulier, le nombre de thèses démarrées au LAPP durant la période que recouvre ce rapport a été de quatre en 2013, 2014 et 2015, sept en 2016 (dont une thèse en cotutelle), six en 2017 (dont une thèse en cotutelle) et cinq en 2018.

Leur liste est donnée en annexe. La durée moyenne des thèses au LAPP est de 36 mois. Durant leurs années de thèse, des chercheurs du LAPP parrainent les doctorants, veillant au bon déroulement de leur thèse.

Depuis septembre 2010, le LAPP est attaché à l'école doctorale de physique de Grenoble, ED 47. Un membre du LAPP siège à son conseil et à son bureau. Cette école doctorale qui fait partie du collège doctoral de l'Université de Savoie Mont Blanc (CODUSMB) est une des quatorze écoles doctorales de la Communauté université Grenoble Alpes (auparavant et jusqu'en 2014 une des treize écoles doctorales du PRES « Université de Grenoble ») dans lesquelles se déroulent les études doctorales à l'USMB. Un membre du LAPP siège au CODUSMB.

Les étudiants effectuant leur thèse au LAPP sont originaires de divers master français mais aussi étrangers. L'USMB alloue chaque année à l'école doctorale de physique trois contrats doctoraux, partagés entre les laboratoires LAPP et LAPTh. La possibilité de bénéficier également d'autres sources de financement (Labex ENIGMASS, cofinancements IN2P3 – EGO ou conseil Savoie Mont Blanc ou par des cotutelles) est d'importance capitale pour la vie scientifique du laboratoire.

Enfin, dix habilitations à diriger des recherches ont été soutenues au LAPP entre 2013 et 2017. Leur liste est donnée en annexe. Sur les 44 chercheurs et enseignants-chercheurs du LAPP, 32 sont habilités à diriger les recherches (HDR).



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2013 - 2018

Directeur de la publication

Giovanni Lamanna

Équipe éditoriale

Claudine Bombar
Caroline Depecker
Alix Guillaume
Mathilde Hubert
Caroline Marchand
Edwige Tournefier

Conception graphique

Léna Creton
pavoniacom.com

Crédits photos

©LAPP/CERN/NASA