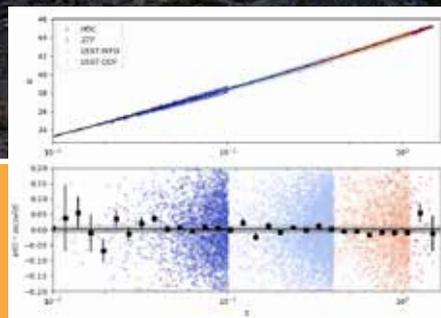
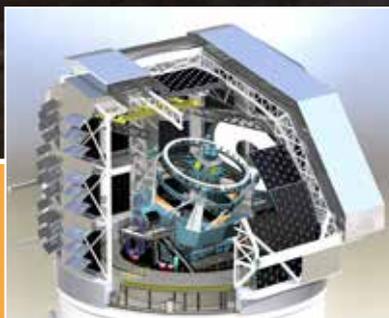


RAPPORT D'ACTIVITÉ

2017
2019

LPNHE
PARIS

Laboratoire de
Physique Nucléaire et
de Hautes Énergies



RAPPORT D'ACTIVITÉ LPNHE

2017 • 2019

AVANT-PROPOS

Le LPNHE explore la physique des deux infinis, de l'infiniment grand (cosmologie, astroparticules) à l'infiniment petit (physique des particules élémentaires, symétries fondamentales). Nos recherches sont fondées sur de grandes interrogations fondamentales : quels sont les constituants ultimes de la matière ? De quoi est fait l'Univers et quelles sont son histoire et son évolution depuis le Big Bang ? Bien d'autres questions sont liées à celles-ci, comme la nature du boson de Higgs découvert en 2012 au CERN avec une forte participation des équipes du laboratoire, l'explication de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers, les propriétés des neutrinos... Récemment, le laboratoire a développé de nouveaux domaines de recherche, qui portent sur la matière noire et l'énergie noire. Ces recherches s'appuient sur des instruments de pointe, développés au laboratoire grâce à nos compétences dans la photométrie, les capteurs silicium, la mécatronique et bien d'autres. Bénéficiant d'une solide ferme de calcul, nos équipes sont spécialisées dans l'analyse des *big data*, ces grandes bases de données qu'elles passent au crible fin à l'aide des technologies les plus avancées de l'intelligence artificielle et notamment du *deep learning*.

En 2020, le LPNHE, laboratoire de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (CNRS-IN2P3), de Sorbonne Université et de l'Université de Paris¹, compte 50 chercheur.euse.s et enseignant.e.s-chercheur.euse.s permanent.e.s, et 39 doctorant.e.s, post-doctorant.e.s, chercheur.euse.s émérites et bénévoles. L'équipe technique est forte de 45 personnes et est structurée en services techniques et administratif. Seul laboratoire parisien de physique expérimentale des hautes énergies, il est un acteur important dans le rayonnement de la discipline dans un contexte scientifique et culturel d'exception. Sa situation au cœur de Paris et son amphithéâtre de recherche Georges Charpak en font aussi un centre idéal de rencontres scientifiques de haut niveau.

Le LPNHE a tissé des liens étroits avec d'autres laboratoires de Sorbonne Université, notamment grâce au Labex Institut Lagrange de Paris et à la Fédération de Recherche sur les Interactions Fondamentales. Cela a permis des collaborations fructueuses avec en particulier les laboratoires théoriques de l'ENS et du LPTHE, ainsi qu'avec l'IAP et l'Observatoire de Paris. Ces liens se renforcent aujourd'hui avec l'Initiative « Physique des Infinis » lancée par Sorbonne Université, et par les débuts prometteurs d'une fédération de recherche avec deux autres laboratoires de l'IN2P3 : le LLR, sur le campus de l'École Polytechnique, et l'APC, sur le campus de l'Université de Paris. Il faut souligner que les activités scientifiques et techniques du laboratoire s'inscrivent dans de grandes collaborations internationales avec les plus importants centres scientifiques en Europe (notamment le CERN), en Asie et aux États-Unis, et sont renforcées entre autres par les collaborations au sein des Laboratoires Internationaux Associés avec la Chine (FCPPL) et le Japon (FJPPL-TYL), le Centre Pierre Binetruy à Berkeley (États-Unis) et à travers les accords de l'IN2P3 avec le consortium COPIN avec la Pologne.

Sans doute la réalisation la plus marquante de ces trois dernières années est le changeur de filtre de la caméra LSST de l'Observatoire Vera Rubin. Destiné à effectuer un relevé du ciel profond qui pourrait révolutionner notre connaissance de l'Univers, ce dispositif sera crucial pour le fonctionnement de la plus grande caméra CCD jamais réalisée (3,2 milliards de pixels). Sa conception et sa construction ont mobilisé un grand nombre des compétences et des ressources du service mécanique. Après son intégration dans l'atelier de montage, le système a été envoyé à SLAC (États-Unis) avant son exploitation au Chili en 2022. Un système de calibration photométrique de grande précision, appelé StarDICE, est en préparation pour exploiter pleinement les données de LSST. En parallèle, l'équipe a aussi contribué, par la conception et la réalisation de son système de calibration, à DESI, spectrographe qui produira un autre grand relevé de cosmologie, largement complémentaire de celui de LSST. DESI a été mis en fonctionnement au début de 2020 et a déjà

1- L'Université de Paris est le résultat de la fusion des universités Paris-Diderot et Paris-Descartes. Elle existe depuis janvier 2020. Précédemment, c'était l'Université Paris-Diderot qui était tutelle du LPNHE.

produit son premier spectre de galaxie. Grâce à ces deux instruments exceptionnels, une formidable moisson de données sera disponible dans les prochaines années pour avancer dans notre compréhension de l'univers et l'équipe du laboratoire est déjà en première ligne pour cette nouvelle phase de mesures.

Le laboratoire a toujours été très actif dans l'étude des rayons cosmiques, ces particules, à l'origine encore largement inconnue, qui bombardent l'atmosphère terrestre et atteignent des énergies hors de portée pour nos accélérateurs. Après une série d'importantes découvertes astrophysiques (notamment la découverte de l'émission de photons de très haute énergie par les sursauts gamma) avec H.E.S.S., un télescope pour l'astronomie gamma situé en Namibie, une grande collaboration internationale s'attelle à la construction de CTA, qui prendra la relève à partir de 2022, avec un site dans chaque hémisphère. Ce programme explore la production et l'accélération de particules très énergétiques dans de véritables cataclysmes astrophysiques, tels la fin de vie des étoiles massives ou les trous noirs supermassifs au centre des galaxies. Le laboratoire coordonne pour l'IN2P3 la construction de l'électronique des caméras de CTA pour les télescopes de taille moyenne. En perspective, sur la base d'une proposition émanant d'un des membres de cette équipe, le laboratoire continue la préparation de GRAND, un projet ambitieux pour explorer les neutrinos de très haute énergie en provenance du cosmos, par un grand réseau d'antennes radio.

Récemment, un nouvel axe de recherche a été ouvert, portant sur les recherches de matière noire, une mystérieuse composante de l'univers, interagissant très faiblement avec la matière dont nous sommes composés. L'expérience DAMIC-M construit un détecteur d'un kilogramme de silicium, sous la forme de CCD, spécialisé dans la recherche de particules de matière noire de faible masse. Le détecteur sera basé au Laboratoire Souterrain de Modane. L'équipe a récemment obtenu une précision record dans la mesure de l'énergie déposée dans le détecteur. A plus haute masse, XENON et DarkSide construisent et exploitent de très grands détecteurs souterrains au Gran Sasso (Italie), constitués de xénon ou argon liquides, et pouvant atteindre plusieurs tonnes de masse fiducielle. Dans les prochaines années, ces expériences seront en mesure de découvrir, ou d'exclure, l'existence de particules de matière noire dans une très grande plage de masses et de sections efficaces d'interaction avec la matière.

L'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers est une énigme que l'on cherche à expliquer en étudiant de subtiles différences présentes au niveau des particules élémentaires. L'expérience LHCb, au CERN, étudie les désintégrations des particules contenant un quark de type b. Si elle a fourni des mesures de très haute précision permettant d'établir un cadre d'ensemble très complet, elle a aussi mis en évidence des anomalies qui demandent à être expliquées. Pour ce faire, elle est confrontée au défi de sélectionner quelques particules intéressantes au milieu d'un grand nombre d'autres interactions. L'équipe du laboratoire est active dans une jouvence du détecteur qui permettra d'en améliorer les performances. A plus long terme, elle a développé un système informatique à l'architecture hybride, basée sur une ferme de GPU et sur des algorithmes d'intelligence artificielle, qui permet d'analyser puis sélectionner les événements avec des méthodes innovantes. La forte augmentation du taux et du volume des données permettra de fournir une réponse à certaines questions dans le domaine, et fournira peut-être des découvertes inattendues.

En parallèle, l'équipe a joué un rôle moteur dans la conception d'une expérience destinée à explorer un hypothétique secteur caché, peut-être lié à l'existence de la matière noire. Il s'agit de l'expérience CODEX-B, qui explorera les éventuelles désintégrations de particules à longue durée de vie produites lors des collisions proton-proton. Cet axe de recherche représente la poursuite des études initiées au laboratoire dans le cadre du projet SHIP. Le LPNHE participe aussi à une expérience en préparation au Japon, COMET, qui recherche la conversion en électrons des muons d'un faisceau très intense, ce qui signifierait la non-conservation du nombre leptonique.

L'équipe neutrino a continué avec succès son étude des oscillations des neutrinos avec l'expérience T2K. L'analyse des données enregistrées jusqu'en 2018 a permis de mettre des contraintes fortes sur les paramètres d'oscillation, notamment la phase delta de violation de la symétrie Charge-Parité. L'équipe prépare une jouvence majeure du détecteur proche : des détecteurs innovants et très performants, actuellement en construction, vont être déployés au Japon en 2021 pour fournir une image plus complète et précise des interactions des neutrinos. L'approbation au Japon de Hyper-Kamiokande, un projet de grande envergure et avec un très fort potentiel scientifique, ouvre de belles perspectives pour ces études. Il s'agit d'une très grande cuve d'eau ultra-pure, d'une masse cinq fois plus importante que le détecteur actuel Super-Kamiokande. Une R&D sur la synchronisation d'horloge est en cours, qui pourrait être utilisée pour l'électronique frontale de Hyper-Kamiokande. Cette expérience sera aussi un formidable télescope ouvert sur les neutrinos du cosmos, notamment ceux produits par certaines supernovae, et permettra d'étendre considérablement les activités de l'équipe.

L'expérience ATLAS, au LHC du CERN, est à l'avant-garde de l'exploration de la frontière de la haute énergie. Grâce à la découverte du boson de Higgs, le tableau du modèle standard de la physique des particules est désormais complet, mais de nombreuses interrogations demeurent. Est-ce que le boson de Higgs est une particule élémentaire ou composite ? Ses interactions suivent-elles les prédictions théoriques ou laissent-elles entrevoir de nouveaux phénomènes ? Les mesures en cours, menées notamment par les équipes du LPNHE, continuent d'affiner notre connaissance du boson de Higgs et des interactions des particules du modèle standard. Une jouvence majeure du détecteur est en cours, pour le préparer à une nouvelle phase de haute luminosité du LHC, qui devrait s'étendre jusqu'à la fin des années 2030. Un nouveau détecteur de vertex appelé ITk est en construction, avec une participation importante du laboratoire, notamment dans la caractérisation des capteurs silicium CMOS, et leur intégration par des méthodes de *wire-bonding*. C'est un projet majeur pour le laboratoire en termes de mise en œuvre des connaissances scientifiques et techniques et d'implication des ressources humaines. Le groupe participe à un autre projet, HGTD, qui vise l'amélioration des performances du détecteur grâce à une mesure de temps, notamment en permettant de rejeter les particules provenant d'interactions parasites. La réussite de ces deux projets permettra aux étudiant.e.s, aux post-doctorant.e.s et aux jeunes chercheur.euse.s de se former aux techniques instrumentales les plus performantes et constituera une forte contribution à une expérience ainsi renouvelée.

En parallèle, l'équipe a continué à s'intéresser aux futurs collisionneurs. La poursuite de la R&D CALICE pour des calorimètres de haute technologie est désormais accompagnée par des études sur le potentiel de physique du projet de futur collisionneur du CERN « Future Circular Collider » (FCC) qui devrait atteindre les 100 km de longueur et se situer à la frontière franco-suisse. FCC pourrait avoir une première étape de physique de précision avant de poursuivre l'exploration du domaine des hautes énergies, un ordre de grandeur au-delà de l'énergie de LHC.

Dans un contexte de recherche française en forte évolution, le laboratoire a su garder une grande attractivité. Les preuves en sont le grand nombre de stagiaires, d'étudiant.e.s et de visiteur.euse.s (dont un prix Nobel !), accueilli.e.s chaque année, le nombre, la diversité et l'excellence des projets scientifiques et techniques, les résultats obtenus, mais aussi la forte implication des enseignant.e.s-chercheur.euse.s dans le tissu universitaire à tous les niveaux, des licences aux masters et à l'école doctorale.

Je remercie chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire pour ces succès et en particulier tous ceux/elles qui ont participé à la rédaction de ce rapport d'activité. Une mention spéciale est à décerner à Mélissa Ridel qui a animé l'équipe de rédaction et a assuré la qualité de ce rapport. Merci enfin à Jean-Jacques Daigremont pour la mise en page claire et efficace.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 3

FAITS MARQUANTS..... 8

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES
ET TECHNIQUES 11

Cosmologie et énergie noire 12

Rayonnements cosmiques
et matière noire 24

Asymétrie matière-antimatière 42

Masses et interactions fondamentales .. 54

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS
ET RESPONSABILITÉS 72

ENSEIGNEMENTS ET FORMATION
PAR LA RECHERCHE 80

L'enseignement supérieur et le LPNHE .. 81

Responsabilités dans les instances
universitaires 84

Les thèses au LPNHE 86

Liste des thèses et des habilitations
à diriger des recherches soutenues
au LPNHE 88

Les stages au LPNHE 90

Action pédagogique spécifique :
Ikigai, le jeu au service de la pédagogie
dans le supérieur et de la médiation
scientifique et culturelle 92

ORGANISATION DU LABORATOIRE 94

Services techniques 95

Plateaux techniques 102

Supports 106

Organigramme 115

Personnels au laboratoire
au 31/12/2019 116

VIE DU LABORATOIRE 118

Partenariats scientifiques 119

Animation scientifique 121

Communication et partage
des connaissances 126

Activités d'intérêt général CNRS 128

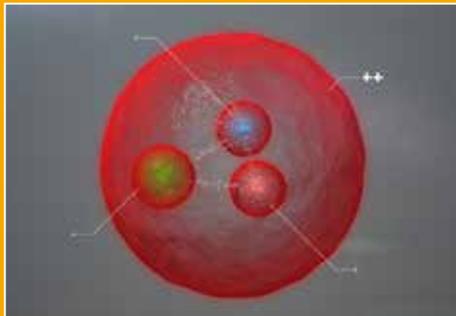
La formation permanente 128

INDEX DES ACRONYMES 130

2017

JUILLET

- LHCb : une nouvelle particule découverte, le Ξ_{cc}^{++} de la famille des baryons !



- LSST : le prototype du changeur de filtres, l'un des éléments essentiels de la caméra auquel le LPNHE contribue, a passé avec succès les tests ultimes avant le lancement de la fabrication du modèle définitif.

- SDSS : une équipe internationale du programme d'observation *Sloan Digital Sky Survey*, dans laquelle le LPNHE est impliqué, dresse pour la première fois une cartographie 3D des quasars, objets les plus lumineux de l'Univers ; c'est la plus grande carte d'objets de l'Univers établie jusqu'à présent par la communauté scientifique.

AOÛT

- H.E.S.S. : une campagne d'observations multi-longueurs d'onde/multi-messagers s'engage avec des observations par les satellites *Fermi*, *INTEGRAL* et *Chandra* et au sol, par les collaborations Auger et H.E.S.S. suite à l'observation de la fusion de deux étoiles à neutrons par les détecteurs d'onde gravitationnelle LIGO/Virgo. Une première campagne multi-messager avait eu lieu en amont en collaboration avec IceCube.

- ATLAS : Publication de l'*Initial Design Report* du projet HGTD.

SEPTEMBRE

- T2K : l'asymétrie matière/anti-matière se précise dans le secteur des neutrinos grâce à l'ajout de nouvelles données.
- ATLAS : fin de la fabrication des puces *Front End RD53A* du projet ITk.



OCTOBRE

- SHiP : le LPNHE accueille la journée SHiP/Physique du secteur caché le 11 octobre.
- ATLAS : Bogdan Malaescu, chercheur au LPNHE, devient un des deux *conveners* du groupe Modèle Standard de l'expérience.

DÉCEMBRE

- Hubert Krivine, enseignant-chercheur à Sorbonne Université et au LPNHE, reçoit une mention aux Trophées Tangentes 2017 pour son ouvrage « Petit traité de hasardologie » chez Cassini.

- LPNHE : parution du rapport d'activité 2015-2017.

2018

JANVIER

- Issue de la fusion entre l'université Paris-Sorbonne et l'université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Université voit le jour le 1er janvier 2018.



- LPNHE : visite du tourniquet de la section 01 du comité national du CNRS et du HCERES.

FÉVRIER

- Salles blanches : ajout d'une machine à bonder et d'une torche plasma et développement des compétences pour la mise en œuvre du *wedge-bonding*.

- DarkSide-50 : meilleure limite mondiale pour la recherche de WIMP de faible masse (inférieure à 6 GeV/c²).

MARS

- XENON : signature de la convention équipement pour le projet porté par le LPNHE et lauréat DIM ACAV+, construction d'un nouveau réseau cryogénique pour l'expérience XENONnT

AVRIL

- DAMIC : le projet est lauréat d'une bourse ERC *Advanced Grant*.

- ATLAS : approbation du TDR du projet ITk par le LHCC et publication du *Technical Proposal* du projet HGTD.

MAI

- XENON1T présente les résultats d'un an de fonctionnement et repousse les limites de la recherche de matière noire : un WIMP qui traverserait la terre entière aurait au maximum une chance sur 10¹⁵ d'interagir.

- ATLAS : les premiers modules RD53A de ITk passent en tests en faisceau.

- Matthew Charles, enseignant-chercheur à Sorbonne Université et au LPNHE, est élu *Physics Coordinator* par la collaboration LHCb.

JUIN

- ATLAS : première mesure de la masse du boson de Higgs avec les désintégrations en deux photons et les données du Run 2 du LHC.

JUILLET

- ATLAS : les désintégrations du boson de Higgs en paires de quarks b enfin observées !



SEPTEMBRE

- François Toussnel, ingénieur de recherche au LPNHE devient responsable technique IN2P3 pour le projet CTA.

- DAMIC : démarrage du projet au LPNHE.

OCTOBRE

- Rattachement du LPNHE au service Eduroam de Sorbonne Université.

- TREND : finalisation du projet, un pas important vers la détection autonome des gerbes atmosphériques.

NOVEMBRE

- L'expérience BaBar fête ses 25 ans !

- Création de la collaboration COMET-France, regroupant l'IP2I à Lyon, le LPC à Caen, le LPC à Clermont et le LPNHE à Paris, avec le soutien du CC-IN2P3.

DÉCEMBRE

- CTA : à la Palma dans les Iles Canaries, la construction d'un premier télescope de grande taille (d'une surface de collection de 400 m²), spécialisé dans les « basses » énergie (de 20 GeV à 150 GeV), est terminée, et sa caméra a vu sa première lumière dans la nuit du 14 au 15 décembre 2018.



- Lydia Roos, chercheuse au LPNHE, devient directrice adjointe scientifique de l'IN2P3 en charge du domaine « Laboratoires et sites ».

- Fin de la prise de données du Run 2 du LHC.

RQUANTS

2019

JANVIER

- LHCb : création du projet *Real Time Analysis*, dirigé par Vladimir Gligorov, membre du groupe du LPNHE et finalement choisi comme solution pour la jouvence du déclenchement par la collaboration en mai 2020.

- NA61/SHINE : publication de la mesure de la production de hadrons sur une cible réplique de celle de T2K ; ces résultats ont permis la réduction des incertitudes sur le flux de (anti) neutrinos dans T2K au niveau de 5%, un niveau jamais atteint jusque-là dans une expérience de neutrinos sur accélérateur.

- Stefano Manzoni, doctorant au LPNHE, est lauréat du prix « ATLAS Thesis Awards 2018 » pour son travail de thèse.

FÉVRIER

- LPNHE : élection des nouveaux membres du Conseil de Laboratoire.

MARS

- LHCb observe la violation de CP dans la désintégration des mésons D^0 , le premier signe de l'asymétrie matière antimatière pour le quark charme.



- XENON1T observe un phénomène très rare, la double capture électronique du Xe^{124} , et mesure directement la plus longue demi-vie d'un noyau radioactif de l'univers.

AVRIL

- LPNHE : biennale du laboratoire à Montpellier du 15 au 18 avril.

MAI

- LPNHE : mise en conformité « rayonnements ionisants » des salles devant recevoir des sources scellées et amélioration de l'éclairage de l'amphithéâtre Charpak.

- CTA : NectarCAM voit ses premières cascades atmosphériques.

- Conférence exceptionnelle de S. Perlmutter, Prix Nobel de physique 2011 et visiteur au LPNHE.

- Les collaborations D0 et CDF reçoivent le prix EPS HEP 2019 pour la découverte et les études de précisions du quark Top.

JUIN

- IN2P3 : lancement de l'exercice de prospective nationale en physique nucléaire, physique des particules et astroparticules qui couvrent la période des 10 années à venir (2020-2030).

JUILLET

- LPNHE : Marco Zito est nommé directeur du laboratoire, il succède à Gregorio Bernardi directeur depuis août 2015.

AOÛT

- LHCb : publication du *Physics Case* pour la jouvence phase II du détecteur.

SEPTEMBRE

- DESI : le système de calibration, conçu et réalisé au LPNHE, est installé sur le télescope Mayall aux États-Unis.

- DAMIC-M obtient le record mondial de précision de lecture d'un CCD avec une résolution de 7 % sur le signal d'un électron unique.



- DarkSide : première prise de données avec le prototype de DarkSide-20k au CERN.

- CTA : fin de production des 315 cartes d'électronique FEB v5.

- Le projet LA-CoNGA porté par l'Université de Paris est lauréat de l'appel à projet Erasmus+ pour la création de masters de physique en Amérique Latine.

OCTOBRE

- LSST : après une intense phase de qualification dans le hall de montage du LPNHE, avec la participation de 5 laboratoires de l'IN2P3, le changeur de filtre a été envoyé aux USA.

- LHCb : le prix Lee Grodzins est attribué à Dorothea vom Bruch post-doctorante dans le groupe du LPNHE.

- T2K : obtention d'une contrainte à 3 sigmas sur la phase de violation de CP dans les oscillations de neutrinos.

- LPNHE : mise en sécurité de la nouvelle salle de manipulation pour StarDICE qui utilise un appareil laser à impulsion accordable de classe 4.

- StarDICE : démonstration à l'Observatoire de Haute-Provence de la pertinence de l'approche pour une calibration astronomique à 0.1%.



NOVEMBRE

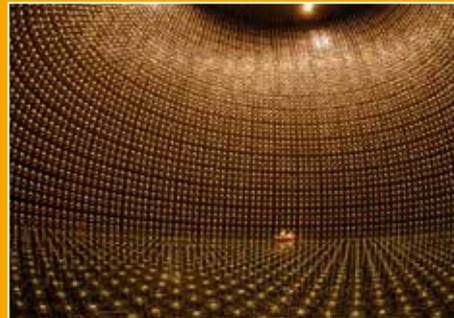
- H.E.S.S. : première détection de l'émission rémanente d'un sursaut gamma à très haute énergie.

- DESI : première lumière pour ce grand relevé spectrographique qui mesurera l'effet de l'énergie noire sur l'expansion de l'Univers.

- FCC : les premières Journées FCC France ont lieu au LPNHE.

DÉCEMBRE

- Hyper-Kamiokande : approbation du projet par le gouvernement japonais.



- LPNHE : évolution du cœur du réseau informatique du laboratoire en 2x40 Gbps.

2020

JANVIER

- Christophe Baland, enseignant-chercheur à Sorbonne Université et au LPNHE, est nommé co-directeur de l'initiative « Physique des Infinis ».

- Issue de la fusion entre l'université Paris-Descartes et l'université Paris-Diderot et de l'intégration de l'institut de physique du Globe de Paris en tant qu'établissement composante, l'Université de Paris voit le jour le 1^{er} janvier 2020.





ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Cosmologie et énergie noire	12	Asymétrie matière - antimatière	42
• Théorie de la formation des structures cosmologiques	14	• LHCb : physique des saveurs lourdes au LHC	44
• Mesure du pic acoustique dans la fonction de structure de la matière	14	- L'expérience LHCb et sa jouvence	44
- eBOSS	15	- Le trajectographe à fibre scintillante (SciFi) pour la jouvence de LHCb	46
- DESI	16	- Le projet d'analyse en temps réel (RTA) pour la jouvence de LHCb	47
- Réalisations techniques	17	• De T2K à HK : la quête de la violation de CP dans le secteur leptonique	48
. Qualification des 10 spectrographes DESI	17	- Analyse des données de T2K	48
. Système de Calibration <i>in-situ</i>	17	- Contributions techniques à la jouvence de ND280	49
- Extension du diagramme de Hubble des Supernovae de type Ia à très grand décalage spectral avec Hubble et Subaru	18	- De NA61/SHINE à T2K-II et à Hyper-Kamiokande	50
• Préparation des futurs grands relevés énergie noire	21	• Recherche d'un signal de physique au-delà du modèle standard de la physique des particules avec COMET	52
- Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP	21	• Phénoménologie et Modélisation en Physique des Particules	53
- Effets instrumentaux sur la mesure du cisaillement gravitationnel	21	- Physique hadronique	53
- Réalisations techniques :	22	- Le moment magnétique anormal du muon a_μ	53
. Le système de changeur de filtre de LSST	22	Masses et interactions fondamentales	54
. Banc de métrologie des CCD	22	• Physique du boson de Higgs dans ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du modèle standard	57
. Étoile artificielle StarDICE	23	- Des mesures de plus en plus précises des propriétés du boson de Higgs	57
. Télescope StarDICE	23	- Recherche de physique au-delà du modèle standard : le problème de la matière noire et autres questions ouvertes	59
Rayonnements cosmiques et matière noire	24	• Mesure de la masse du quark top dans ATLAS	61
• Études cosmologiques, astrophysiques et des astroparticules avec l'expérience H.E.S.S.	26	• Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans ATLAS	62
- Études des fonds diffus	27	• Jouvence du détecteur ATLAS	64
- Les sources galactiques	27	- ATLAS ITk – R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération	64
- Études cosmologiques : recherche de violation d'invariance de Lorentz	28	- Études et réalisations du détecteur HGTD	68
- Les sources extragalactiques	28	• R&D	70
- Activités techniques	29	- Conception des détecteurs pour ILC : le programme de R&D CALICE	70
• Préparations pour le futur observatoire gamma CTA	30	- Activité de prospective sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs : FCC	71
- Simulations de futures observations avec CTA	30		
- Production du modèle de qualification de NectarCAM	30		
- Développements récents autour de la <i>Front End Board</i> (FEB)	32		
• Vers un réseau géant d'antennes pour la détection de neutrinos cosmiques : GRAND	33		
• Étude des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie auprès de l'observatoire Pierre Auger	35		
• Recherche de matière noire légère du photon sombre au WIMP avec le détecteur DAMIC-M	35		
- Genèse	35		
- Objectifs Scientifiques	36		
- Développements Techniques	36		
• Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON	38		
- Système de détection	40		
- Calcul et traitement des données	40		
- Analyse des données	40		
• A la recherche de WIMP avec l'expérience DarkSide-20k ...	41		

Cosmologie et énergie noire

- Théorie de la formation des structures cosmologiques
- Mesure du pic acoustique dans la fonction de structure de la matière
 - eBoss
 - DESI
 - Réalisations techniques
 - . Qualification des 10 spectrographes DESI
 - . Système de Calibration *in-situ*
 - Extension du diagramme de Hubble des Supernovae de type Ia à très grand décalage spectral avec Hubble et Subaru
- Préparation des futurs grands relevés énergie noire
 - Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP
 - Effets instrumentaux sur la mesure du cisaillement gravitationnel
 - Réalisations techniques :
 - . Le système de changeur de filtre de LSST
 - . Banc de métrologie des CCD
 - . Étoile artificielle StarDICE
 - . Télescope StarDICE



Cosmologie et énergie noire



Le groupe de cosmologie du laboratoire (*photo ci-dessus*) est impliqué dans la production de contraintes des paramètres cosmologiques de notre univers, et en particulier dans la caractérisation de l'accélération de l'expansion découverte il y a une vingtaine d'années. Cette accélération, aujourd'hui indiscutée, est attribuée à un mystérieux composant, l'énergie noire, dont on sait maintenant, grâce à une contribution significative de l'équipe, que sa densité d'énergie évolue lentement ou pas du tout avec le temps cosmique.

L'attribution de l'accélération à l'énergie noire suppose que la relativité générale s'applique aussi aux grandes échelles spatiales, une hypothèse que l'on peut légitimement questionner. En effet, si la relativité générale est la théorie physique la mieux testée aux « petites » échelles, en l'occurrence dans le système solaire, des modifications de la gravité aux échelles des galaxies et au delà sont largement concevables. Récemment, la relativité générale a passé brillamment un test expérimental quand on a pu vérifier que les ondes gravitationnelles et électromagnétiques voyagent à des vitesses extrêmement proches.

Mesurer l'expansion de l'univers constitue un moyen de contraindre les sources de gravitation de notre univers sous l'hypothèse d'une théorie, ou éventuellement de conduire la démarche inverse, mais pas de questionner simultanément la théorie et les sources.

Mais l'expansion cosmique s'accompagne d'un mouvement d'augmentation des contrastes de densité (appelé généralement « formation des structures »), dont la gravité est aussi le moteur. Ainsi, mesurer précisément l'évolution des contrastes de densité avec le temps cosmique offre un deuxième moyen de questionner la gravité, en particulier parce que cette évolution ne dépend plus que de la théorie à l'œuvre une fois fixée l'histoire de l'expansion. On voit donc se profiler un programme de recherche enthousiasmant, de nature à mettre en défaut la relativité générale aux grandes échelles : contraindre précisément l'histoire de l'expansion à l'aide de la relation distance-

luminosité et confronter les prédictions de la relativité générale concernant la formation des structures à la mesure de celle-ci. Ces prédictions ne sont calculables qu'aux plus grandes échelles spatiales. Dès que les contrastes de densité deviennent importants, les effets non-linéaires nécessitent l'utilisation de simulations numériques, dont les approximations et la validation sont un sujet d'étude à part entière, menée dans l'équipe.

Les mesures de distances cosmologiques, qui contraignent l'histoire de l'expansion, utilisent deux techniques complémentaires: la luminosité des supernovae de type Ia et la méthode des « règles standards » exploitant les « oscillations acoustiques des baryons ». L'implication historique de l'équipe dans les distances aux supernovae continue aujourd'hui dans le relevé SSP sur le télescope Subaru, et l'implication dans la seconde prend place dans les relevés spectroscopiques eBOSS et DESI. Ces relevés permettent de contraindre la formation des structures en exploitant les « distorsions de décalage spectral » dues à l'attraction gravitationnelle des galaxies entre elles. Le projet LSST, un télescope grand champ permettant d'imager le ciel du sud à une très grande profondeur, ouvre la possibilité d'augmenter très significativement la statistique de supernovae et aussi de contraindre l'évolution de la formation des structures via les corrélations du cisaillement gravitationnel.

Théorie de la formation des structures cosmologiques

Les succès les plus marquants du modèle standard cosmologique mentionnés ci-dessus concernent les grandes échelles auxquelles l'univers est quasi-homogène. Un enjeu majeur des grands programmes observationnels en cours et de la prochaine décennie sera de comprendre si ce même modèle est capable d'expliquer les données très riches et abondantes de l'univers aux échelles plus petites, où il est fortement inhomogène. La qualité et l'abondance des données fournies par ces programmes (par exemple des mesures des propriétés statistiques de la distribution des galaxies) sont telles qu'il y a un défi majeur à la théorie de fournir des prévisions avec une précision adéquate, dans un régime où la physique est fortement non-linéaire et donc très complexe. La recherche de ce groupe est centrée actuellement sur des questions pertinentes au calcul de la distribution de la matière noire dans le régime non-linéaire (qui peut être directement sondé notamment par les mesures de lentillage). Ces calculs sont faits essentiellement en utilisant la méthode de simulation dite « à N corps » dans laquelle le champ continu de matière noire est représenté par des « macro-particules ». Le groupe s'intéresse, d'une part, à la précision de ces calculs numériques en développant des méthodes pour les tester de manière plus rigoureuse, et d'autre part, à la construction d'une modélisation précise de la distribution de matière noire en fonction des paramètres cosmologiques.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Michael Joyce, Sara Maleubre, Azrul Pohan

Mesure du pic acoustique dans la fonction de structure de la matière

L'équipe BAO (pour *Baryon Acoustic Oscillation* – oscillations acoustiques de baryons) du LPNHE est impliquée dans deux expériences majeures visant à mesurer l'histoire de l'expansion de l'univers à partir de la signature BAO : l'*extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (eBOSS) et le *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI). Le signal que l'on cherche à mesurer est l'empreinte laissée par le gel d'ondes acoustiques de plasma primordiales, aujourd'hui observable à différents décalages spectraux dans la distribution des traceurs de la matière que sont les galaxies, les quasars, ou encore les forêts Lyman-alpha des quasars. Cette empreinte se manifeste comme un excès de corrélation (un pic) dans la fonction de corrélation à deux points des traceurs, à une échelle caractéristique correspondant à la taille de l'horizon du son au moment de la recombinaison (l'époque de formation de l'hydrogène neutre).

L'équipe s'est engagée dans l'analyse des données de l'expérience eBOSS, centrée sur la mesure de la position du pic BAO dans la fonction d'auto-corrélation des forêts Lyman-alpha des quasars. L'équipe a produit la mesure la plus précise à ce jour du taux d'expansion à un décalage spectral $z=2,34$ en utilisant les données de la *Data Release 14* du *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS-DR14), qui incluent les données du *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (BOSS), et de son successeur eBOSS jusqu'en 2014. L'équipe prend depuis début 2019 une part active dans l'analyse finale Lyman-alpha de la collaboration eBOSS (données SDSS-DR16).

Par ailleurs, la participation à la préparation de l'analyse de données de DESI est en cours, notamment avec le développement du code de détermination du décalage spectral spectroscopique et des développements logiciels pour l'identification des cibles, notamment des quasars ;

Enfin, il s'est engagée une activité technique avec la responsabilité du design et de la production des boîtiers de calibration, aujourd'hui sur site, et la mesure de la transmission des dix spectrographes de DESI.

eBOSS

Le groupe s'est spécialisé dans l'analyse des corrélations entre les décroissements de flux (les raies d'absorption) observés dans les lignes de visée des quasars pour mesurer l'échelle caractéristique BAO. Ces « forêts » de raies d'absorption sont dominées par la transition Lyman-alpha de l'hydrogène neutre du milieu intergalactique entre les quasars et nous. Cette technique, mise en œuvre pour la première fois pour les données Lyman-alpha du SDSS en 2013, permet de sonder l'histoire de l'expansion à des décalages spectraux de l'ordre de 2-2,5. La mesure effectuée par le groupe à partir d'environ 200 000 spectres de quasars des données SDSS-DR14 prend en compte non seulement les absorptions dues à la transition Lyman-alpha dans les régions d'absorption comprises entre les raies d'émission Lyman-beta et Lyman-alpha, mais également dans les régions comprises entre les raies d'émission Lyman-gamma et Lyman-beta (régions d'absorption Lyman-beta des spectres), améliorant ainsi la statistique disponible. La distance de Hubble et la distance angulaire comobile sont mesurées avec une précision de 3,3 et 4,4 %, respectivement à $z=2,34$. La précision sur la distance angulaire comobile est améliorée de 25 % par rapport à la mesure précédente de 2017. L'équipe a également participé à la mesure du signal BAO dans la fonction de corrélation croisée entre quasars et forêts Lyman alpha. La combinaison de ces deux résultats donne de nouvelles contraintes sur les paramètres cosmologiques Ω_M et Ω_Λ , conduisant à une mesure qui présente une déviation de 1,7 sigma par rapport à la prédiction du modèle standard de la cosmologie, le modèle Λ CDM, à $z=2,34$. Actuellement, l'équipe travaille sur la compréhension et la réduction des erreurs systématiques associées à cette mesure, notamment sur le contrôle de la distorsion introduite par l'opération d'ajustement du continuum de la forêt Lyman-alpha des spectres des quasars (nécessaire pour la mesure des décroissements de flux), de la contamination par les métaux, de la présence sur la ligne de visée des quasars de

CHIFFRES CLEFS

5000 fibres optiques au foyer primaire du télescope Mayall équipées de robots positionneurs

Spectres de **35 millions** de cibles sur 5 ans

2,5 millions de quasars jusqu'à $z=3,7$ et

700 000 forêts Lyman-alpha

Mesure à **1 %** du taux d'expansion jusqu'à $z=3,7$

systèmes à haute densité de colonne (HCD, *High Column Density*) ou de DLAs (*Damped Lyman alpha systems*). L'équipe est également fortement impliquée dans la mesure finale du signal BAO dans les données Lyman-alpha de l'expérience eBOSS (SDSS-IV), ainsi que dans la préparation des mêmes analyses pour DESI. Elle utilise des transmissions simulées produites par nos collègues de Saclay pour tester les différents effets systématiques de cette analyse.

En parallèle, le groupe s'est intéressé, via l'expertise d'un de ses membres, à la mesure dans les données de eBOSS de la croissance des structures sous l'action de la gravité. L'utilisation de statistiques d'ordre supérieur (la fonction de corrélation à trois points ou sa transformée de Fourier, le bispectre) combinée à la mesure de la fonction de corrélation à deux points des galaxies, permet de contraindre le produit du taux de croissance des structures par l'amplitude des fluctuations primordiales de matière et de tester les prédictions de la relativité générale et d'autres modèles de gravité. Ces analyses permettent aussi la mesure de la distance angulaire et du paramètre de Hubble. Ces mesures ont été menées à $z=0,32$ et $z=0,57$ en utilisant les galaxies du relevé BOSS, puis dans l'échantillon de quasars des données SDSS-DR14 d'eBOSS à décalage spectral $z=1,52$. Les résultats sont en bon accord avec les prédictions du modèle Λ CDM mesuré par l'expérience Planck.

DESI



Le projet DESI au télescope Mayall (3,8 m de diamètre) à Kitt Peak en Arizona (*photo ci-dessus*) est un spectrographe multi-objet constitué d'un correcteur grand champ, un plan focal instrumenté de 5000 positionneurs automatiques de fibres et 10 spectrographes. Chacun d'eux réceptionne 500 fibres, dont la lumière est répartie vers 3 caméras (bleu, rouge et infrarouge) permettant une mesure sur l'ensemble de la gamme spectrale accessible depuis le sol avec des CCD, de 360 nm à 1 micromètre. Il s'agit d'une collaboration internationale principalement financée par le département de l'énergie américain, avec une importante contribution française. La première lumière a été observée en octobre 2019 et la collaboration teste actuellement sa stratégie d'observation, sa chaîne de

réduction des données spectrales et les mesures de décalage spectral. Les premières données de science sont prévues à l'été 2020.

L'équipe a poursuivi sur la période son travail sur le développement du code de décalage spectral pour DESI. Elle s'intéresse également à l'identification des quasars et l'obtention des décalages spectraux, dont les erreurs ont un impact direct sur la précision des analyses utilisant les quasars comme traceurs du champ de densité. Plusieurs codes ont été développés par les membres du groupe. L'un, baptisé QSONet, est basé sur des réseaux de neurones convolutifs. Bénéficiant de l'existence d'un catalogue d'identification visuelle de 100 000 quasars, nous avons pu montrer que QSONet permet une identification automatisée des spectres de quasars avec des performances comparables à celles obtenues par un classifieur humain. Le groupe travaille également à l'adaptation pour DESI d'un autre code, développé dans le cadre de l'expérience WEAVE, pour l'identification automatique des quasars. L'équipe mène actuellement une étude de performance comparée entre ces différents codes d'identification et de détermination du décalage spectral dans le contexte de leur utilisation dans DESI.

Réalisations techniques

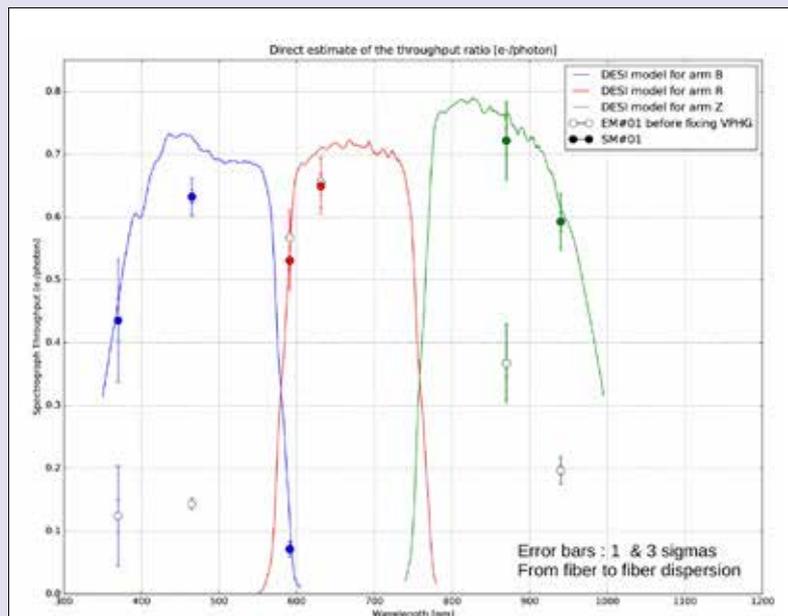
Qualification des 10 spectrographes DESI

Les 10 spectrographes de DESI ont été construits, assemblés et testés en France, chez Winlight Systems, à Pertuis. Les tests de qualification ont été réalisés par une équipe de l'université d'Aix-Marseille (AMU) en partenariat avec le LBNL. Notre équipe était en charge de la mesure de la transmission des 10 spectrographes. Nous avons conçu, construit, testé et caractérisé un dispositif mécanico-optique dédié, qui permet d'étalonner de manière absolue le flux injecté dans le spectrographe en sortie des fibres, puis, par comparaison avec le flux intégré reçu sur les CCD des 3 bras, de déterminer la transmission optique à différentes longueurs d'onde pour chacun des bras du spectrographe.

Nous avons installé ce dispositif sur le banc optique AMU chez Winlight fin 2016 et effectué plusieurs campagnes de mesures sur le premier spectrographe EM#1, prototype de la série. Nous avons déterminé que la transmission était beaucoup plus faible que prévue sur les bras bleu (B) et infrarouge (NIR) et présenté ce résultat à la collaboration DESI en 2018. La cause a pu être identifiée et corrigée : les réseaux holographiques (VPHG) de ces deux bras avaient été montés tête-bêche, envoyant l'ordre -1 au lieu de l'ordre +1 sur le CCD. Nous avons ensuite re-mesuré la transmission du même spectrographe, après repositionnement des réseaux holographiques, et montré que la transmission de l'instrument était désormais compatible avec les spécifications de l'instrument. Notre mesure s'est avérée essentielle en permettant d'éviter qu'une grave erreur d'assemblage optique soit répétée 10 fois, mettant en danger l'ensemble du projet (*figure ci-contre*). Fin 2018 et pendant toute l'année 2019, au fur et à mesure de l'assemblage et des tests de chacun des spectrographes, nous avons refait systématiquement cette mesure ainsi que d'autres tests de qualification (calibration du temps d'exposition, mesure des gains des CCDs, etc) pour les neuf spectrographes restants. L'ensemble de ces résultats fera l'objet d'une publication dédiée, en préparation.

Système de Calibration *in-situ*

Le LPNHE a la responsabilité de la conception, la construction, la qualification, l'installation et le commissioning d'un dispositif de calibration de DESI, installé à l'automne 2019 à Kitt Peak sur le télescope Mayall. Il s'agit de 4 systèmes d'illumination identiques fixés sur l'anneau supérieur du télescope afin d'illuminer un écran de 4 mètres de diamètre fixé sur l'intérieur du dôme ; ce dispositif permet d'injecter dans les 5000 fibres du spectrographe un flux lumineux connu en spectre et en intensité. Nous avons fourni l'écran et construit de bout en bout les systèmes d'illumination. Ce dispositif combine des lampes spectrales (Xe, Kr, Cd, HgNe, Ar) afin de calibrer les spectrographes en longueur d'onde (calibration effectuée à chaque début de nuit, essentielle pour la mesure précise des décalages spectraux des objets). Il comprend aussi des sources de spectre continu (lampes halogènes et une lampe combinant 60 lampes LED couvrant l'ensemble de la plage de longueur d'onde de DESI, de 350 à 1000 nm), afin de mesurer avec précision la transmission relative de chaque fibre, étape indispensable pour pouvoir ensuite effectuer une soustraction correcte du spectre du fond de ciel des spectres des objets. Le rapport signal à bruit étant très faible pour les objets les plus lointains, une mauvaise soustraction du spectre du fond de ciel peut en effet induire des résidus qui perturberont ensuite toute la chaîne d'identification et d'analyse des spectres des objets ciblés, d'où l'importance de cette mesure de transmission relative des 5000 fibres optiques de l'instrument.



Mesures de la transmission du premier spectrographe DESI, avant (EM#1) et après (SM#1) la correction de l'erreur de montage optique détectée grâce à notre dispositif de mesure.

Extension du diagramme de Hubble des Supernovae de type Ia à très grand décalage spectral avec Hubble et Subaru

L'étude de la relation entre distance de luminosité et décalage spectral (diagramme de Hubble) permet de contraindre l'histoire de l'expansion cosmique et de là, de contraindre les densités et équations d'état des fluides qui composent l'Univers. Historiquement c'est l'utilisation de supernovae de type Ia (SNe Ia) comme indicateurs de distance qui a permis, au tournant du XX^e siècle, de produire les premiers diagrammes de Hubble mettant en évidence, contre toute attente, l'accélération de l'expansion. Cette découverte est l'un des faits observationnels majeurs qui a conduit à l'avènement du modèle standard de la cosmologie (Λ CDM).

Dans le cadre des tests de précision du modèle standard, la mesure précise de l'histoire de l'expansion occupe une place centrale, et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, un diagramme de Hubble couvrant la gamme de décalage spectral $0.05 < z < 1$ permet de contraindre l'équation d'état de l'énergie noire, tout particulièrement les variations de cette équation d'état avec le décalage spectral. Ensuite, une fois connue l'histoire de l'expansion, la croissance des structures est entièrement décrite par la gravitation ; la mesure de l'évolution du contraste de densité (via l'évolution des corrélations spatiales du cisaillement gravitationnel, ou les distorsions de décalage spectral) devient alors un test de la relativité générale aux échelles cosmologiques.

Enfin, avec la croissance exponentielle de la statistique disponible, il devient possible d'étudier la croissance des structures directement via les résidus au diagramme de Hubble. À faible décalage spectral ($z < 0.1$), il est possible d'extraire de la corrélation spatiale des vitesses particulières des supernovae la individuelles une mesure du taux de croissance des structures dans l'Univers proche. À plus haut décalage spectral, l'effet de lentillage par la matière en avant-plan amplifie (ou dé-amplifie) le flux des supernovae d'une valeur qui dépend de la ligne de visée. L'étude des corrélations croisées magnification - len-

tillage des galaxies permet de contraindre l'évolution des inhomogénéités du champ de matière avec deux estimateurs complémentaires, affectés d'incertitudes systématiques différentes. Une telle analyse croisée permet d'augmenter l'information cosmologique extraite et de réduire les incertitudes systématiques affectant chacune des deux sondes.

Au cours de la décennie passée, l'équipe du LPNHE, dans le cadre de la collaboration SNLS, a apporté une contribution majeure à la caractérisation de l'énergie noire en publiant à trois reprises, entre 2006 et 2014, les meilleures contraintes sur son équation d'état - la dernière en date publiée conjointement avec la collaboration SDSS-II. Aujourd'hui, le diagramme de Hubble des supernovae de type Ia contient près de 1000 supernovae dans la gamme de décalage spectral $0.05 < z < 1$. Les données accumulées par les relevés en cours de prise de données (*Dark Energy Survey*, *Zwicky Transient Factory*, *Foundation Supernova Survey*) permettront, d'ici environ 2022, de multiplier cette statistique par un facteur 5 dans la même gamme de décalage spectral.

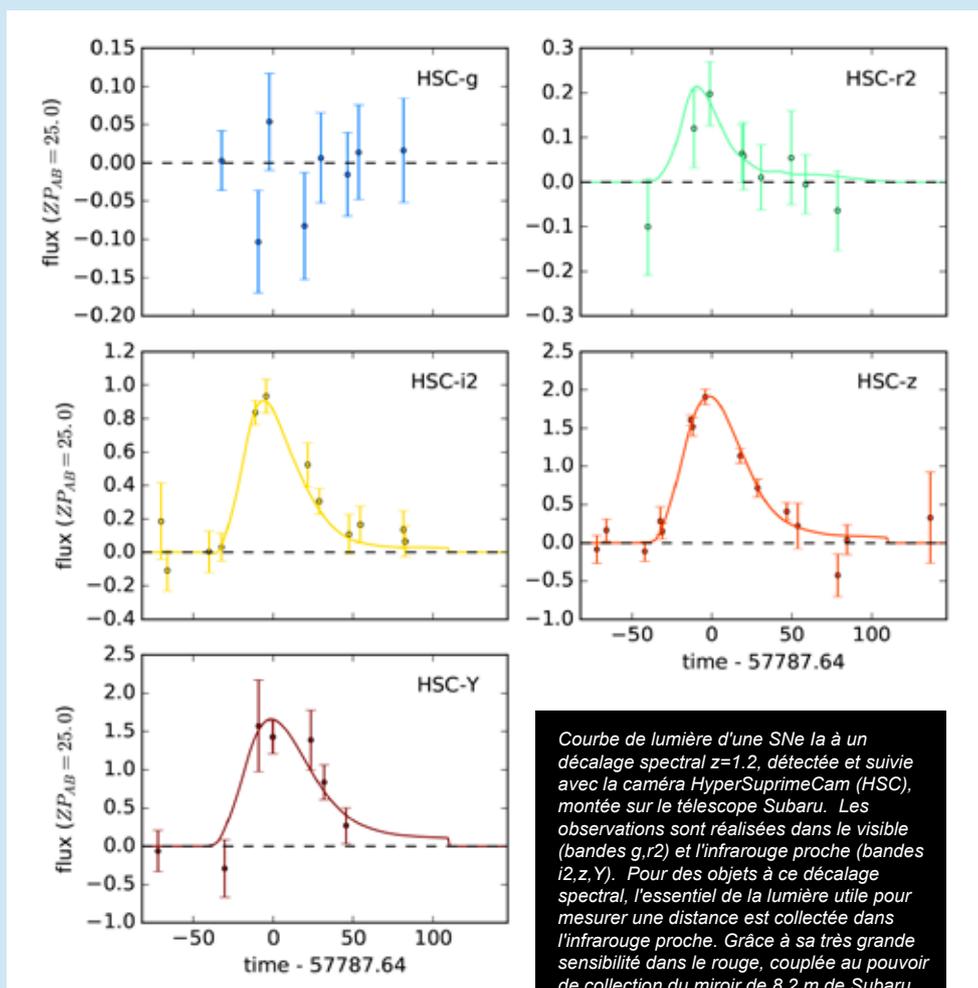
En 2016, notre équipe s'est engagée dans une voie alternative, qui consiste à étendre significativement la gamme de décalage spectral, de façon à mesurer avec précision la transition entre la phase d'expansion décélérée lorsque l'Univers était dominé par la matière et la phase d'expansion accélérée plus récente. Notre but est donc de compléter le diagramme de Hubble actuel avec un lot de SNe très distantes couvrant la gamme de décalage spectral $0.8 < z < 1.5$ et bénéficiant d'un suivi de qualité analogue à ce que nous avons réalisé avec SNLS.

La clef de ce programme est l'imageur *Hyper Suprime Cam* (HSC), installé depuis 2014 au foyer primaire du télescope Subaru de 8.2 m de diamètre. Le plan focal de HSC est équipé de CCD haute résistivité de 200 micromètres d'épaisseur, avec une efficacité supérieure à 95 % au-delà de 600 nm. La combinaison Subaru/HSC dispose d'un pouvoir de collection dans le

rouge et l'infrarouge proche, près de dix fois supérieur à celui de *Mega Cam*, l'imageur utilisé pour SNLS. Nous avons proposé, en collaboration avec l'équipe du Kavli-IPMU (Tokyo), un recadrement des composantes profondes du *Subaru Strategic Program* (SSP) optimisé pour la détection des SNe et la mesure de l'évolution de leur flux de façon à pouvoir en mesurer les distances. Ce recadrement a été accepté par la collaboration en 2016.

HSC seul permet de mesurer des distances de luminosité de SNe la jusqu'à un décalage spectral $z \sim 1.1$ environ. Au-delà, la luminosité émise par la SNe dans le visible n'est détectable que dans l'infrarouge. Nous avons proposé, en collaboration avec l'IPMU (Tokyo), l'Université de Hawaii et Berkeley, une stratégie consistant à adjoindre au suivi HSC une visite unique réalisée avec l'instrument WFC3 monté sur le télescope spatial Hubble. Une telle approche permet d'ajouter au diagramme de Hubble une cinquantaine de supernovae très distantes ($1.1 < z < 1.5$) avec seulement une centaine d'orbites HST, ce qui en fait un des programmes de mesure de SNe distantes les plus efficaces jamais réalisés. Une réponse à un appel d'offre a été soumise au HST en 2016, et acceptée. Nos calculs indiquent que les quelques centaines de SNe très distantes mesurées avec HSC pèseront à peu près autant que l'échantillon du *Dark Energy Survey*. Ce lot de données, associé à la statistique actuelle, permettra d'améliorer d'un facteur 2 les contraintes sur l'équation d'état de l'énergie noire et surtout d'être sensible à d'éventuelles évolutions de cette équation d'état en fonction du décalage spectral, prédite par de nombreux modèles d'énergie noire.

Le programme combiné HSC/HST a débuté fin 2016 avec les observations cadencées du champ profond COSMOS, réalisées sur 6 mois de novembre 2016 à mai 2017. La campagne a permis de valider la stratégie de prise de données et de démontrer la capacité du télescope à garantir une cadence, en dépit de conditions météorologiques défavorables. Plusieurs centaines de SNe ont été découvertes et suivies par HSC et 25 SNe distantes ont été observées par HST. La qualité des courbes de lumière collectées est remarquable et a permis de vérifier le pouvoir de collection inégalé de l'instrument HSC (*figure ci-dessous*). Une seconde campagne d'observations, programmée en 2017-2018, a dû être reportée à deux reprises en raison d'incidents techniques et de conditions météorologiques particulièrement défavorables. Les observations ont finalement eu lieu de septembre 2019 à février 2020 et ont doublé la taille de l'échantillon de SNe bien mesurées.



Courbe de lumière d'une SNe Ia à un décalage spectral $z=1.2$, détectée et suivie avec la caméra HyperSuprimeCam (HSC), montée sur le télescope Subaru. Les observations sont réalisées dans le visible (bandes g,r2) et l'infrarouge proche (bandes i2,z,Y). Pour des objets à ce décalage spectral, l'essentiel de la lumière utile pour mesurer une distance est collectée dans l'infrarouge proche. Grâce à sa très grande sensibilité dans le rouge, couplée au pouvoir de collection du miroir de 8.2 m de Subaru, HSC est actuellement le seul instrument au sol à pouvoir mesurer la luminosité de SNe Ia dans l'infrarouge avec un tel niveau de précision.

L'équipe travaille sur plusieurs contributions clefs à ce programme, en particulier la mesure des distances de luminosité des SNe à partir des observations photométriques HSC, ainsi que la détermination des décalages spectraux d'un sous-ensemble des cibles, via du temps d'observation sur VLT/FORS2 obtenu en 2016, 2018 et 2019.

Pour la mesure des distances, les trois ingrédients critiques sont :

- (1) une chaîne d'analyse de photométrie dont les biais (en particulier les biais dépendant du signal-sur-bruit) sont contrôlés au niveau du pour-mille,
- (2) une intercalibration des bandes passantes du relevé précise au niveau de quelques pour-mille
- (3) une modélisation empirique de l'évolution spectrophotométrique des SNe Ia.

Pour la photométrie des SNe, le groupe a assemblé et adapté aux données HSC une chaîne d'analyse de photométrie dérivée de celle qui avait été développée pour SNLS. Ce code est quasi-optimal statistiquement et il a été montré sur les données *Mega Cam* qu'il présente des biais inférieurs à 0.1 %. Un tel travail de qualification reste encore à réaliser sur les données HSC. Concernant la calibration photométrique, nos objectifs sont ambitieux. Nous mettons en place une chaîne de métrologie des flux redondante (i.e. les images de science sont calibrées sur des standards de flux via plusieurs chemins de calibration différents) et nous nous appuierons à terme sur la comparaison entre calibration HST et calibration instrumentale réalisée par l'expérience dédiée StarDICE.

Enfin, la modélisation de l'évolution spectrophotométrique des SNe est essentielle pour inférer à partir des mesures de flux (réalisées dans notre référentiel) le flux émis par chaque SNe, dans son référentiel, dans une bande de référence. Le modèle qui est devenu le standard de la communauté a été développé au sein du groupe, pour les besoins de l'analyse SNLS. Il s'agit d'un modèle empirique, entraîné à partir d'un échantillon de supernovae bien mesurées, et permettant de prédire l'évolution du flux de la SNe une fois connue la bande passante du relevé. Le modèle décrit l'essentiel de la diversité des SNe Ia à l'aide de deux paramètres empiriques (dont l'effet sur la courbe de lumière est estimé à partir des données). Depuis quelques années, la croissance soutenue de l'échantillon de supernovae bien mesurées a porté l'éclosion de modèles alternatifs, la plupart entraînés sur les données extrêmement riches produites par l'expérience SNfactory, dans laquelle le groupe est impliqué. Ces modèles suggèrent que l'addition d'un troisième paramètre permet une meilleure description de la diversité des SNe Ia.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

[Pierre Antilogus](#), [Pierre Astier](#), [Guy Augarde](#),
[Christophe Balland](#), [Marc Betoule](#), [Sébastien Bongard](#),
[Delphine Hardin](#), [François Hazenberg](#),
[Laurent Le Guillou](#), [Pierre-François Léget](#),
[Ignasi Perez Rafols](#), [Nicolas Regnault](#),
[Clare Saunders](#), [Julianna Stermer](#)

Équipe technique :

[Julien Coridian](#), [Patrick Ghislain](#), [Sonia Karkar](#),
[Philippe Repain](#)

Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP

Le pouvoir de collection des nouveaux instruments, en particulier LSST, permet d'envisager un diagramme de Hubble constitué par la mesure de plusieurs dizaines de milliers de supernovae à l'horizon 2025. Une telle statistique est en mesure de sonder une déviation récente de la relation luminosité-distance de l'ordre de 2 millièmes correspondant à une modification du paramètre de l'équation d'état de l'ordre du pourcent. Ceci implique toutefois d'être capable de mesurer les rapports de flux apparent entre les supernovae proches (dans le visible) et les supernovae lointaines (dans l'infrarouge) sans introduire d'erreurs systématiques plus grandes que l'effet. L'étalonnage photométrique sur le domaine de longueur d'onde 400-1000 nm est en conséquence un point clef de la réussite de cette entreprise.

Les meilleures références de flux astrophysique actuelles ne sont précises qu'au pourcent ce qui est insuffisant d'un ordre de grandeur pour atteindre l'objectif affiché. En portant l'expérience StarDICE et en contribuant au développement du CBP (*Collimated Beam Projector*), deux expériences visant à transférer aux objets astrophysiques l'étalonnage des flux lumineux définis par le radiomètre cryogénique du NIST (*National Institute of Standards and Technology*), le groupe investit un important effort instrumental dans ce prérequis indispensable au succès des futurs relevés de supernovae.

Effets instrumentaux sur la mesure du cisaillement gravitationnel

La mesure du cisaillement gravitationnel consiste en pratique à évaluer l'ellipticité apparente des galaxies (ou plus généralement leur forme). Ces formes sont affectées par la réponse du télescope et les contributions atmosphériques, que l'on évalue en pratique en mesurant la forme apparente des étoiles, parce qu'elles ne sont pas résolues. Les capteurs CCD (utilisés en particulier par LSST) ajoutent un biais systématique sur la mesure de la forme des étoiles du fait des interactions électrostatiques des charges accumulées pendant l'intégration. Le groupe a proposé des méthodes pour contraindre et modéliser cet effet et continue à les raffiner. Dans un autre registre, l'atmosphère produit des petits déplacements des objets les uns par rapport aux autres, avec une fonction de corrélation spatiale qui s'étend à plusieurs minutes d'arc. Cela corréle artificiellement les formes mesurées des galaxies et nous travaillons à caractériser et mesurer ces petits déplacements pour limiter les conséquences de cet effet atmosphérique.

Réalisations techniques

Le système changeur de filtre de LSST

Pour quantifier les couleurs des objets astronomiques qui sont une information clef pour l'estimation de leur distance, les imageurs collectent la lumière à travers des filtres qui sélectionnent une bande du spectre (et absorbent le reste). LSST observera le ciel successivement dans 6 bandes qui couvrent la fenêtre visible, de 330 à 1045 nm. Le dispositif changeur de filtre permet de déplacer ces filtres, qui font 70 cm de diamètre pour un poids de 30 kg chacun, d'une position d'attente à la position dans le faisceau et réciproquement. Ces mouvements doivent être rapides (2 min) afin de minimiser les temps morts, et précis, les filtres devant être positionnés de façon reproductible à 100 micromètres près.

La France est responsable de la fourniture du système de changeur de filtre de LSST et le LPNHE fournit le carrousel, qui stocke les filtres en attente. Le carrousel, par une rotation, fournit le filtre sélectionné à l'auto-changeur, bras robotisé qui amène le filtre dans le faisceau. Sans les filtres, le carrousel pèse environ 250 kg et est un système extrêmement robuste, capable de maintenir de façon sûre les filtres en intégrant les risques sismiques importants au Chili. Une quarantaine de personnes sont intervenues dans la construction du changeur de filtre dans cinq laboratoires de l'IN2P3: CPPM, LPC, LPSC, APC, LPNHE dont plus d'une dizaine au LPNHE depuis 2007. Durant ces deux dernières années, l'équipe de mécanique du laboratoire a terminé la recherche et développement du carrousel sur un prototype, a réalisé le modèle final et a accueilli les autres participants dans le hall de montage du laboratoire pour l'intégration et les tests du système complet sur une monture qui émule les mouvements du télescope, ainsi que dans un caisson réfrigérant pour émuler les conditions de température

auprès du télescope. L'ensemble du système a été livré à SLAC en octobre 2019 pour une intégration immédiate dans la caméra (*photo ci-dessous*). Durant l'année 2020, des tests d'usure seront conduits sur le prototype de manière à établir les procédures de maintenance préventive durant les 10 ans de fonctionnement du système à l'observatoire.



Octobre 2019 : Préparation du carrousel pour son expédition aux États-Unis.

CHIFFRES CLEFS

Plan focal de LSST : **3.2 10⁹** pixels, **~10 deg²** (40 fois la surface de la lune)

Nombre d'objets suivis par LSST pendant 10 ans : **~37 10⁹** (20 109 galaxies et 17 109 étoiles)

Banc de métrologie des CCD

Nous avons développé dans un ensemble de salles blanches dédiées un banc d'étude des CCD qui nous permet de mesurer des effets fins dans la réponse des

CCD de LSST et d'optimiser les paramètres de fonctionnement de ces CCD. C'est le banc de référence pour LSST, ainsi il a été/est régulièrement sollicité pour étudier les problèmes rencontrés lors de la production des CCD et de la mise en service du plan focal. De plus, grâce à ce banc nous avons pu développer et publier une méthode de mesure précise des forces électrostatiques à l'œuvre dans le corps du CCD lui-même. Cet effet, dit *Brighter-Fatter*, doit absolument être pris en compte dans l'analyse de données et en particulier pour les mesures de formes mises en œuvre dans les analyses de cosmologie basées sur le cisaillement gravitationnel.

Étoile artificielle StarDICE

Le flux des standards astrophysiques est inférieur de 16 ordres de grandeur au domaine de sensibilité du radiomètre cryogénique définissant l'échelle des flux lumineux du NIST. L'étalonnage du diagramme de Hubble nécessite l'établissement d'une longue chaîne métrologique liant les deux. Le LPNHE développe une « étoile artificielle », nommée StarDICE, d'une brillance comparable aux étoiles standards et deux bancs photométriques permettant de relier la brillance de cette étoile artificielle à l'échelle des flux du NIST. Un premier prototype complet, d'une précision de 0.5 % a été testé en 2018 et le développement pour atteindre la précision de 0.1 % est en cours.

Télescope StarDICE

Le transfert d'étalonnage entre l'étoile artificielle et les standards astrophysiques doit s'affranchir des fluctuations de transparence de l'atmosphère. Ceci nécessite un instrument photométrique dédié capable d'accumuler un grand nombre d'observations s'étendant sur plusieurs centaines de nuits. Le LPNHE développe un instrument robotique basé à l'Observatoire de Haute Provence (OHP) capable

de conduire cette tâche de manière automatisée (*photo ci-dessous*).



Prototype du télescope robotique StarDICE mis en place pour la démonstration d'intérêt de l'expérience. Le prototype a effectué 20 nuits d'observations, étalées sur une période de 6 mois, allant et venant de l'étoile artificielle à des étoiles standards dans le ciel.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Guy Augarde, Christophe Bolland, Marc Betoule, Sébastien Bongard, Delphine Hardin, François Hazenberg, Laurent Le Guillou, Pierre-François Léget, Ignasi Perez Rafols, Nicolas Regnault, Clare Saunders, Julianna Stermer

Équipe technique :

William Ceria, Julien Coridian, Marc Dhellot, Guillaume Daubard, Patrick Ghislain, Claire Juramy-Gilles, Didier Laporte, Yan Orain, Eric Pierre, Philippe Repain, Stefano Russo, Eduardo Sepulveda, Daniel Vincent

CHIFFRES CLEFS

0.026 % : la précision du flux lumineux du nouveau prototype de l'étoile artificielle StarDICE mesurée sur 4 h au laboratoire

Rayonnements cosmiques et matière noire

- Études cosmologiques, astrophysiques et des astroparticules avec l'expérience H.E.S.S.
 - Études des fonds diffus
 - Les sources galactiques
 - Études cosmologiques : recherche de violation d'invariance de Lorentz
 - Les sources extragalactiques
 - Activités techniques
- Préparations pour le futur observatoire gamma CTA
 - Simulations de futures observations avec CTA
 - Production du modèle de qualification de NectarCAM
 - Développements récents autour de la *Front End Board* (FEB)
- Vers un réseau géant d'antennes pour la détection de neutrinos cosmiques : GRAND
- Étude des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie auprès de l'observatoire Pierre Auger
- Recherche de matière noire légère du photon sombre au WIMP avec le détecteur DAMIC-M
 - Genèse
 - Objectifs Scientifiques
 - Développements Techniques
- Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON
 - Système de détection
 - Calcul et traitement des données
 - Analyse des données
- A la recherche de WIMP avec l'expérience DarkSide-20k



Rayonnements cosmiques et matière noire

La connexion entre l'astrophysique et la physique subatomique remonte à plus d'un siècle, avant même que la structure de l'atome ne soit élucidée. Peu de temps après la découverte de la radioactivité, on soupçonna des sources extraterrestres de rayonnements ionisants et Victor Hess mit clairement en évidence ce que l'on appela ensuite les « rayons cosmiques ». Ces corpuscules s'avèrent être de même nature que les composants des atomes, mais portés à des énergies très supérieures à celles des produits de la radioactivité. Leurs sites d'origine et les mécanismes d'accélération sont restés longtemps mystérieux, et malgré les progrès des observations et des théories cette question reste ouverte et fait l'objet de recherches actuelles et de projets en cours. Entre-temps, les interactions des rayons cosmiques avec les molécules de l'atmosphère ont fourni une abondante moisson de nouvelles particules, avant que les accélérateurs ne prennent le relais à partir des années 50. Un nouveau protagoniste est entré en scène avec l'énigme de la matière noire : cette masse invisible qui domine la gravitation dans l'univers peut-elle être constituée de particules d'un type nouveau, qui n'auraient que des interactions faibles avec la matière ordinaire (dite baryonique) ? Peuvent-elles être observées sur Terre avec des détecteurs dédiés ou produites dans les collisionneurs ? Les possibilités d'existence d'une nouvelle particule appelée WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*), offertes par les modèles supersymétriques, sont de plus en plus restreintes et de nouvelles théories sont explorées, avec des particules dont la masse pourrait s'étendre sur une très vaste gamme de valeurs.

Le LPNHE aborde de façon expérimentale plusieurs sujets d'astrophysique des particules : l'émission et la propagation des rayons cosmiques les plus énergétiques (l'expérience H.E.S.S. et le projet CTA pour les photons gamma, le projet GRAND pour les neutrinos ou l'observatoire Pierre Auger pour la composante chargée), la physique fondamentale (brisure des symétries en lien avec la gravité quantique), la cosmologie (détection de la matière noire, indirectement

dans H.E.S.S., directement dans XENON, DarkSide et DAMIC).

L'astronomie Gamma des très hautes énergies est entrée, ces dernières années, dans le domaine des études multi-messagers avec les premières détections des ondes gravitationnelles et l'arrivée de candidats neutrinos extrasolaires de très hautes énergies. Toutes ces observations viennent compléter les données collectées dans le spectre électromagnétique à de multiples longueurs d'onde, du domaine radio jusqu'aux rayonnements gamma de très hautes énergies par des expériences au sol et dans l'espace.

Ainsi, de nombreuses campagnes d'observation multi-messagers et multi-longueurs d'onde ont été développées récemment avec un certain succès. Ces recherches interrogent des paradigmes en astrophysique et en cosmologie aussi bien que dans le domaine des astroparticules. Pour ce dernier, il se développe, dans les techniques de détection basées sur la lumière Tchérenkov, des études non seulement des rayonnements gamma mais aussi du fond diffus des électrons. L'analyse de celui-ci complète les autres observations des particules chargées réalisées par les expériences embarquées sur satellites. Le laboratoire, impliqué de longue date dans ces travaux, exploite actuellement les données collectées par l'expérience H.E.S.S. et participe activement au projet CTA qui est en cours de construction.

Pour les neutrinos cosmiques, la période 2017-2019 a été placée sous le signe du renforcement des activités du groupe sur les thématiques liées à la détection autonome dans le domaine radio de gerbes atmosphériques par un réseau d'antennes. L'expérience prospective TREND (*TianShan Radio Array for Neutrino Detection*) a notamment été finalisée avec succès. Ses résultats encourageants sur la discrimination des gerbes atmosphériques par rapport au bruit de fond radio dominant ont permis le démarrage du projet GRAND (*Giant Radio Array for Neutrino Detection*), dont l'ambition est de détecter des neutri-

Études cosmologiques, astrophysiques et des astroparticules avec l'expérience H.E.S.S.

nos d'ultra-haute énergie d'origine cosmique à partir de 2030. Le groupe GRAND du LPNHE est fortement engagé depuis 2 ans dans GRANDProto300, le démonstrateur de GRAND, participant notamment à la sélection du site de l'expérience et au développement du code d'analyse de données.

Dans l'expérience Auger, l'équipe du laboratoire a publié des limites supérieures obtenues avec le réseau d'antennes sensibles aux micro-ondes, maintenant démantelé. Elle ne participe pas à la mise à niveau du détecteur de surface, mais reste impliquée dans la mesure de la composition du flux cosmique au delà de 10^{18} eV.

Les activités de recherche directe de la matière noire concernent les expériences XENON, DarkSide et DAMIC, qui ont en commun de se placer dans des sites souterrains pour minimiser le bruit de fond. En particulier, l'expérience XENON1T a atteint la meilleure sensibilité actuelle pour des masses de WIMP au-delà de 100 MeV avec trois analyses différentes, exception faite de la fourchette de [2-3,5] GeV qui a été explorée par l'expérience DarkSide-50. Au delà du paradigme WIMP, XENON1T a en outre exploré différents modèles de matière noire, notamment les axions solaires, les *axion-like particles* (ALP) et plusieurs modèles de matière noire leptophilique (interagissant préférentiellement avec les leptons).

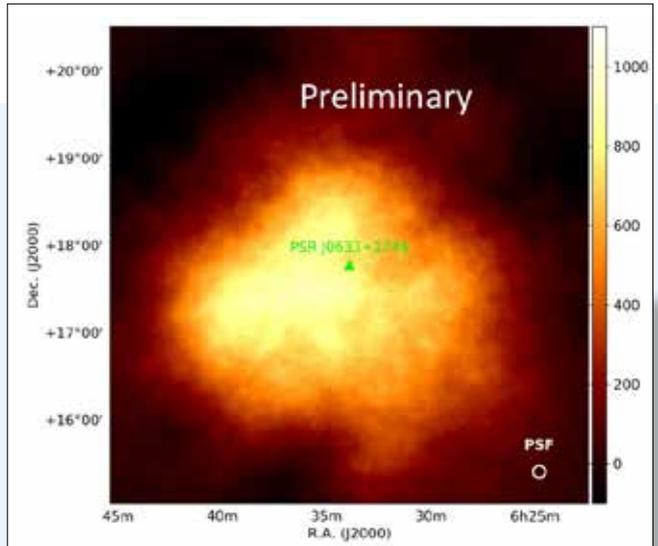
L'expérience DAMIC à SNOLAB (Canada) utilise comme détecteurs des CCD, d'une masse beaucoup plus faible mais avec une sensibilité très poussée. Elle a démontré son potentiel de sensibilité à des faibles masses de WIMP et permet d'explorer une région plus importante de l'espace des paramètres. Des résultats ont été publiés sur la masse et le couplage de la matière noire leptophilique et sur un éventuel photon du secteur sombre. Le projet DAMIC-M (à Modane) augmentera cette sensibilité d'un facteur 1000 par sa masse (1 kg) et par l'amélioration de l'électronique des CCD par des innovations développées au laboratoire, notamment une lecture répétée non destructive.

En l'absence de détection avérée, les recherches directes et indirectes de matière noire, combinées aux résultats du LHC sur sa production, contribuent à contraindre les modèles proposés par les théories.

Les années 2017 à 2019 ont été marquées par l'émergence des campagnes multi-messagers. Tout d'abord en septembre 2017, l'expérience IceCube a détecté un neutrino d'environ 290 TeV d'origine *a priori* astrophysique. Il s'en est suivi une campagne d'observations multi-messager et multi-longueur d'onde sans précédent avec, entre autres, les expériences au sol : H.E.S.S. et MAGIC et les satellites *Fermi* et *INTEGRAL*. Ces derniers ont détecté une contrepartie dans le domaine des rayonnements gamma quelques heures après l'alerte lancée par IceCube et dans une direction cohérente avec le blazar TXS 0506+056. À partir de la seconde moitié de 2017, les ondes gravitationnelles sont entrées en scène avec une série de détections par les collaborations *Advanced LIGO* et *Advanced VIRGO* de signaux d'ondes gravitationnelles durant la période de prise de données dite « O2 » de novembre 2016 à août 2017. De nombreux observatoires et expériences tels que H.E.S.S. se sont associés dans les campagnes d'observations conjointes entre les trois messagers que sont dorénavant les rayonnements gamma, les neutrinos et les ondes gravitationnelles. Un troisième événement marquant de ces années écoulées est la première détection avec H.E.S.S. de la rémanence (*afterglow*) d'un sursaut gamma (GRB) aux très hautes énergies dans des données collectées en juillet 2018. Ces observations ont été réalisées plus de dix heures après les premières lumières de ce sursaut. Alors que les GRB courts seraient préférentiellement associés à des coalescences d'étoiles à neutrons, les GRB longs sont probablement liés à l'effondrement d'étoiles géantes pour former des étoiles à neutrons ou des trous noirs. Signalons enfin qu'en septembre 2018, la collaboration H.E.S.S. a, pour la première fois, publié un sous-ensemble de ses données d'archives au format FITS (*Flexible Image Transport System*), un format de fichier largement utilisé en astronomie. L'échantillon comprend des listes d'événements et des fonctions de réponse instrumentale pour les observations de diverses sources de rayons gamma bien connues (la nébuleuse du crabe, PKS 2155-304, MSH 15-52, RX J1713.7-3946) ainsi que des observations de champs vides pour la soustraction des arrière-plans. Ces données sont conformes aux spécifications de formats ouverts développés en vue du prochain Observatoire CTA.

Études des fonds diffus

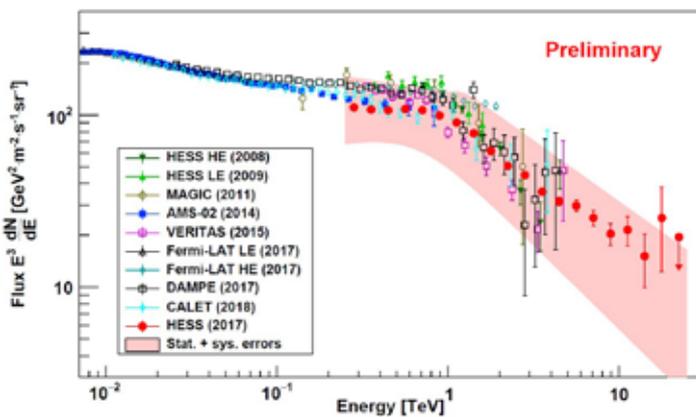
Les études sur les fonds diffus galactiques des électrons et positrons se sont achevées à la fin de l'année 2017 avec la présentation des résultats de l'analyse effectuée au laboratoire à la conférence internationale sur les rayons cosmiques (ICRC 2017). Le spectre en énergie entre 250 GeV et 20 TeV (*points en rouge de la figure ci-dessous*) montre que les données collectées par l'expérience H.E.S.S. sont en bon accord et en parfaite continuité avec les résultats provenant du satellite AMS-02 (*points bleus sur la même figure*) qui est l'expérience la plus précise à basse énergie. Ce résultat a d'ores et déjà mis à mal certains modèles théoriques de pulsars tentant d'expliquer les signaux de positrons reconstruits par les expériences embarquées sur satellite.



Champ de vue de la région de Geminga. Au centre, en vert, la position du pulsar.

Les sources galactiques

Avec la venue d'un nouveau post-doctorant dans le groupe à la fin de l'année 2018, une nouvelle activité a été développée au LPNHE portant sur l'étude des pulsars et plus particulièrement des vents de pulsars. Les pulsars sont aujourd'hui une hypothèse privilégiée pour l'explication de l'excès de positrons observé dans le rayonnement cosmique. L'observation en rayon gamma de ces objets nous offre des renseignements précieux sur la production, l'accélération et la diffusion des particules leptoniques (électrons et positrons essentiellement) dans le voisinage des pulsars ayant produit ces rayonnements. Le LPNHE s'est impliqué dans ce domaine par l'étude de Vela X, HESS J1825-137 et Geminga (*figure ci-dessus*), qui ont la particularité de posséder un diamètre apparent important, permettant une détermination précise de leur morphologie. Ces analyses ont pu montrer plusieurs faits remarquables sur la diffusion des particules au sein des nébuleuses de vent de pulsar, mettant à mal le modèle d'une simple diffusion et de pertes d'énergie dans l'environnement proche de ces objets. Ces études ont aussi amené à la première observation de Geminga par un télescope Tchérenkov, permettant une observation directe de la source qui reste à ce jour l'une des plus prometteuses pour enrichir l'environnement local en positron.



Spectres en énergie des électrons et positrons reconstruits par des expériences au sol et embarquées dans des satellites. Les points rouges représentent les données de l'expérience H.E.S.S.

Études cosmologiques : recherche de violation d'invariance de Lorentz

Certains modèles de gravité quantique peuvent induire une granularité de l'espace-temps à l'échelle de Planck, permettant une modification de la vitesse de propagation de la lumière à des énergies proches de 10^{19} GeV. Cette variabilité de la vitesse de la lumière en fonction de l'énergie peut être testée expérimentalement à plus basses énergies en recherchant des délais temporels dépendants de l'énergie et de la distance des sources. Le signal émis par des sources lointaines, variables et assez énergétiques (noyaux actifs de galaxie -AGN-, pulsars, GRB), est analysé pour dériver des limites sur l'échelle en énergie caractéristique de ce type d'effet. Toutefois, des délais temporels peuvent également être introduits par les mécanismes d'émission propres aux sources astrophysiques.

Le groupe est impliqué depuis de nombreuses années dans la recherche de ce type d'effet. Il a participé activement à tous les articles de la collaboration H.E.S.S. publiés sur ce sujet, dont les plus récents concernent les analyses des

sources Mrk 501 et 3C 279. Le groupe a été à l'initiative, en 2018, de la mise en place d'une équipe de travail commune entre les collaborations H.E.S.S., MAGIC et VERITAS. Cette collaboration entre les trois expériences a pour but de combiner pour la première fois les données obtenues pour plusieurs types de sources (AGN, pulsar, GRB) afin d'améliorer les limites existantes sur l'échelle d'énergie de la gravité quantique, notamment en tenant compte de la variation de l'effet avec la distance des sources. Cette collaboration a entrepris l'élaboration d'un environnement d'analyse, permettant de combiner les données de différentes expériences en prenant en compte leur réponse instrumentale ainsi que leurs incertitudes systématiques.

En parallèle, le groupe est à l'initiative d'une collaboration avec le LUTH de Meudon concernant l'étude des délais temporels introduits par les mécanismes d'émission dans les AGN en état d'éruption. Ces délais intrinsèques viennent en compétition avec les délais dus à la violation d'invariance de Lorentz. Deux thèses en co-direction (une soutenue en 2018 et une en cours) ont permis d'engager un travail pionnier dans ce domaine.

Les sources extragalactiques

Les études sur la modélisation des jets d'émissions gamma dans les noyaux actifs de galaxies se sont poursuivies avec la production de simulations d'éruption de ces jets, dans le but d'estimer les délais entre les temps d'émission de photons à différentes énergies lors de ces événements. Le modèle développé est utilisé pour estimer un lot de paramétrisations décrivant au mieux les données observées par H.E.S.S. ou d'autres expériences dans le même domaine d'énergie. Ce projet se place également dans le cadre de la recherche de violation d'invariance de Lorentz présentée plus haut. L'objectif est de produire un estimateur des délais intrinsèques à la source dans l'estimation des temps de propagation de la lumière émise depuis ces objets. Il est également prévu de produire des simulations pour CTA, le futur grand observatoire dans le domaine

de l'astronomie gamma, et d'estimer les performances qui pourront être atteintes par cet instrument.

Les observations de galaxies lointaines se sont poursuivies pendant les deux dernières années et le groupe a participé à l'analyse de certaines d'entre elles. Citons la détection du quasar radio 3C 279 en janvier et juin 2018 à la suite d'un programme de surveillance. Les deux détections exhibent des comportements très singuliers de cet objet : la première à forte et brève variabilité et la seconde sur un temps long et à très haut flux. Sur un second blazar lointain - de décalage spectral $z \sim 1,4$ - des limites ont pu être obtenues et ont été utilisées pour contraindre la localisation de la zone d'émission à l'aide de données complémentaires de *Fermi-LAT*. Cette source, PKS 2023-07, a été observée conjointement avec les satellites *AGILE* et *Fermi* (figure ci-contre).

Activités techniques

Sur le plan technique, les dernières campagnes de maintenance de la caméra du cinquième télescope de grande taille, orchestrées par le laboratoire, se sont achevées en septembre 2019 avant l'installation d'une nouvelle caméra construite par nos collaborateurs allemands. Cette opération a eu pour objectif de pallier les quelques défaillances d'une caméra déjà ancienne et d'augmenter le temps d'observation pendant les phases de lever et de coucher du Soleil et de la Lune pour lesquelles la nouvelle caméra a été conçue. Le succès de cette intervention au sein d'une collaboration avec plus de vingt années d'expérience ne fut pas une surprise et il a été marqué par la détection, dès les premières observations, de sources très largement étudiées par le passé. Le laboratoire a occupé une place centrale dans la modélisation de cette nouvelle caméra ainsi que des quatre précédentes et dans la production de simulations Monte-Carlo, mettant en évidence certaines méconnaissances de la réponse de l'instrument par leurs concepteurs.

Compte tenu des derniers succès de la collaboration H.E.S.S. et de la montée en puissance de nouveaux messagers dans les études des sources astrophysiques, il a été décidé en 2019 de prolonger l'exploitation de l'expérience pour trois années supplémentaires. Cette prorogation est renouvelable deux fois et sera rediscutée en fonction, notamment, de l'avancée du projet de prochaine génération CTA. Le laboratoire s'est bien entendu engagé à poursuivre ses études dans le domaine de l'astronomie gamma avec l'instrument H.E.S.S. et se prépare au démarrage de CTA.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Julien Bolmont, Sami Caroff,
Matteo Cerutti, Agnieszka Jacholkowska,
Daniel Kerszberg, Jean-Philippe Lenain, Christelle Levy, Cédric Perennes,
Michele Rocco, Pascal Vincent

Équipe technique :

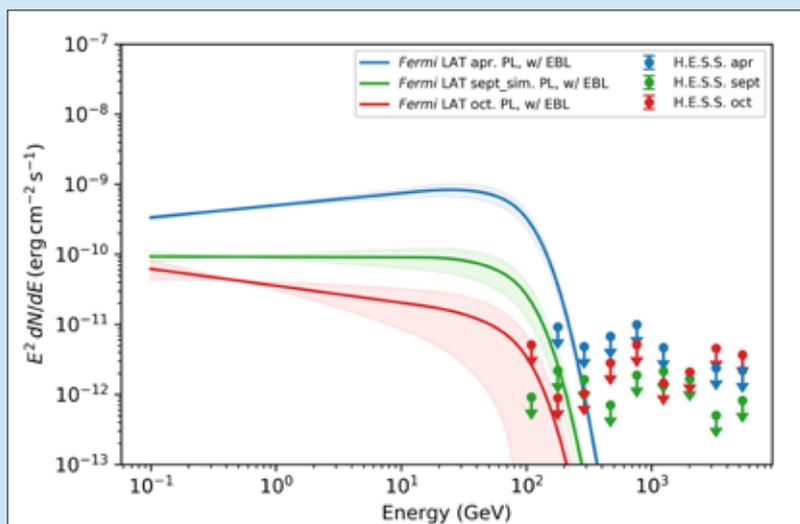
François Toussenel

CHIFFRES CLEFS

20 ans de la collaboration H.E.S.S.

L'équivalent de **24 000** ans de calcul mono-cœur pour les simulations Monte Carlo des réponses instrumentales

Plus de **28 000** heures d'observation cumulées en **20** ans



Distribution spectrale en énergie de PKS 2022-077 durant 3 périodes d'activité intense observées par FERMI (lignes) et H.E.S.S. (points). Les couleurs identifient les différentes périodes. Les courbes sont des extrapolations des données de FERMI aux énergies observables par H.E.S.S.. Les points sont des limites supérieures.

Préparations pour le futur observatoire gamma CTA

Cherenkov Telescope Array (CTA) est le projet de future génération en astronomie gamma de très hautes énergies, basé sur le principe de détection par imagerie Tchérénkov atmosphérique. Les principaux objectifs scientifiques de CTA se déclinent en trois grandes thématiques, que sont :

- **comprendre** l'origine et le rôle des particules cosmiques relativistes ;

Simulations de futures observations avec CTA

Parmi les activités scientifiques en cours, l'équipe du LPNHE est impliquée dans la révision de l'estimation du nombre de noyaux actifs de galaxies (AGN) détectables avec CTA, en partant du catalogue 4LAC fourni récemment par la collaboration *Fermi*-LAT et en extrapolant le spectre de ces AGN sous des conditions raisonnables. Ce travail se fonde sur les dernières réponses instrumentales issues de la dernière campagne de simulations massives, la production `prod3b-v2`, qui implémente l'empreinte des télescopes suivant l'implantation envisagée sur chaque site. Ces simulations de détectabilité d'AGN vus avec *Fermi* utilisent `gammapy`, une des deux chaînes d'analyse actuellement en cours de développement au sein du consortium CTA.

L'équipe CTA du LPNHE est impliquée dans les tests de validation de `gammapy` et est ainsi associée aux réflexions portant sur l'implémentation de nouvelles fonctionnalités dans cet outil. Ainsi, nous avons récemment inclus dans `gammapy` la possibilité de calculer des courbes de lumière selon un échantillonnage temporel non pas constant, comme fait usuellement dans le domaine, mais adaptatif selon la significativité de la source d'intérêt dans chaque intervalle temporel. Cette implémentation est le fruit de travaux effectués ces deux dernières années dans H.E.S.S..

CHIFFRES CLEFS

150 TB de données de simulations pour CTA stockées au LPNHE

- **sonder** les environnements extrêmes ;
- **explorer** les frontières de la physique.

Cet instrument constituera le premier observatoire astronomique ouvert dans cette gamme d'énergie et sera déployé sous la forme de deux réseaux de télescopes sur deux sites, un dans l'hémisphère Nord aux Îles Canaries, l'autre dans l'hémisphère Sud au Chili, pour une couverture du ciel optimale. Chaque réseau comportera deux à trois types de télescopes de tailles différentes, afin de maximiser la sensibilité et d'étendre la gamme en énergie accessible par rapport aux instruments actuels.

Production du modèle de qualification de NectarCAM

Fort de son expérience dans le domaine de l'astronomie gamma Tchérénkov avec le projet H.E.S.S., le LPNHE s'est fortement investi dans le design et la construction de CTA, notamment à travers NectarCAM, qui propose un design de caméra pour équiper les télescopes de taille intermédiaire de CTA. Le LPNHE est ainsi en charge pour NectarCAM de l'élaboration de la carte d'acquisition, dite *Front End Board* (FEB), ainsi que des développements du *firmware*, des interfaces logicielles et des tests de vérification fonctionnelle associés.

Lors de la période de référence du présent rapport, le financement TGIR des contributions françaises à CTA a démarré, permettant la production des différents éléments du modèle de qualification de NectarCAM et une campagne de tests poussés. Ainsi, la production de 315 FEB version 5 a été finalisée, comportant une pré-série de 60 cartes pour valider les processus de fabrication, de vérification et de traçabilité définis au LPNHE. De plus, trois bancs de tests automatisés ont été produits par le LPNHE afin de réaliser les tests fonctionnels sur les différents composants de la FEB; deux ont été déployés chez le fournisseur, afin de vérifier et ensuite d'accepter ou de rejeter les cartes produites; et le dernier au LPNHE, afin de contrôler la procédure d'acceptation et

de vérifier les performances des cartes produites en extrayant des échantillons pour chaque lot de cartes réceptionné (*photo ci-contre*). A la fin de cette production, deux FEBs n'ont pas passé les critères d'acceptation, représentant au final un taux d'efficacité de cette production de plus de 99 %. Enfin, des outils d'exploration de l'homogénéité des performances des FEB durant le processus de fabrication sont en cours d'élaboration et se fondent sur les résultats des tests fonctionnels réalisés chez le fournisseur. Il est à noter qu'en parallèle de ces activités, l'ensemble du logiciel des bancs de test et les dépendances associées a été porté sous forme de conteneur Docker, permettant ainsi une portabilité et une traçabilité grandement accrues de cette suite logicielle.

Pour la validation de NectarCAM, 66 des FEB produites ont été intégrées au modèle de qualification, puis extensivement testées au CEA/Irfu. Au cours du printemps 2019, une campagne de tests de cette caméra a été menée avec succès sur un prototype de structure de télescope de taille intermédiaire, réalisée par nos collègues allemands de DESY à Adlershof, dans la banlieue de Berlin. L'équipe du LPNHE a pris part au déploiement de la caméra sur site, à la prise de données sur ciel en conditions réelles qui a

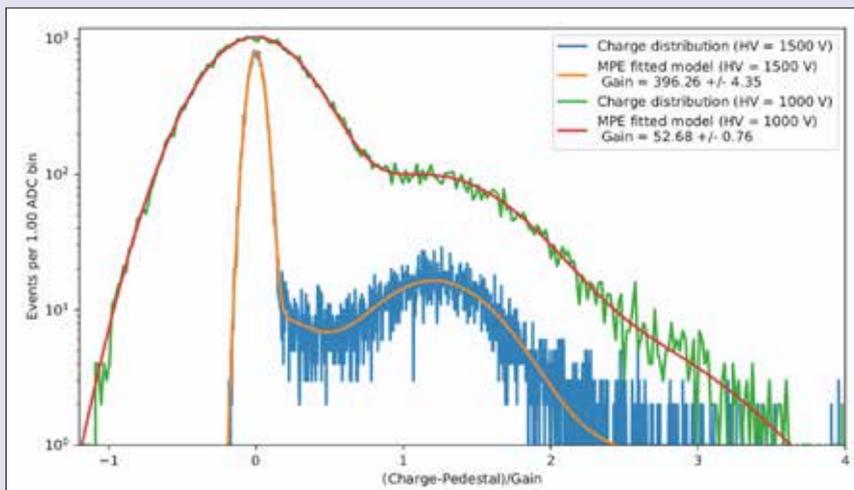


Production des FEB chez le sous-traitant. Les bancs de test des FEB, conçus au LPNHE, sont déployés sur le site de production afin de valider systématiquement chaque carte.

suivi pendant un mois, ainsi qu'à l'analyse des données collectées.

Le LPNHE s'est investi dans l'étude de la calibration du gain des photomultiplicateurs de la caméra NectarCAM. La connaissance précise du spectre de charge d'un photoélectron, donc à faible luminosité, est nécessaire pour mesurer le gain. Dans ce but, un modèle de spectre de charge a été construit, permettant une extrapolation simple entre données enregistrées à différentes valeurs de haute tension, dont la haute tension nominale d'utilisation (*figure ci-dessous*). Ce modèle a été dérivé pixel par pixel, montrant une dispersion qu'il est nécessaire de prendre en compte afin d'améliorer la précision de la calibration. Cette méthode de reconstruction du gain a été testée sur les données prises avec le modèle de qualification de la caméra en

chambre noire et lors de la campagne de tests à Berlin, permettant d'établir un contrôle de la valeur des gains à 3 % près, correspondant aux exigences de l'observatoire CTA.



Ajustement d'un spectre de charge pour NectarCAM obtenu avec une lumière pulsante à très faible luminosité, simultanément pour un voltage de 1000V et 1500V.

Développements récents autour de la *Front End Board* (FEB)

La version 3 de la FEB comprend un système de transfert des données provenant des sept photomultiplicateurs via un lien Ethernet 1Gbit/s, deux systèmes de déclenchement coexistants (digital et analogique) et un système de contrôle SPI pour gérer les composants du module *Front End*.

Afin de configurer chaque FEB et de surveiller leur comportement en ligne, nous avons développé le NMC (Nectar Module Controller), basé sur un serveur OPC UA, qui est un protocole standard de communication de « machine à machine » servant à contrôler des équipements industriels. Ce serveur contrôle l'ensemble des paramètres des FEB et des systèmes qui lui sont connectés : l'*Interface Board* (IB) en amont, développée par l'IRAP, gérant les hautes tensions appliquées aux photomultiplicateurs, et le *Trigger BackPlane* (TBP) en aval, développé par DESY-Zeuthen, assurant la réalisation du déclenchement et sa distribution à toutes les FEB après validation au niveau de la caméra. Ce dernier permet aussi d'effectuer la mise à jour, à distance et de manière distribuée, du *firmware* du FPGA des FEB et du TBP. A terme, le *firmware* du microcontrôleur de l'IB pourra aussi être mis à jour par ce même canal, facilitant la maintenance et les mises à niveau nécessaires.

Les nouveautés pour la FEB version 5 incluent notamment l'intégration des mezzanines de déclenchement L0 et L1 au circuit imprimé de la FEB et un système de L0 pattern à base de RAM circulaire permettant de visualiser quels PMT parmi les 1855 constituant la caméra ont contribué à la décision de déclenchement L1, information transmise avec le flot de données pour chaque événement.

CHIFFRES CLEFS

99 % de taux d'acceptation de cartes FEB v5

313 cartes FEB v5 produites et validées

Pour pallier l'obsolescence du boîtier actuel utilisé pour les puces Nectar, un re-routage complet de la carte s'impose, autorisant de fait la suppression d'éléments devenus inutiles suite au choix de la collaboration d'utiliser le déclenchement digital. Le nouvel ASIC Nectar intègre en outre un nouveau mode de gestion de ses mémoires analogiques internes (mode dit « ping pong ») permettant de réduire significativement le temps mort de lecture de la caméra en autorisant l'acquisition de deux événements consécutifs très proches. De plus, le *firmware* de la FEB sera adapté pour gérer la nouvelle fonctionnalité de l'ASIC Nectar tout en restant compatible avec le logiciel d'acquisition actuel.

Concernant le calendrier du projet, l'objectif est d'assembler une caméra NectarCAM avec les FEBs actuelles pour l'été 2020 et qu'elle soit opérationnelle pour l'hiver 2021. En parallèle, le prototype de la version 6 de la FEB sera lancé cette année pour valider la production des cartes pour une (ou plusieurs) caméra(s) en 2021.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Julien Bolmont, Sami Caroff, Matteo Cerruti, Gabriel Emery, Agnieszka Jacholkowska, Jean-Philippe Lenain, Christelle Levy

Équipe technique :

Julien Coridian, Pascal Corona, Claire Juramy-Gilles, Sonia Karkar, Jean-Luc Meunier, Éric Pierre, François Toussanel, Vincent Voisin

Vers un réseau géant d'antennes pour la détection de neutrinos cosmiques : GRAND

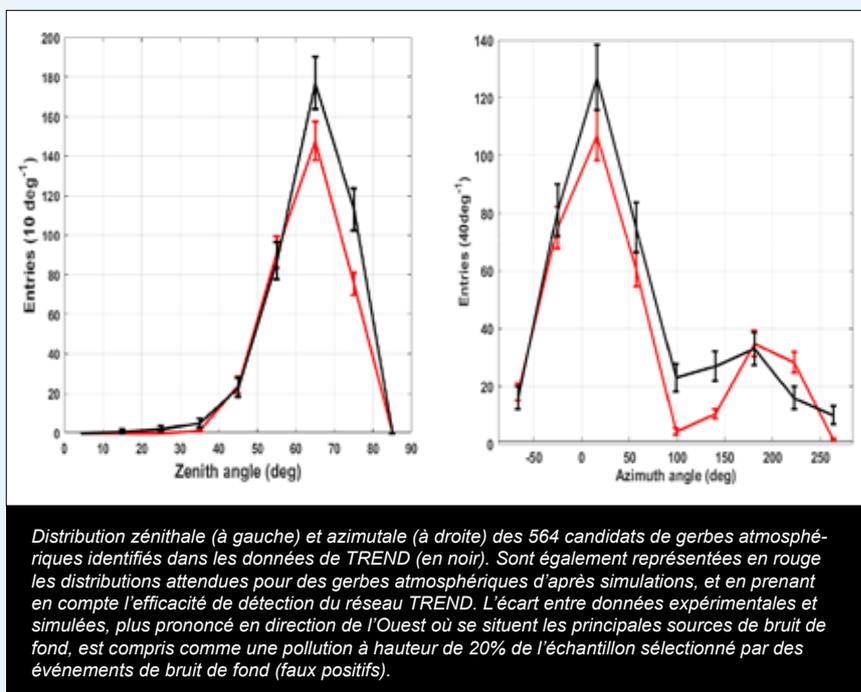
La période 2017-2019 a été placée sous le signe du renforcement des activités du groupe sur les thématiques liées à la détection autonome de gerbes atmosphériques par un réseau d'antennes.

En premier lieu, l'expérience TREND (*Tianshan Radio Experiment for Neutrino Detection*) a été conclue avec succès. Ce réseau de 50 antennes radio, déployé dans une vallée reculée des montagnes du TianShan par une collaboration franco-chinoise dans laquelle le LPNHE a joué un rôle majeur, a enregistré un milliard de signaux radio transitoires au cours de ses 3 années de prise de données. Un algorithme dédié a ensuite permis d'identifier parmi ceux-ci 564 candidats de gerbes atmosphériques (*figure ci-dessous*). La fraction de signaux de bruit de fond - générés par des transformateurs élec-

Ce résultat a ouvert la voie à un projet beaucoup plus ambitieux : GRAND (*Giant Radio Array for Neutrino Detection*). GRAND vise à effectuer la détection de neutrinos d'énergie extrême ($E > 10^{17}$ eV) à l'aide d'un réseau géant d'antennes radio composé de sous-réseaux déployés à travers le monde. Chacun serait composé de 10000 antennes, pour une surface effective totale de 200000 km² à l'horizon 2030. Le projet GRAND a été initié par le LPNHE et l'équipe a joué un rôle moteur dans le développement d'une simulation détaillée de la réponse du détecteur aux neutrinos. La taille du réseau lui permettrait d'atteindre des limites de sensibilité inégalées, qui lui donneraient en particulier la possibilité de sonder la plupart des modèles de production de neutrinos cosmogéniques, eux-mêmes issus de l'interaction de rayons cosmiques d'énergie extrême avec le fond diffus cosmologique.

La taille gigantesque du réseau GRAND impose cependant de réaliser une radiodétection autonome des gerbes de particules induites dans l'atmosphère avec une excellente efficacité. Ceci n'a pas encore été démontré, malgré les résultats encourageants de TREND et d'autres expériences. Le démonstrateur GRANDProto300 (GP300), un réseau de 300 antennes déployé à partir de 2021 sur 200 km², vise à répondre à cette question.

Le LPNHE a été fortement impliqué dans la sélection du site qui accueillera l'expérience. Sept campagnes de mesures ont été réalisées en Chine entre août 2017 et mars 2019, aboutissant à la sélection de six sites ayant un



triques, lignes de haute tension ou autres - parmi cette sélection a pu être estimée à environ 20 %, correspondant à un taux de faux positifs de l'ordre de 1 pour 10⁷.

environnement électromagnétique propice au déploiement de l'expérience GP300 (photo ci-contre). Nous sommes maintenant dans la phase finale de sélection du site, en concertation avec les autorités locales. La décision finale devrait intervenir avant l'été 2020. Notre équipe occupe également un rôle leader dans le développement du logiciel d'analyse et de reconstruction des données de GP300.

Le LPNHE a aussi réalisé l'électronique *Front End* de l'expérience GRANDProto35, un réseau de 35 antennes déployé sur le site de TREND qui visait à apporter une réponse au déficit d'efficacité de cette expérience, grâce notamment à un temps mort extrêmement réduit (négligeable jusqu'à un taux de déclenchement de 20kHz). Ce projet a été mené à bien, les unités ayant été déployées avec succès en 2018 après validation de leurs performances. Néanmoins la situation politique au XinJiang, et l'impossibilité de se rendre sur le site de l'expérience, nous a conduits à nous retirer de cette phase du projet.

Chercheurs et doctorants :

Julien Bolmont, Valentin Decoene,
Jean-Philippe Lenain, Olivier Martineau-Huynh

Équipe technique :

Jacques David, David Martin



Mesure de l'environnement radio dans la province du Gansu, durant la campagne de sélection du site l'expérience GRANDProto300.

CHIFFRES CLEFS

1 milliard de signaux radio transitoires enregistrés par TREND, **564** candidats de gerbes atmosphériques identifiés

60 000 neutrinos simulés sur un réseau de **1000** antennes pour l'estimation de la sensibilité de GRAND

Plus de **100** mesures d'environnement radio au cours de **6** campagnes pour la sélection du site de l'expérience GRANDProto300

Étude des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie auprès de l'observatoire Pierre Auger

L'observatoire Pierre Auger en Argentine analyse les cascades de particules générées dans l'atmosphère par les rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{18} eV. L'analyse de ces grandes gerbes atmosphériques permet de remonter à l'énergie, la direction d'origine et la nature des rayons cosmiques primaires avec *in fine* l'espoir d'identifier puis d'étudier leurs sources.

La question de la nature de ces primaires (protons ou noyaux) est au cœur de la problématique permettant de remonter à leurs sources puisque la déflexion par les champs magnétiques subie le long de leur trajectoire dépend de leur charge. Une amélioration des détecteurs de surface a été financée pour augmenter le pouvoir d'identification de l'observatoire. L'équipe du laboratoire a fortement contribué aux propositions d'amélioration.

Parallèlement, nous avons étudié la possibilité d'observer d'éventuelles émissions de brems-

strahlung moléculaire (MBR) issues des cascades et avons équipé deux cellules élémentaires de sept détecteurs de surface avec des antennes sensibles aux bandes L (1.2 GHz) et C (3.8-4.2 GHz). Aucun signal n'a pu être identifié comme provenant de MBR. À l'automne 2018, nous avons démantelé nos réseaux d'antennes micro-onde, suite à la publication des détails de l'expérience l'année précédente.

La collaboration Auger est concentrée sur le projet de mise à niveau du détecteur de surface, Auger Prime. Le LPNHE ne participe pas à cette mise à niveau mais contribuera à la mesure plus précise de la composition des rayons cosmiques aux plus hautes énergies qu'elle rend possible.

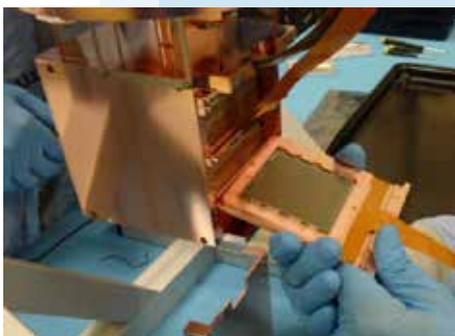
Chercheur :

[Antoine Letessier Selvon](#)

Équipe technique :

[Romain Gaior](#)

Recherche de matière noire légère du photon sombre au WIMP avec le détecteur DAMIC-M



Détecteur CCD de DAMIC utilisé au laboratoire souterrain de SNOLAB au Canada.

Genèse

Le projet DAMIC-M est issu de la collaboration entre le LPNHE et l'Université de Chicago sur l'expérience DAMIC à SNOLAB au Canada. Cette expérience utilise des dispositifs à couplage de charges en silicium (CCD en

anglais pour *Charge Coupled Device*) à la fois comme cible et comme détecteur d'éventuelles interactions de la matière noire avec la matière ordinaire (*figure photo ci dessus*).

À l'été 2017, le projet DAMIC-M a été présenté pour un financement auprès de l'*European*

Research Council (ERC). Porté par un professeur à l'Université de Chicago, ce projet a été financé en avril 2018 pour un montant global de 3,5 M€ et a pu débuter au LPNHE en septembre 2018.

Outre trois permanents, l'équipe comprenait cinq étudiant.e.s en thèse jusqu'à la soutenance de thèse qui a eu lieu à l'automne 2019.

Les développements techniques en électronique sont le point fort de la contribution du LPNHE à DAMIC-M. L'équipe d'ingénieur.e.s et technicien.ne.s contribue au développement d'une électronique de lecture ultra-bas bruit à même de tirer le meilleur parti des CCD et de garantir les objectifs scientifiques du projet exposés ci-dessous.

Objectifs Scientifiques

L'objectif de l'expérience DAMIC-M est la détection d'interactions de particules de matière noire (ou du secteur sombre en général) avec la matière ordinaire qui compose le détecteur (électrons et noyaux de silicium). Depuis les premières observations de Fritz Zwicky en 1933 et celles de Vera Rubin dans les années 70, les preuves de l'influence gravitationnelle de la matière noire dans la structure de l'Univers et sa dynamique se sont accumulées au point que les théories remettant en cause son existence apparaissent comme spéculatives. Pourtant, aucune preuve extérieure à l'astronomie n'a permis de confirmer cette existence et les efforts expérimentaux tournés vers la détection de WIMP (particules massive soumises à l'interaction faible) que la supersymétrie offrait de manière « naturelle » sont restés vains.

La communauté s'intéresse donc à des modèles alternatifs de matière noire dont le mode de production initial n'est plus nécessairement issu d'un équilibre thermique avec la matière ordinaire aux premiers instants de l'univers et dont les interactions avec celles-ci (hors interaction gravitationnelle) peuvent nécessiter l'introduction d'une cin-

quième force, inconnue à ce jour. Dans ce cadre théorique élargi, l'échelle de masse de la matière noire couvre 80 ordres de grandeur et le mode d'interaction n'est plus majoritairement lié à la matière baryonique mais inclut également les photons et les leptons.

L'expérience DAMIC-M et le dispositif expérimental précurseur DAMIC@SNOLAB ont un seuil de détection extrêmement faible (< 10 eV pour DAMIC-M et 50 eV pour DAMIC@SNOLAB). Ce seuil très bas permet de sonder des particules de matière noire de masse entre 1 et 10 GeV interagissant avec la matière baryonique, de quelques eV pour les photons sombres (couplés aux photons ordinaires) et au-dessus du MeV pour les particules de matière noire leptophiliques (qui interagissent préférentiellement avec les électrons).

La désintégration d'éléments radioactifs présents dans le laboratoire d'expérimentation ou dans les matériaux constituant le détecteur et son cryostat constitue un bruit de fond de contamination qu'il est extrêmement important de juguler et de contrôler. La contamination de DAMIC@SNOLAB est inférieure à 5 DRU (cinq événements par jour par keV et par kilogramme) tandis que l'objectif pour

Développements Techniques

Pour abaisser le seuil de détection des CCD à seulement 10 eV, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à la génération de 3 paires électron-trou dans le silicium, il est indispensable de parfaitement maîtriser le bruit électronique de la chaîne de lecture du CCD.

Grâce à une innovation de l'électronique de conversion en tension des charges produites dans le CCD, nous pouvons lire et convertir celles-ci un nombre arbitraire de fois sans les altérer. Ainsi, en faisant une lecture individuelle rapide, le bruit basse fréquence inhérent à toute électronique peut être réduit, et en répétant un grand nombre de fois ces lectures et en les moyennant nous pouvons aussi réduire le bruit blanc d'origine thermique.

En appliquant ce principe et en utilisant les premiers prototypes des CCD de DAMIC-M, nous avons obtenu sur les bancs de test au LPNHE une résolution de 0,07 électrons qui permet de séparer de manière extrêmement pure et efficace les dépôts d'énergie correspondant à un nombre donné de paires électron-trou générées dans le silicium. Cette résolution est illustrée sur la figure ci-contre, où les pics correspondant à la génération de 0, 1, ou 2 paires électron-trou sont clairement visibles.

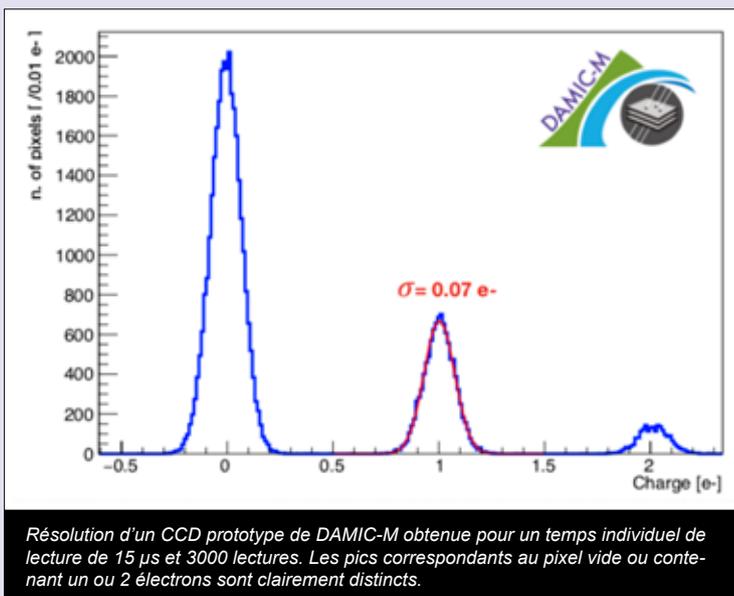
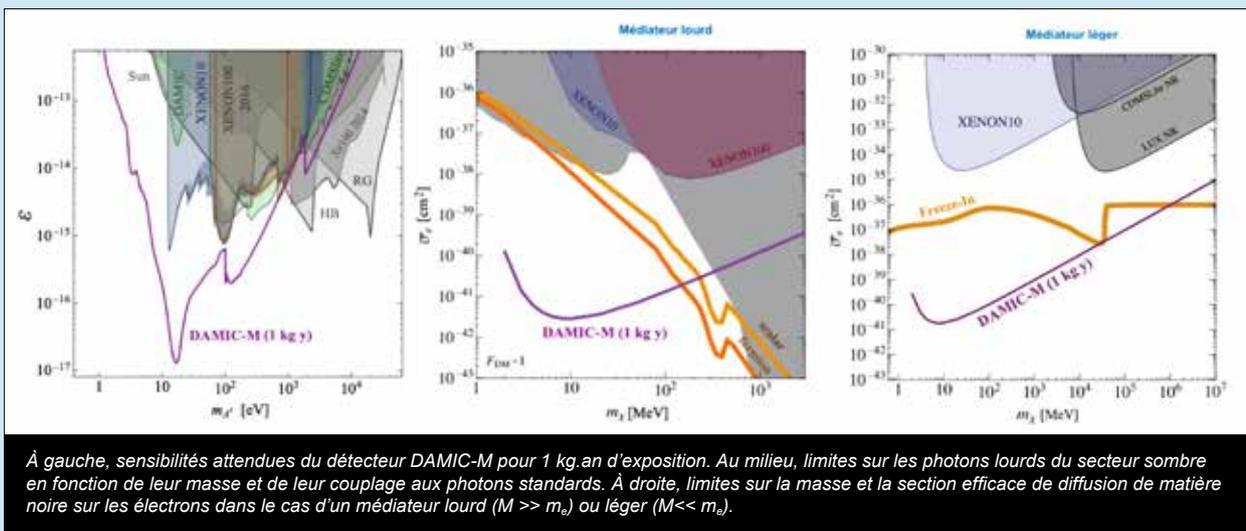
En parallèle avec ces bancs de test, deux puces en micro-électronique ont été développées. L'une (CROC pour CCD *Read Out Chip*) est un amplificateur ultra-bas bruit programmable qui permet de lire et éventuellement de filtrer (par une double lecture corrélée) le signal de sortie des CCD. Une première version de cette puce a été fabriquée et

DAMIC-M est de 0,1 DRU. La thèse soutenue en novembre 2019 est consacrée à l'évaluation et à la maîtrise de ces bruits de fonds pour DAMIC@SNOLAB. Ce travail a été réalisé à travers un vaste programme de simulations, basé sur une modélisation extrêmement détaillée du détecteur et sur une cinquantaine de contaminants radioactifs, et développé avec le logiciel GEANT-4.

À partir de l'exposition de 40g de CCD dans la mine de Sudbury au Canada en 2017 et 2018,

nous avons publié des limites sur la masse et le couplage de photons du secteur sombre et sur la matière noire légère couplée aux électrons.

Avec un seuil de détection abaissé à seulement 10 eV, une masse totale d'un kilogramme et une contamination inférieure à 0,1 DRU, l'objectif de DAMIC-M est de surpasser ces limites d'au moins un facteur 1000. Les sensibilités attendues sont illustrées sur la figure ci-dessous pour la recherche de photons lourds et de matière noire leptophilique.



CHIFFRES CLEFS

Masse finale du détecteur : **1kg** de CCD

Objectif de bruit de contamination : **< 0,1** événement par jour par kilo et par keV

Objectif de résolution en énergie : **< 0,2** électron

testée en 2019, la version deux est en cours de fabrication. Une troisième version qui intégrera la connexion directe au CCD nécessite l'introduction d'un module haute tension qui est en cours de conception. L'autre puce (CABAC pour *Clock And Bias Asic for CCD*), développée initialement pour le programme LSST, permet de polariser et de cadencer les CCD pour leur exposition et leur lecture.

Chaque CCD DAMIC-M comporte quatre voies de lecture lues par deux puces CROC qui seront bondées directement sur le CCD à l'intérieur du cryostat. Il faut quatre puces CABAC, assemblées sur un même circuit imprimé, pour polariser et lire chaque CCD de DAMIC-M.

Finalement une carte ADC, permettant la conversion en numérique du signal des CCD, a été développée en 2018-2019 et est en cours de fabrication.

L'ensemble de ces circuits doit être programmé, piloté et contrôlé par un *firmware* qui est entièrement développé au LPNHE. Les tests de ces circuits et leur intégration à la carte mère (développée à l'Université de Chicago) qui porte le FPGA et l'interface ethernet vers l'ordinateur de stockage des données ont débuté fin 2019.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Joao Da Rocha, Romain Gaior, Latifa Khalil, Antoine Letessier Selvon, Ariel Matalon, Giorgos Papadopoulos, Paolo Privitera, Michelangelo Traina

Équipe technique :

Philippe Bailly, Marc Dhellot, Romain Gaior, Claire Juramy-Gilles, Hervé Lebbolo, David Martin, Philippe Repain, Stefano Russo, Eduardo Sepulveda

Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON

Le détecteur XENON1T, développé par la collaboration XENON pour la recherche directe de matière noire, notamment le modèle WIMP, est l'expérience la plus sensible à l'heure actuelle dans la gamme de masse au-delà de 7 GeV environ et parmi les plus sensibles au-delà de 100 MeV. Il est constitué d'une *Time Projection Chamber* (TPC, chambre à projection temporelle) remplie de 3.5 tonnes de xénon liquide et il est localisé dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie (*photo ci-contre*). Il vise à détecter la faible charge et la petite quantité de lumière qui devraient être émises à la suite de l'interaction d'une particule de matière noire avec un noyau de xénon. La prise des données a commencé fin 2016 et s'est terminée fin 2018. Plusieurs analyses basées sur une tonne par an d'exposition ont permis à XENON1T d'obtenir une sensibilité record de 100 MeV jusqu'au domaine du TeV (*figure ci-contre*). Aucun signal n'a été trou-

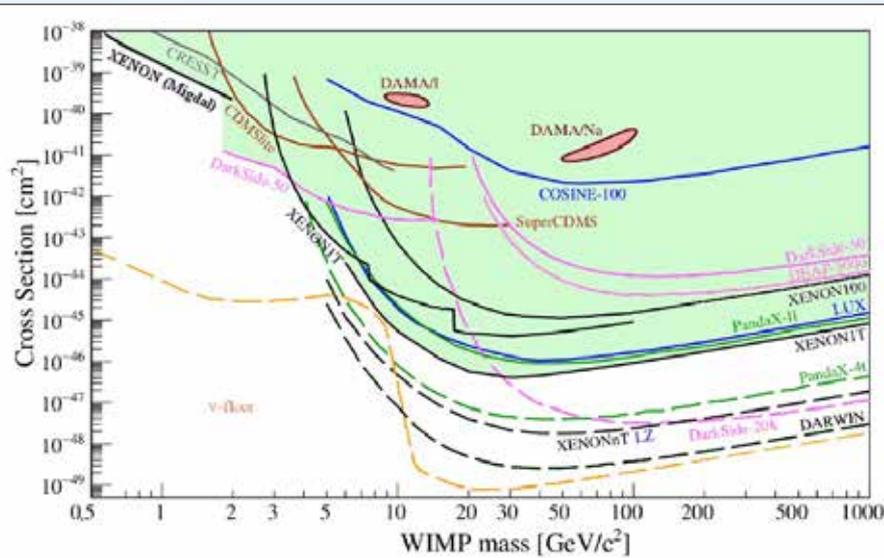
vé et la chasse aux WIMP sera poursuivie grâce à la mise à niveau du détecteur appelé XENONnT, dont la construction s'est terminée fin 2019 et qui commencera sa prise de données scientifiques au printemps 2020.

XENON1T a en outre pu explorer plusieurs modèles de matière noire : ALP, axions solaires, photons sombres et autres modèles de matière noire leptophilique, sans et avec dépendance au spin, avec médiateur lourd ou léger. En 2019 XENON1T a mesuré pour la première fois le phénomène très rare de la double capture électronique avec émission de deux neutrinos dans le ^{124}Xe , la plus longue demi-vie jamais mesurée directement.

Depuis son entrée dans la collaboration XENON en novembre 2016, l'équipe du LPNHE a contribué à trois aspects complémentaires décrits page 40.



Installation de la TPC de XENON1T dans les sous-sols du Laboratoire Nationale du Gran Sasso (LNGS).



État de l'art de la limite (90 % CL) de la section efficace SI (Spin Independent) WIMP-nucléon en fonction de la masse du WIMP. La limite est dominée surtout par les résultats de XENON1T. Les courbes en pointillé montrent les sensibilités pour les expériences futures avec des liquides nobles.

Système de détection

En collaboration avec les laboratoires LAL et Subatech, l'équipe a construit un nouveau système de stockage et récupération du xénon, nommé ReStoX2, qui est capable d'accueillir jusqu'à 10 tonnes de xénon en phase liquide, solide ou gazeuse. Ce nouveau système de stockage est devenu nécessaire pour XENONnT. L'échangeur de chaleur interne a été financé par le LPNHE grâce au programme DIM-ACAV+ de la région Ile-de-France. Il a été construit par l'entreprise DATE (La Motte d'Aveillans, France) et intégré dans le cryostat de ReStoX2 par l'entreprise Costruzioni Generali (Parabiago, Italie). Grâce à la puissance thermique de cet échangeur, le xénon gazeux peut être récupéré par cristallisation avec un débit d'une demi tonne par heure. En outre, l'ancien système ReStoX1 a été adapté pour transférer le xénon liquide à une vitesse d'une tonne par heure, une valeur jamais atteinte auparavant.

Calcul et traitement des données

L'équipe a contribué fortement à l'assemblage de l'infrastructure de calcul près du Gran Sasso : mise en service de deux serveurs qui gèrent 10 machines virtuelles, un serveur de disques de 200 TB, le réseau interne et l'intégration de la connexion VLAN à très haut débit, LHCone. Cette infrastructure a permis l'utilisation des ressources de la grille de calcul auprès du CC-IN2P3, notamment 1.4 PB de stockage et 12 millions d'heures de CPU de calcul (HS06.h) intégrées par an, utilisées tant pour le traitement des données que pour la simulation. Depuis 2019, l'équipe a la responsabilité de la conception de toute l'infrastructure de calcul de l'expérience et des outils d'analyse pour XENONnT et elle a développé un système de suivi de la qualité des données avec le groupe de l'université NYUAD à Abu Dhabi.

Analyse des données

L'équipe a travaillé sur trois axes : 1) l'analyse de modulation annuelle du bruit de fond, qui permet d'explorer l'éventuelle présence de matière noire dans le bruit de fond des reculs électroniques ; 2) l'analyse du bruit de fond à très faible énergie, où le signal dominant vient des électrons solitaires dont l'origine est encore sujet d'analyse et de débat ; ce signal a également permis d'améliorer la caractérisation du détecteur aux faibles énergies ; 3) la recherche de matière noire leptophilique subGeV, où le signal d'ionisation attendu est de l'ordre de quelques électrons.

L'équipe est aussi impliquée dans le projet DARWIN, un détecteur de 50 tonnes de xénon liquide qui sera capable de répondre à plusieurs questions dans le domaine de la physique des astroparticules : recherche de la matière noire, étude des neutrinos solaires, atmosphériques et de supernovae, recherche de la double désintégration beta sans émission de neutrino et de double capture électronique. L'équipe coordonne notamment le groupe de travail sur le traitement du xénon liquide.

Chercheurs et doctorants :

Sid El Moctar Ahmed Maouloud,
Luca Scotto Lavina, Jean-Philippe Zopounidis

Équipe technique :

Olivier Dadoun, Romain Gaior,
Patricia Warin-Charpentier

CHIFFRES CLEFS

Sensible aux WIMP à partir de
100 MeV

2×10^{-4} événements de bruit
de fond par kg·jour·keV

A la recherche de WIMP avec l'expérience DarkSide-20k

Cette expérience se déroule actuellement au laboratoire du Gran Sasso avec un détecteur de 50 kg, tandis qu'une TPC beaucoup plus grande, de 20 tonnes, est en cours de construction et devrait recueillir des données à partir de 2022.

En 2018, nous avons publié les nouveaux résultats de DarkSide-50, basés sur plus de 500 jours d'exposition.

DarkSide-50 a démontré le très grand pouvoir de discrimination de l'argon liquide (LAr) qui a permis de développer une coupure permettant de rejeter les reculs électroniques par rapport aux reculs nucléaires à un niveau inférieur à 10^{-7} . En outre, il a été le premier détecteur fonctionnant avec de l'argon extrait du sous-sol et naturellement appauvri en ^{39}Ar , un émetteur bêta qui limitait jusqu'à présent la possibilité de construire des expériences de recherche de matière noire de plusieurs tonnes basées sur l'argon liquide. Ainsi, la collaboration a effectué une recherche de WIMP de grande masse aboutissant à zéro événement de bruit de fond après analyse, sur toute la période d'exposition de l'argon. Ces résultats ont conduit à l'approbation en 2018 de DarkSide-20k, un détecteur à argon liquide de 20 tonnes qui sera construit par une collaboration internationale incluant tous les groupes travaillant sur la recherche de matière noire avec l'argon liquide.

En 2016 pour mieux comprendre la réponse de l'argon liquide, avec d'autres groupes français, italiens et américains, nous avons mené l'expérience ARIS, en exposant à la source de neutrons de l'IPNO Licorne une TPC fonctionnant à l'argon liquide. Grâce à ce dispositif, en 2018, nous avons publié les mesures les plus précises de la réponse de l'argon liquide aux reculs électroniques et nucléaires (*figure ci-contre*). Le recul nucléaire correspondant au signal est de bien moindre intensité que le recul électronique du bruit de fond.

CHIFFRES CLEFS

Meilleure limite pour des WIMP de basse masse
(3,5 GeV/c²)

Approbation de DarkSide-20k

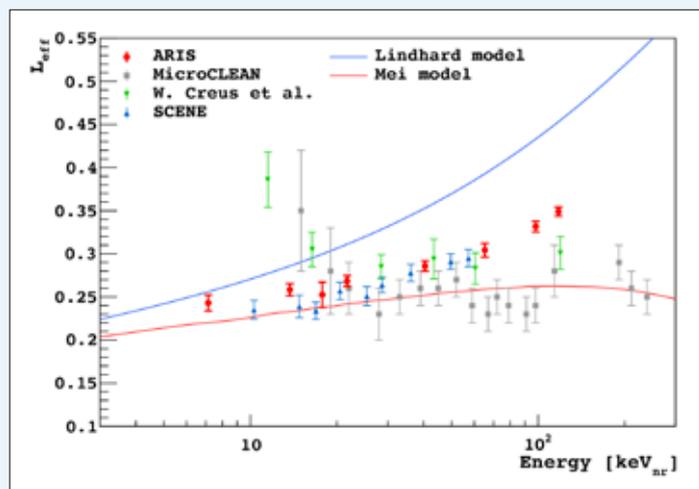
Ces résultats ont été fondamentaux pour la publication, en 2018 également, de la meilleure limite mondiale dans la recherche de WIMP de faible masse (entre 2 et 3,5 GeV), une analyse à laquelle une doctorante du laboratoire a fortement contribué. Pour ces résultats, DarkSide-50 a utilisé le seul signal d'ionisation pour explorer les faibles énergies déposées, où les WIMP de masse inférieure à 10 GeV sont attendus. La clef du succès a été la modélisation extrêmement précise du bruit de fond et de la réponse du détecteur. Le résultat obtenu avec DarkSide-50 a ainsi permis d'étendre d'un ordre de grandeur la zone d'exclusion des WIMP de masse inférieure à 5 GeV.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Claudio Giganti, Anyssa Navrer-Agasson, Julie Rode

Équipe technique :

Olivier Dadoun



Mesure de la réponse l'argon liquide aux reculs nucléaires obtenue avec l'expérience ARIS.

Asymétrie matière - antimatière

- LHCb : physique des saveurs lourdes au LHC
 - L'expérience LHCb et sa jouvence
 - Analyse de physique et fonctionnement de l'expérience
 - Le trajectographe à fibre scintillante (SciFi) pour la jouvence de LHCb
 - Le projet d'analyse en temps réel (RTA) pour la jouvence de LHCb
- De T2K à HK : la quête de la violation de CP dans le secteur leptonique
 - Analyse des données de T2K
 - Contributions techniques à la jouvence de ND280
 - De NA61/SHINE à T2K-II et à Hyper-Kamiokande
- Recherche d'un signal de physique au-delà du modèle standard de la physique des particules avec COMET
- Phénoménologie et Modélisation en Physique des Particules
 - Physique hadronique
 - Le moment magnétique anormal du muon a_μ

Asymétrie matière - antimatière

Une des grandes énigmes de la physique contemporaine est l'asymétrie observée entre matière et antimatière dans l'univers. En effet, toutes les observations sont compatibles avec un univers formé presque exclusivement par la matière, que ce soit dans notre système solaire ou dans les galaxies les plus lointaines. Toutefois le modèle cosmologique actuel est basé sur l'existence d'une phase primordiale, le *Big Bang*, où l'Univers était très dense et chaud et où, selon toute vraisemblance, il y avait autant de matière que d'antimatière. Comment donc expliquer l'asymétrie que l'on observe aujourd'hui ?

Cette question est probablement liée à des phénomènes au-delà du modèle standard de la physique des particules. Pour essayer de les cerner, plusieurs lignes de recherche ont été ouvertes, qui explorent les relations entre les trois familles de fermions (les particules de spin 1/2) qui forment la matière. En effet, dans le modèle standard ces familles sont reliées par des matrices de mélange, qui résultent de l'action de l'interaction faible et des interactions entre ces fermions et le boson de Higgs. Dans ces matrices il est possible de mettre en évidence une faible différence entre la matière et l'antimatière, d'origine inconnue : c'est la violation de la symétrie de Charge-Parité (CP). On parle de « physique de la saveur » pour définir cet ensemble de recherches, la « saveur » étant le nombre quantique qui différencie les fermions entre eux. Ainsi par exemple l'électron, qui entre dans la constitution des atomes, appartient à une famille qui comporte deux autres particules plus lourdes, le muon et le tau : cette famille, comme toutes les familles de fermions, comporte donc trois saveurs.

Une des particularités de ce domaine est de chercher des événements très rares, qui ne sont pas possibles dans le cadre du modèle standard. Pour ce faire, on doit pousser à leurs limites extrêmes en intensité les accélérateurs de particules, mais aussi les détecteurs et leurs systèmes de déclenchement et d'acquisition : un vrai défi technologique ! On parle alors de la frontière de la haute intensité. Le LPNHE a été très actif dans ce domaine depuis plusieurs décennies, notamment à travers les expériences DELPHI au CERN puis BaBar à SLAC (Californie) et les expériences d'étude des neutrinos.

L'expérience LHCb au CERN étudie les désintégrations rares des particules contenant des quarks b ou c, copieusement produites dans les interactions proton-proton à haute énergie. Grâce à ces études, elle a pu effectuer les mesures les plus précises de la matrice de mélange des quarks, dite matrice CKM. L'équipe du LPNHE étudie entre autres les modes rares de désintégration $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$, qui ne peuvent se produire dans le cadre du modèle standard que par le biais des particules virtuelles (diagrammes en boucle). Dans ces études, des anomalies sont apparues qui méritent d'être regardées de plus près. L'expérience prépare une jouvence majeure du détecteur pour faire face à une forte augmentation de l'intensité des faisceaux, et donc du taux d'événements : le laboratoire est très impliqué dans le développement de l'électronique de lecture pour un nouveau trajectographe.

En parallèle, grâce à un financement ERC Starting Grant, un projet très innovant a été lancé. Il s'agit d'une ferme de calcul basée sur une architecture hybride (une des options prévoit d'utiliser un cluster de GPU), avec des logiciels qui permettent une reconstruction et un filtrage en ligne des interactions. Un ensemble complexe d'opérations de reconnaissance des *patterns* est effectué à 40 MHz et permettra d'exploiter pleinement les événements intéressants pour les études de physique. Dans le cadre de ce projet, un partenariat avec le laboratoire LIP6 de Sorbonne Université a été noué, qui est appelé à se développer dans les prochaines années.

L'équipe du LPNHE est aussi force de proposition d'un nouveau projet, appelé CODEX-B, qui pourra explorer un possible secteur caché, c'est-à-dire l'existence de particules élémentaires aujourd'hui inconnues, interagissant faiblement avec la matière ordinaire, peut-être liées à la matière noire. Le détecteur en question serait consacré à la recherche de particules à longue durée de vie et se désintégrant à plusieurs dizaines de mètres du point d'interaction. Cet axe de recherche représente la poursuite des études initiées au laboratoire dans le cadre du projet SHIP.

Une autre ligne d'étude concerne les neutrinos, des particules élémentaires qui ont été récemment à l'origine de plusieurs découvertes retentissantes. En effet, la découverte des oscillations des neutrinos (une transformation du type de saveur de neutrino lors de sa propagation), démontre que ceux-ci ont une masse non nulle. L'origine de cette masse, par ailleurs inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celles des autres fermions élémentaires, est encore inconnue mais, pour l'expliquer, des phénomènes au-delà du modèle standard seront certainement nécessaires : par exemple l'existence de nouvelles particules ou de nouvelles interactions.

L'expérience T2K au Japon, qui utilise Super-Kamiokande comme détecteur lointain, a été à l'origine d'une importante découverte dans le domaine des oscillations des neutrinos en démontrant que l'angle θ_{13} de la matrice de mélange des neutrinos n'était pas nul. Récemment, elle a recueilli des indications du fait que cette matrice de mélange pour les neutrinos présente une violation de la symétrie Charge-Parité. Pour aller plus loin, une jouvence du détecteur proche est en cours, avec des détecteurs innovants aux performances fortement améliorées. Le LPNHE est engagé dans la conception des cartes électroniques pour de nouvelles chambres à projection temporelle.

L'annonce récente au Japon de l'approbation de l'expérience Hyper-Kamiokande, avec une masse fiduciaire huit fois plus importante que Super-Kamiokande, ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine. Hyper-Kamiokande sera certainement un acteur majeur dans la physique des neutrinos avec accélérateur, mais aussi dans les études des neutrinos en provenance du cosmos (neutrinos solaires, neutrinos provenant des supernovae, etc.). L'équipe du LPNHE prépare sa participation à cette expérience dans le domaine de la synchronisation précise des horloges pour l'électronique frontale.

Un dernier volet de ces recherches concerne l'expérience COMET, située dans le laboratoire J-PARC au Japon, qui étudie la conversion de muons en électrons. Par ces trois axes de recherche, le LPNHE est très fortement positionné dans un secteur qui pourrait apporter des surprises de taille. Ces études sont en effet sensibles à des phénomènes quantiques mettant en œuvre des échelles de masse qui peuvent arriver jusqu'à quelques milliers de TeV, largement supérieures aux énergies que l'on peut atteindre avec les accélérateurs.

L'expérience LHCb et sa jouvence

L'expérience LHCb est, à l'heure actuelle, la principale expérience de physique des saveurs. La conception du détecteur LHCb comme un spectromètre à bras unique situé vers l'avant est due au fait qu'au LHC les paires de hadrons beaux sont produites, de manière prédominante, dans un même cône à petit angle par rapport à l'axe du faisceau. Près du point d'interaction, un détecteur de vertex permet de reconstruire le point de désintégration du B avec une précision de 10 à 20 micromètres. Ce détecteur est essentiel pour l'étude de mésons B dont le temps de vie propre est de l'ordre de la picoseconde et la longueur de vol dans le détecteur est de l'ordre de quelques millimètres. Il est suivi par un premier élément, le détecteur de lumière Tchérenkov RICH (*Ring Imaging Cerenkov Counter*), qui permet l'identification des particules d'impulsion inférieure à 40 GeV environ. Vient ensuite un trajectographe composé de plusieurs instruments permettant ensemble une mesure précise de l'impulsion des particules chargées : un aimant dipolaire qui courbe les traces, en amont de ce dernier, des chambres à micro-pistes de silicium, et en aval trois stations composées de micro-pistes de silicium (près de l'axe du faisceau) et de chambres à dérivées gazeuses (à l'extérieur). Après ce système de trajectographie, il y a un deuxième compteur RICH pour l'identification des particules d'impulsion supérieure à 40 GeV, un système de calorimètres électromagnétique et hadronique et un système d'identification des muons qui jouent tous les trois un rôle dans le déclenchement.

A l'heure actuelle le détecteur LHCb est en train d'évoluer vers sa phase de jouvence, qui consiste au remplacement de plusieurs sous-détecteurs, parmi lesquels le trajectographe, et d'une grande partie de la chaîne d'acquisition. Le concept du système de déclenchement sera radicalement modifié et une reconstruction des événements sera effectuée en temps réel et gérée par le projet RTA (*Real Time Analysis*, i.e. analyse en temps réel). Grâce à

CHIFFRES CLEFS

125 articles d'analyse de physique publiés entre juillet 2017 et décembre 2019
Au total, **506** articles d'analyse de physique jusqu'à fin 2019
A la fin du *Run 2* du LHC, l'expérience LHCb a enregistré environ **9 fb⁻¹**

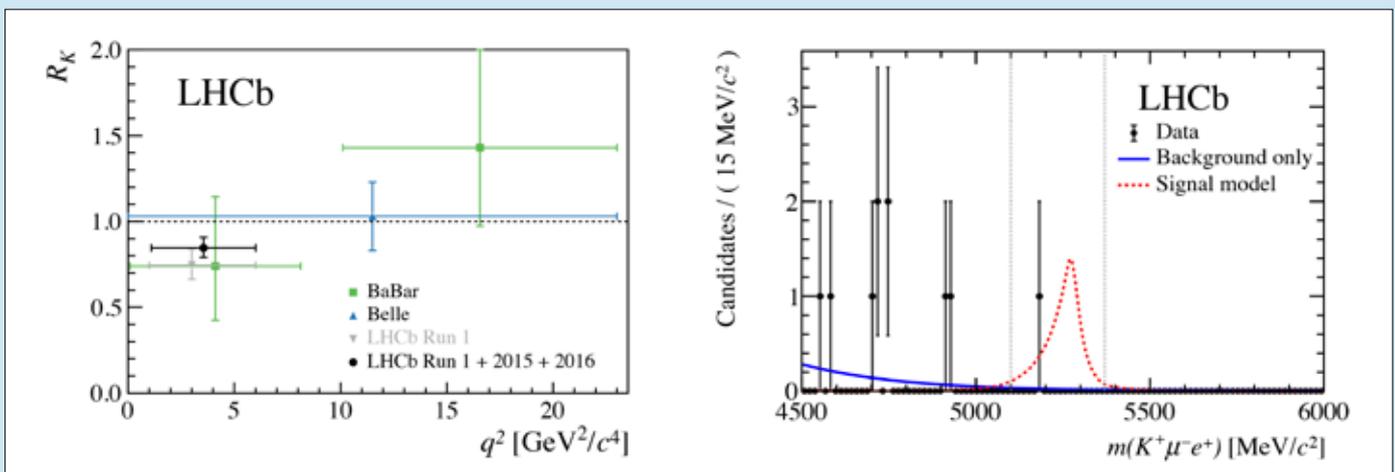
ces changements, le détecteur deviendra plus efficace, plus flexible et sera adapté à des taux d'occupation plus élevés. Il permettra d'enregistrer environ dix fois plus de collisions proton-proton que par le passé.

En plus de sa contribution aux analyses de physique, le groupe du LPNHE est fortement impliqué dans la jouvence de LHCb, à la fois dans le trajectographe à fibres scintillantes (SciFi) et dans le projet RTA.

Analyse de physique et fonctionnement de l'expérience

Les analyses de physique effectuées dans le groupe portent essentiellement sur deux axes : l'étude de désintégrations semi-leptoniques du type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^-$ ($\ell^{(\prime)}$ =lepton) et $b \rightarrow c \ell^+ \nu$, pour l'étude de l'universalité et de la violation de la saveur leptonique, et des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. De plus le groupe s'est impliqué dans plusieurs études de hadrons charmés, de spectroscopie, de violation de symétrie CP et dans des recherches de nouvelles particules. Parmi ces études, nous comptons la découverte du baryon doublement charmé Ξ_{cc}^{++} . L'étude des canaux de type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^-$ est l'un des sujets phares de l'expérience LHCb. Dans le modèle standard, lorsque ℓ et ℓ' ont la même saveur leptonique, le proces-

sus fait intervenir uniquement les diagrammes dits pinquins électrofaibles ou en boîte et est donc fortement supprimé. De nouvelles particules pourraient intervenir dans ces boucles et avoir une contribution d'amplitude comparable aux processus standards. Ces canaux sont donc sensibles à des phénomènes de physique non décrits par le modèle standard, comme dans le cas des modèles mettant en jeu des mécanismes de Higgs non-standard, des leptoquarks ou différents modèles de supersymétrie. Le groupe a participé à la mesure des rapports $R_{K^{(*)}}$, entre les taux des désintégrations $B^{+(0)} \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$ et $B^{+(0)} \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-$. Ces rapports doivent être proches de l'unité selon le principe de l'universalité leptonique de l'interaction électrofaible du modèle standard, mais certains résultats de LHCb dévient significativement de ces prédictions. Comme la non-universalité de la saveur leptonique pourrait impliquer la violation directe de la saveur leptonique, nous avons élargi le champ vers la recherche des modes $B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell'^-$ avec deux leptons de saveurs différentes : $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$, $B^+ \rightarrow K^+ \tau^+ \mu^-$ et $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ \mu^-$. Si ces modes sont observés, il s'agit d'une preuve directe et non ambiguë de présence de physique non décrite par le modèle standard. Le dernier résultat obtenu par LHCb pour le rapport R_K et la distribution de la masse invariante des candidats $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$ sont montrés dans les figures ci-dessous.



Le dernier résultat obtenu par LHCb pour le rapport R_K (à gauche), montré aux Rencontres de Moriond 2019, confirme les tensions observées auparavant avec les prédictions du modèle standard, où une universalité leptonique est attendue. Par ailleurs, la mesure de l'efficacité de reconstruction d'électrons, qui a été effectuée par notre groupe, augmente la confiance dans la robustesse de ce type de mesure.

Les tests d'universalité leptonique et leurs tensions observées avec le modèle standard motivent les recherches directes de violation de la saveur leptonique avec des leptons chargés. Une recherche de ce type, dans le canal $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$, est effectuée par le groupe et des résultats ont été publiés en 2019. La figure à droite montre la masse invariante des candidats $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$. La distribution attendue pour 10 événements de signal (courbe rouge) est superposée à la distribution du bruit de fond (courbe bleue) obtenue par un ajustement des données (points noirs avec barres d'erreur). L'absence de signal observé améliore d'un ordre de grandeur les limites existantes et pose des contraintes sur les modèles de nouvelle physique.

Le groupe effectue également un test de la violation de l'universalité leptonique dans les canaux de type $b \rightarrow c \ell^+ \nu$, via la mesure du rapport R_D entre les taux des désintégrations $B^+ \rightarrow D^{*0} \mu^+ \nu_\mu$ et $B^+ \rightarrow D^{*0} e^+ \nu_e$. Ces méthodes bénéficient d'une mesure, effectuée au LPNHE, de l'efficacité de reconstruction d'électrons dans le détecteur, basée sur les désintégrations $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ avec $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$.

L'étude des modes de désintégration des mésons B sans particule charmée fournit elle aussi des tests du modèle standard et présente une variété d'intérêts théoriques : elle peut notamment fournir les mesures des phases de mélange des mésons B neutres dans des processus en boucle et les contraintes sur l'angle γ du triangle d'unitarité. Une particularité de ce type d'analyse dans LHCb est la possibilité d'étudier à la fois les désintégrations du méson B_s et du méson B_d . Le groupe participe à la mesure des rapports d'embranchement des modes $B_{d,s} \rightarrow K^0_S h^+ h^-$, ($h^0 = K, \pi$) avec l'ensemble des 9 fb^{-1} de données disponible. Elle contient notamment trois modes de désintégration du méson B_s . Une analyse dans le plan de Dalitz du mode $B^0 \rightarrow K^0_S K^+ K^-$ est en cours. Ces analyses se

poursuivent, car il s'agit d'un travail de long terme qui progresse par étapes de complexité croissante. À terme, le but est d'effectuer une analyse dépendante du temps et utilisant l'étiquetage de saveur, afin de mesurer les phases de mélange des mésons B neutres, β et β_s , dans ces processus. Dans le deuxième cas, une telle mesure n'a jamais été effectuée.

Des membres du groupe ont assuré entre 2017 et 2019 de nombreux rôles de responsabilité dans la collaboration LHCb. Nous rappelons ici en particulier les rôles de coordinateur de la physique, coordinateur adjoint de la physique, coordinateur du bureau *Early Career, Gender & Diversity* ainsi que la coordination de plusieurs groupes de travail de la collaboration. Les rôles de responsabilité liés à la jouvence de LHCb sont mentionnés plus bas. Nous avons contribué à plusieurs tâches autour de la prise des données et à la revue d'analyses. Les membres du groupe ont participé à l'organisation de plusieurs événements scientifiques, dont une partie a eu lieu au LPNHE. Un projet d'un membre du groupe a obtenu un financement ERC Consolidator Grant, et un autre auprès de l'ANR.

Le trajectographe à fibre scintillante (SciFi) pour la jouvence de LHCb



Les modules du détecteur SciFi, en phase de montage en surface, avant d'être descendus dans la caverne de l'expérience LHCb pour y être intégrés.

Le premier trajectographe de LHCb n'est pas adapté à la prise de données qui aura lieu à partir de 2021, car le taux d'occupation sera trop élevé à cause de la haute luminosité qui sera fournie par le LHC. Cette composante est donc en train d'être remplacée par un sys-

tème, appelé SciFi, basé sur trois stations composées de fibres scintillantes lues à leurs deux extrémités par des photomultiplicateurs en silicium (SiPM). Une photographie des stations du SciFi qui sont en train d'être montées est montrée dans la figure ci-contre. Le nouveau système a une bonne résistance aux radiations, une granularité spatiale fine et permet la reconstruction de traces au niveau du système de déclenchement. Après un premier traitement du signal des SiPM par l'électronique *Front End*, les données du SciFi sont transmises à la ferme de calcul par liaison optique via des cartes de lecture génériques : les PCIe40. Elles constituent l'électronique dite *Back End*.

Deux axes se sont dessinés pour nos activités. D'une part nous contribuons aux aspects de simulation et de reconstruction. Certains de ces aspects, notamment les logiciels de géométrie du détecteur et la trajectographie avec le seul SciFi, qui est nécessaire pour la reconstruction des traces issues de la désintégration de particules

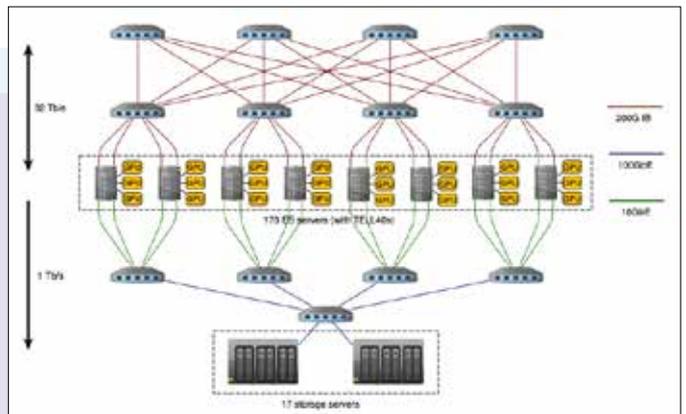
Le projet d'analyse en temps réel (RTA) pour la jouvence de LHCb

Une partie de la jouvence de LHCb consiste à éliminer le premier niveau du système de déclenchement *hardware*, dont le taux d'acceptation était de 1 MHz. Ainsi, l'expérience fonctionnera avec un système de déclenchement purement logiciel qui traitera la totalité des événements détectés au rythme du croisement des faisceaux du LHC d'environ 30 MHz. Le détecteur produira un débit maximal de 40 Tbit/s de données, qu'il sera nécessaire de réduire afin de pouvoir les stocker. C'est la raison pour laquelle la reconstruction complète des événements sera effectuée en temps réel et la majorité des données brutes du détecteur sera éliminée. Ce processus et les systèmes qui l'effectuent sont au cœur du projet d'analyse en temps réel (RTA), dirigé par l'un des membres de notre groupe. Ce projet compte plus de 100 collaborateurs, avec environ 50 ETP (Équivalent Temps Plein), venant de plus de 30 instituts de la collaboration LHCb.

Le groupe du LPNHE a effectué plusieurs contributions techniques au projet RTA, parmi lesquelles nous comptons le travail autour de la reconstruction des traces mentionné plus haut, les algorithmes de traitement de données du détecteur de vertex et la reconstruction de ces traces à l'aide d'un algorithme à base de calcul parallèle. Ces développements, utilisant des méthodes sophistiquées, ont permis d'optimiser à la fois la vitesse des algorithmes et l'utilisation de ressources. Cette optimisation est naturellement l'un des principaux défis du projet RTA.

La conception d'un système de déclenchement entièrement logiciel pouvant assurer, avec le flux de données

neutres de longue durée de vie, ont été pris en charge par le groupe. D'autre part, nous avons une activité autour de l'électronique de *Back End*. Le LPNHE a été impliqué dans le développement et l'implémentation du microcode des cartes PCIe40, spécifique au système SciFi, ainsi que du test des logiciels d'acquisition dédiés. À l'heure actuelle il participe à l'installation des cartes et leur intégration dans la chaîne d'acquisition globale. Un ingénieur du groupe est le coordinateur de l'électronique *Back End* du SciFi dans la collaboration LHCb.



La partie haute du schéma illustre les données venant du détecteur à l'entrée du système de déclenchement, à un débit de 32 Tb/s. La partie du milieu représente le cœur du projet Allen : ce sont les serveurs qui reconstruisent les événements, avec trois GPUs chacun, produisant 1 To/s de données. La partie basse représente le système de stockage, où les données de sortie de la partie Allen sont mises en attente d'alignement et de calibration en temps réel, avant d'être transmises au CPU de la deuxième partie du système de déclenchement, le HLT2.

envisagé, les performances physiques requises présente un réel défi. Une autre contribution du LPNHE afin de relever ce défi est le projet *Allen*, qui propose d'effectuer la première étape du déclenchement, dit le HLT1, à l'aide de 500 unités de GPU (processeur graphique). Ceci est le tout premier système de ce type. Avec une forte contribution de notre groupe, une démonstration de faisabilité a été réalisée et le projet est actuellement l'un des choix technologiques possibles, en cours d'évaluation par la collaboration LHCb¹. Un schéma du système de déclenchement pour la jouvence de LHCb, incluant la partie *Allen*, est montré dans la figure ci-dessus.

¹-Ce projet a été choisi par la collaboration LHCb en juin 2020.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Eli Ben-Haïm, Emilie Bertholet, Pierre Billoir, Matthew Charles, Luigi Del Buono, Giulio Dujany, Vladimir Gligorov, Thomas Grammatico, Andréa Mogini, Francesco Polci, Renato Quagliani, Florian Reiss, Arnaud Robert, Dorothea vom Bruch, Steffen Weber, Da Yu Tou

Équipe technique :

Olivier Le Dortz, Jean-Luc Meunier, Diego Terront

CHIFFRES CLEFS

Le projet RTA compte plus de **100** collaborateurs de plus de **30** instituts

De T2K à HK : la quête de la violation de CP dans le secteur leptonique

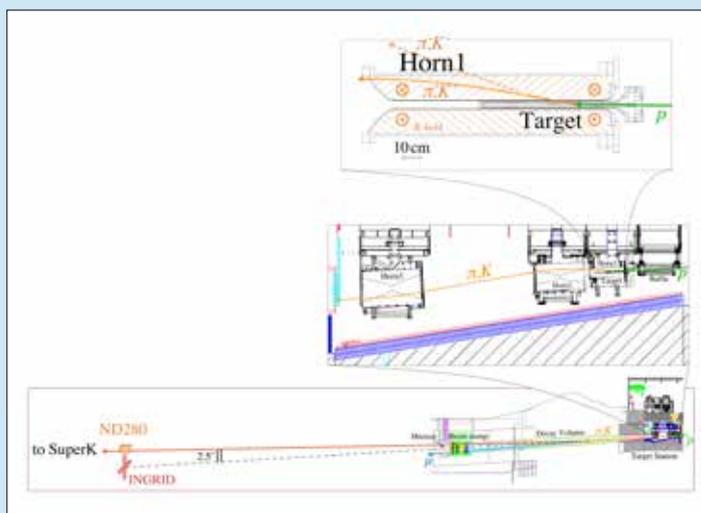
Le groupe neutrino du LPNHE, engagé dans l'expérience T2K depuis 2006, continue à y participer activement en veillant au bon fonctionnement du détecteur proche ND280, au développement des différents logiciels, à la calibration et à l'ana-

lyse des données ainsi qu'à la préparation des publications. Le groupe joue aussi un rôle clef dans le projet d'amélioration de ND280 ainsi que dans la partie dite neutrinos de l'expérience NA61/SHINE.

Analyse des données de T2K

Dans l'expérience T2K, installée au Japon, un faisceau de neutrinos ou d'antineutrinos de type muonique est produit au centre de recherche J-PARC (Tokai), sur la côte Est du Japon et envoyé en direction du détecteur souterrain géant Super-Kamiokande (SK), 295 km plus loin (*figure ci-dessous*). De très importants résultats ont été obtenus et publiés ces dernières années. Ils concernent en particulier la première mise en évidence d'une

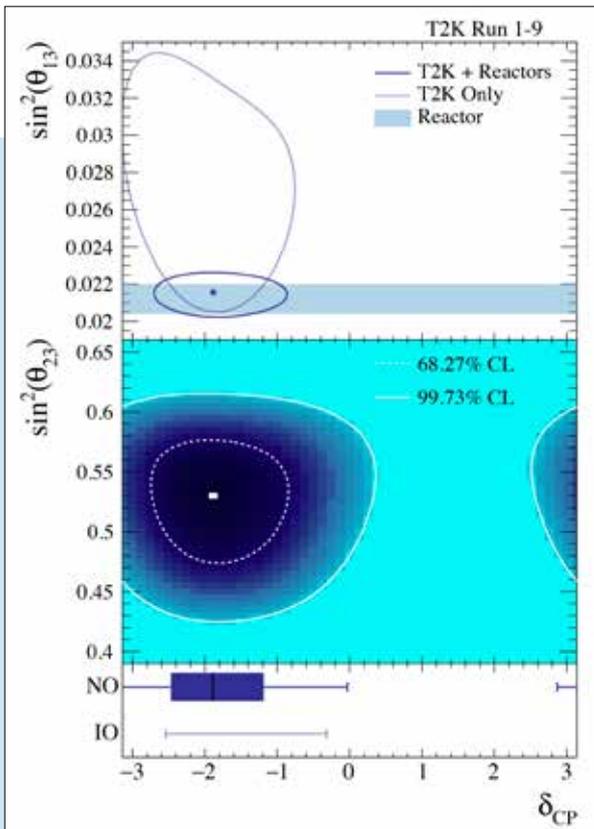
apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau de neutrinos muoniques. Malgré une intensité de faisceau encore éloignée de l'intensité nominale (500 kW au lieu de 750 kW), la collaboration accumule des données depuis plusieurs années en neutrinos et antineutrinos alternativement. En combinant récemment les analyses d'apparition de neutrinos et d'antineutrinos électroniques ainsi que les analyses de disparition des neutrinos et antineutrinos muoniques, la collaboration a été à même de publier dans le journal « Nature » des résultats excluant certaines zones de l'ensemble des valeurs possibles de δ_{CP} (*figure ci-contre*) à trois écarts-standard : δ_{CP} est le paramètre mesurant le degré de violation de la symétrie CP, où C et P sont les opérateurs de conjugaison de charge et de parité, respectivement. La valeur qui ajuste au mieux ce paramètre est proche de $-\pi/2$, correspondant à une violation maximale de CP. Pour affiner ce résultat, il ne suffit pas de continuer à accumuler des données. Les limitations identifiées des détecteurs actuels se traduisent en effet par des incertitudes systématiques dominantes et elles ont conduit la collaboration à s'engager dans un programme d'amélioration majeur du détecteur proche ND280.



Détails de la ligne de faisceau de T2K avec ses différents éléments comme la cible ou les aimants de focalisation (horns).

CHIFFRES CLEFS

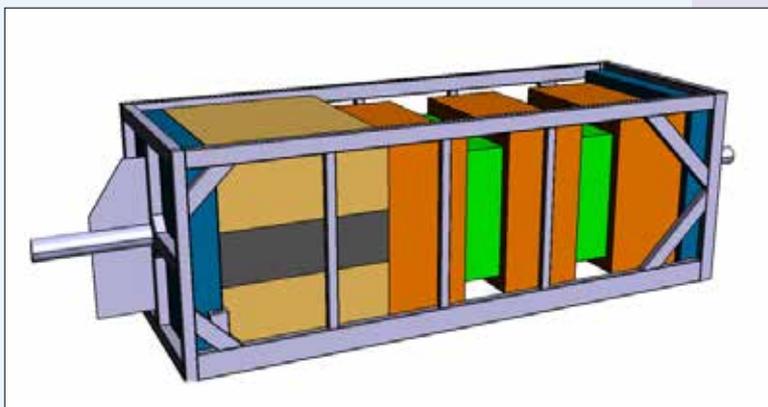
T2K a accumulé
 3×10^{21} protons sur
cible en mai 2019



La partie supérieure de la figure présente en 2 dimensions l'intervalle de confiance à 68,27% de δ_{CP} en fonction de $\sin^2\theta_{13}$ pour l'ordre normal des masses. Le contour appelé « T2K » donne le résultat obtenu sans contraintes extérieures sur la valeur de $\sin^2\theta_{13}$ alors que le contour appelé « T2K + Reactor » les utilise. L'étoile montre le meilleur ajustement obtenu dans le cas « T2K + Reactor » et dans l'hypothèse d'un ordre normal des masses. Au milieu, on retrouve l'intervalle de confiance à 68,27 % et à 99,73 % de δ_{CP} en fonction de $\sin^2\theta_{23}$ dans le cas « T2K + Reactor » et dans l'hypothèse d'un ordre normal de masse, les couleurs donnent la valeur de la vraisemblance pour la valeur de chacun des paramètres. La partie inférieure montre l'intervalle de confiance à une dimension, résultat de l'ajustement de δ_{CP} pour le cas « T2K + Reactor » dans l'hypothèse d'un ordre normal des masses (NO) et d'un ordre inversé (IO). La ligne verticale dans la partie ombragée montre la meilleure valeur de l'ajustement de δ_{CP} , la partie ombragée montre l'intervalle de confiance à 68,27 % et les barres d'erreur montrent l'intervalle de confiance à 99,73 %. Pour le cas de l'ordre inversé, il n'y a pas de valeurs dans l'intervalle à 68,27 %.

Contributions techniques à la jouvence de ND280

Cette jouvence va consister à introduire une nouvelle cible pour les neutrinos, constituée de 2 millions de cubes scintillants d'un cm^3 et à compléter l'acceptance pour les particules chargées à grand angle en installant deux nouvelles chambres à projection temporelle (HA-TPC) (figure ci-dessous). Dans ce cadre-là, le groupe joue un rôle de coordination et contribue au développement et à la production de l'électronique de lecture des nouvelles TPC. Les premières maquettes de cartes *Front End*, n'intégrant que quelques fonctionnalités ciblées, ont été réalisées et testées en 2019, afin notamment de valider le choix d'une nouvelle connectique : liaisons carte à carte par connecteurs à technologie dite flottante. Suite à cette validation, les premiers prototypes entièrement fonctionnels ont été fabriqués fin 2019. Les tests réalisés au début de l'année 2020, en collaboration avec le CEA/Irfu, ont donné des résultats extrêmement positifs en vue du lancement de la production des 80 cartes prévu fin 2020 pour la jouvence du détecteur.



Vue d'ensemble du détecteur proche ND280 après sa jouvence : les boîtes oranges correspondent à la nouvelle TPC (HA-TPC) et la boîte grise à la nouvelle cible pour les neutrinos (SuperFGD).

En parallèle, le groupe contribue également de manière active sur deux autres aspects de cette jouvence : d'une part au développement du logiciel de contrôle-commande qui servira à monitorer le détecteur, d'autre part à la définition des modifications mécaniques devant être apportées au berceau du détecteur ND280, incluant la problématique des contraintes sismiques inhérentes au lieu d'implantation de l'expérience.

De NA61/SHINE à T2K-II et à Hyper-Kamiokande

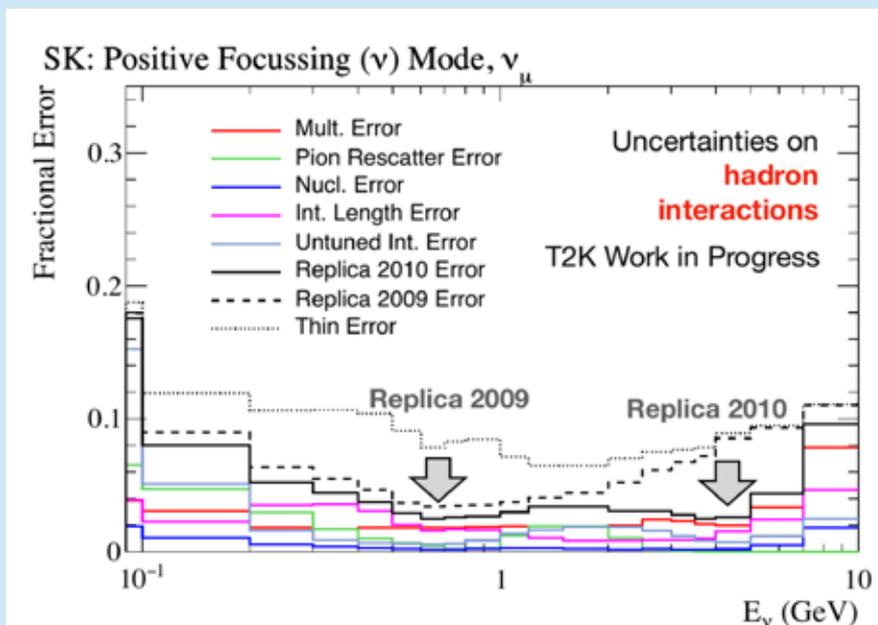
L'installation de la nouvelle version du détecteur ND280 aura lieu en 2021, parallèlement à la rénovation du complexe d'accélérateurs de J-PARC destinée à augmenter significativement l'intensité des faisceaux de neutrinos d'abord à 750 kW, puis à 1 MW et à plus long terme à 1.3 MW. L'expérience prévoit d'accumuler au moins 10^{22} protons sur cible avant 2026 et la mise en service du détecteur de nouvelle génération Hyper-Kamiokande. Cette expérience, appelée T2K-II, bénéficiera non seulement de la réduction des incertitudes systématiques liées au détecteur proche, mais aussi des avancées de l'expérience NA61/SHINE à laquelle le groupe contribue également : utilisant une réplique de la cible de T2K, NA61/SHINE a publié récemment de nouveaux résultats de hadroproduction d'une grande importance pour arriver à réduire les incertitudes sur les flux de (anti)neutrinos dans T2K aux environs de 5%, valeur sans précédent pour des neutrinos d'accélérateur (*figure ci-dessous*). Outre les paramètres d'oscillation, cette réduction des

incertitudes est également importante pour une mesure précise des sections efficaces d'interaction des neutrinos.

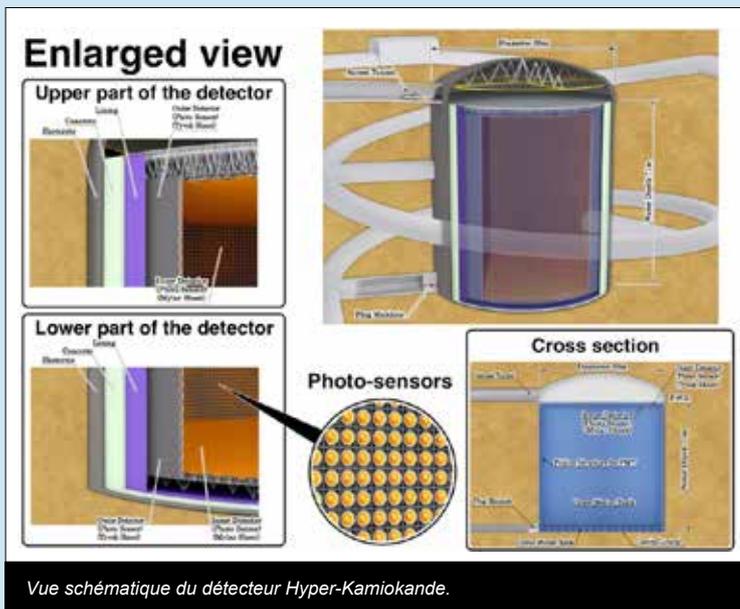
La sensibilité de T2K-II devrait permettre de mesurer une violation de CP à 3 sigmas si celle-ci était maximale ($\delta_{CP} = -\pi/2$), mais une vraie découverte (à 5 sigmas) nécessitera le recours à une nouvelle génération d'expérience d'oscillation de neutrinos à grande distance : Hyper-Kamiokande (HK).

Le projet HK (*figure ci-contre*) a reçu fin 2019 l'approbation du gouvernement japonais et la collaboration se structure pour démarrer la construction dès 2020. Outre le fait qu'il s'agira du détecteur le plus sensible pour la mesure de la violation de CP, Hyper-Kamiokande, avec 8 fois plus de masse fiducielle que Super-Kamiokande, sera aussi un observatoire unique pour l'étude de neutrinos de sources astrophysiques et pour celle de la désintégration possible du proton. Le groupe du LPNHE a déjà défini des contributions techniques potentielles à l'expérience et démarre une phase de R&D pour 2020-2021. Une des contributions serait le développement d'un système de distribution d'horloge et de synchronisation

pour un ensemble pouvant compter jusqu'à 40 000 photomultiplicateurs, système qui permettra de réduire l'incertitude temporelle à moins d'une nanoseconde. Cette maîtrise de la certification du temps est un atout majeur pour les études astrophysiques dites en multi-messager, menées conjointement avec d'autres observatoires, comme ceux de l'astronomie gamma, CTA par exemple dans lequel une autre équipe du LPNHE est engagée.



Réduction significative des incertitudes systématiques sur le flux de neutrinos muoniques de T2K obtenue grâce aux résultats récents publiés par NA61/SHINE sur la mesure de la production de hadrons avec la cible réplique de T2K.



Vue schématique du détecteur Hyper-Kamiokande.

Le nouveau détecteur lointain d'Hyper-Kamiokande sera aussi équipé de modules composés de plusieurs photomultiplicateurs de plus petite taille (mPMT) à hauteur de plusieurs milliers. L'intégration de tels détecteurs avec un seuil en détection plus faible et une meilleure reconstruction temporelle permettra d'améliorer la détection des neutrinos de plus faible énergie comme les neutrinos de supernovae ou bien les neutrinos solaires. Une étape importante pour le développement des prototypes de ces modules est la caractérisation de leurs performances dans l'eau. Pour réaliser ces mesures, l'installation Memphyno à l'APC est mise à contribution : ce dispositif est composé d'une cuve à eau de 8 m³ pouvant accueillir plusieurs mPMT et de deux plans de scintillateurs permettant de détecter le passage de muons cosmiques. Un soutien obtenu de la part de Sorbonne Université nous permettra d'accueillir plusieurs prototypes. Des mesures ont d'ailleurs déjà été effectuées fin 2019 avec un prototype italien et ont permis de produire les premières caractérisations de ce prototype.

Chercheurs et doctorants :

Bernard Andrieu, Simon Bienstock, Alain Blondel, Jacques Dumarchez, Claudio Giganti, Mathieu Guigue, Jean-Michel Levy, Viet Nguyen, Matej Pavin, Boris Popov, Ciro Riccio, Marco Zito

Équipe technique :

William Ceria, Yann Orain, Jean-Marc Parraud, Julien Philippe, Éric Pierre, Stefano Russo, Diego Terront, François Toussenet

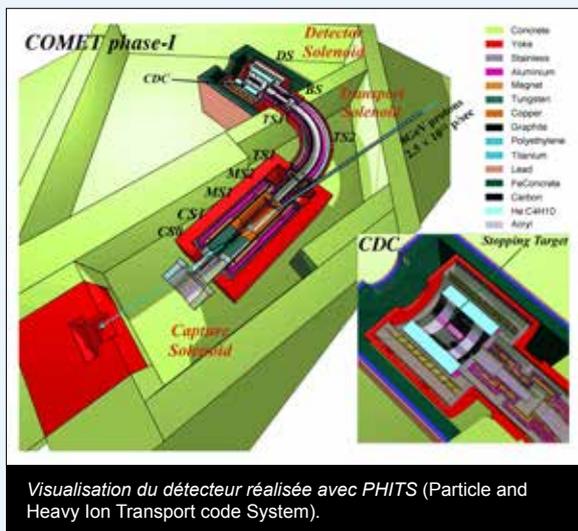
CHIFFRES CLEFS

T2K-II : **2 millions** de cubes scintillants comme nouvelle cible pour les neutrinos dans T2K-II

HK : **260 000** tonnes d'eau pour la nouvelle génération de détecteur Tchérénkov à eau de HK

Recherche d'un signal de physique au-delà du modèle standard de la physique des particules avec COMET

La recherche d'événements rares, comme la transition cohérente de muons en électrons assistée par un noyau, donne accès à des échelles d'énergie inatteignables au LHC. L'expérience COMET (*Coherent Muon to Electron Transition*) à J-PARC, soutenue par l'IN2P3 à travers la collaboration COMET-France, vise une sensibilité sur le rapport d'embranchement de cette transition de 3×10^{-15} pour la Phase I et 3×10^{-17} pour la Phase II. La Phase I (*figure ci-dessous*) permet-



tra de caractériser le faisceau et les divers bruits de fond ainsi que de tester les détecteurs qui permettront d'améliorer la mesure de l'électron que l'on espère identifier et mesurer avec une plus grande précision dans la Phase II (*figure ci-contre*). Une mise en évidence de la violation du nombre leptonique dans le secteur chargé serait une preuve de physique non décrite par le modèle standard et pourrait discriminer entre les modèles théoriques alternatifs. Dans le cas contraire, les limites imposées donneront matière à réflexion aux physiciens.

Au sein de la collaboration française, nous contribuons principalement à l'amélioration de la reconstruction de traces avec la mise en œuvre de nouveaux algorithmes et à la gestion du calcul de l'expérience, avec les ingénieurs du CCIN2P3. Le stockage des productions massives de données simulées et leur partage, ainsi que l'accueil du logiciel de l'expérience avec un espace de tra-

vail pour les membres de la collaboration, constituent une contribution technique importante pour le succès futur de COMET, dont les détecteurs sont actuellement en phase de test et d'intégration dans le système d'acquisition central.

Dans le cadre de la stratégie européenne pour la physique des particules, nous avons non seulement participé à l'élaboration de documents dans le cadre de COMET avec nos collègues européens, mais aussi avec des membres européens d'autres expériences, impliqués dans la recherche de la violation de la saveur leptonique, utilisant des faisceaux intenses de muons, comme Mu2e, Mu3e et MEG.

Avec l'aide du Labex ILP, nous avons pu recevoir un professeur de l'IHEP de Beijing pendant trois semaines fin 2019.

Il est à noter que, dans le cadre d'une recherche de physique non décrite par le modèle standard, nous sommes aussi signataires de l'expérience g-2/EDM à J-PARC avec une contribution aux logiciels de l'expérience et une aide à la simulation, en coordination avec le CCIN2P3.

Chercheurs :

Wilfrid da Silva, Frédéric Kapusta

Équipe technique :

Patricia Warin-Charpentier

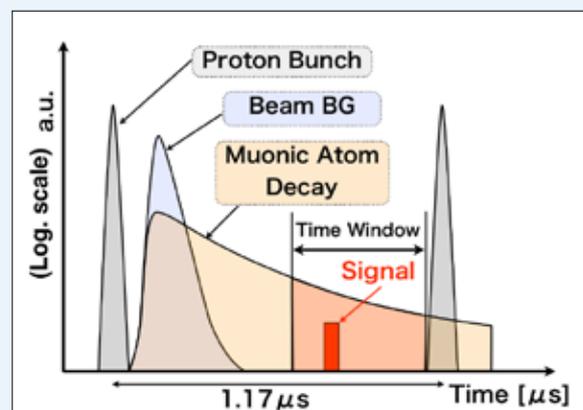
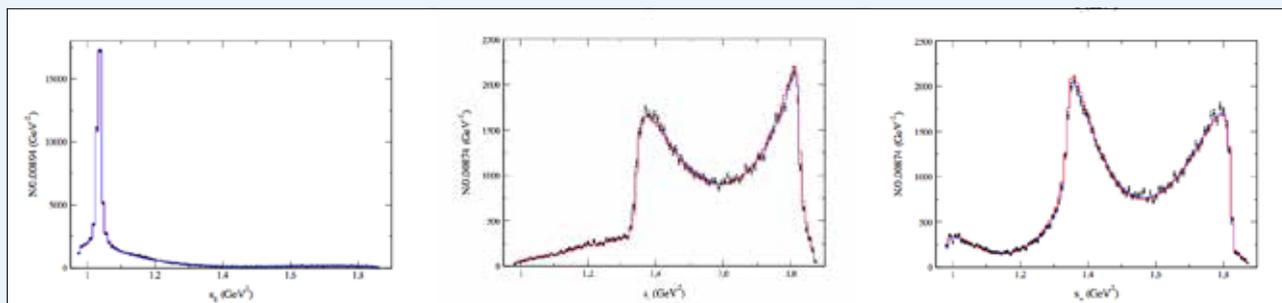


Schéma de principe pour la mesure du signal.



Projections du diagramme de Dalitz pour la désintégration $D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$. Les points correspondent aux données expérimentales de BaBar (erreurs statistiques). Les histogrammes bleu (modèle A) et rouge (modèle B) représentent les deux meilleures reproductions contraintes théoriquement par notre modèle de factorisation.

Physique hadronique

En collaboration avec des collègues polonais, des membres du groupe ont analysé les dernières données de BaBar sur les désintégrations $D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ dans le cadre d'un modèle de factorisation à deux corps. Les interactions de l'état final kaon-kaon dans l'onde S sont décrites en termes de facteurs de forme scalaires-isoscalaires et scalaires-isovecteurs. Ceux-ci sont calculés à partir, soit de modèles relativistes unitaires d'équations couplées (modèle A), soit d'un formalisme de relations de dispersion basé sur les équations Muskelishvili-Omnès (modèle B). Les amplitudes obtenues, théoriquement contraintes et reproduisant au mieux les distributions expérimentales du diagramme de Dalitz (*figure ci-dessous*), devraient permettre une meilleure détermination de l'angle CKM γ dans les analyses des désintégrations $B^\pm \rightarrow D^0 K^\pm$ avec $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ et $D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$.

Une partie du groupe s'est aussi intéressée à la description des atomes antiprotoniques légers, l'objectif

étant de préciser l'énergie de l'état quasi-lié nucléon-antinucleon d'onde P . Son effet sur l'absorption de l'antiproton sur les noyaux (étude prévue dans l'expérience PUMA au CERN) doit être comprise. Notre étude des niveaux et largeurs du deutérium et de l'hélium antiprotoniques indique une énergie d'environ -8 MeV alors que les versions 99 et 09 du potentiel nucléon-antinucleon dit « Potentiel de Paris » donnent respectivement -17 et -4,5 MeV. Cela va nécessiter une mise à jour du Potentiel de Paris.

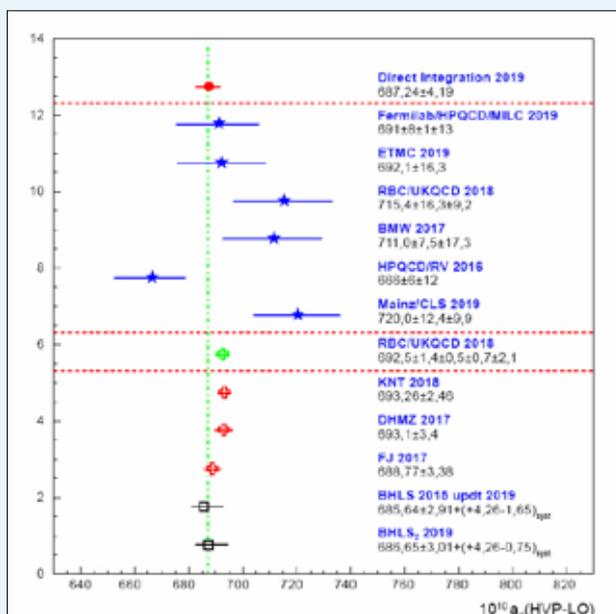
Le moment magnétique anormal du muon a_μ

La contribution hadronique à la polarisation du vide photonique pour le calcul de a_μ est délicate à estimer précisément. Une collaboration menée depuis 2012 a conduit à une nouvelle méthode d'évaluation basée sur le lagrangien effectif du modèle HLS et sur un mécanisme de brisure des symétries SU(2) et SU(3), mise au point au LPNHE et fournissant une solution élégante au puzzle « τ versus e^+e^- ».

L'estimation de a_μ basée sur cette méthode lagrangienne donne un écart de plus de 4σ avec la mesure expérimentale effectuée à BNL. La contribution hadronique à la polarisation du vide photonique, $a_\mu(\text{LO-HVP})$, est $(681.86 \pm 3.20) \times 10^{-10}$ au lieu de $(683.50 \pm 4.75) \times 10^{-10}$ déduite auparavant par des méthodes standards (*figure ci-contre*). Cette amélioration de l'incertitude est cruciale pour comparer les prédictions avec les mesures planifiées à Fermilab et à J-PARC.

Chercheurs :

Maurice Benayoun, Jean-Pierre Dedonder,
Luigi Delbuono, Benoît Loiseau



Masses et interactions fondamentales

- Physique du boson de Higgs dans ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du modèle standard
 - Des mesures de plus en plus précises des propriétés du boson de Higgs
 - Recherche de physique au-delà du modèle standard : le problème de la matière noire et autres questions ouvertes.
- Mesure de la masse du quark top dans ATLAS
- Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans ATLAS
- Jouvence du détecteur ATLAS
 - ATLAS ITk – R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération
 - . Des capteurs minces et résistants aux radiations pour l'ITk
 - . Une solution innovante pour le système de refroidissement : les micro-canaux
 - . Puces de *Front End* avancées
 - . Reconstruction de la trajectoire des particules en temps réel
 - Études et réalisations du détecteur HGTD
- R&D
 - Conception des détecteurs pour ILC : le programme de R&D CALICE
 - Activité de prospective sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs : FCC

Masses et interactions fondamentales

Élaboré à partir des années 1960, le modèle standard de la physique des particules s'est nourri tour à tour de découvertes expérimentales et d'inventions théoriques. La découverte du boson de Higgs en 2012 au grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN a été le couronnement des succès engrangés au cours des décennies précédentes : l'ensemble des particules prédites par le modèle a désormais été observé expérimentalement et la description de leurs interactions – électromagnétique, faible et forte – est testée avec une précision remarquable (de l'ordre du pour mille pour sa composante électrofaible) voire époustouflante : la prédiction du moment magnétique anormal de l'électron qui relève de l'électrodynamique quantique est vérifiée expérimentalement à 10^{-12} près ! Ce bel édifice présente toutefois des fragilités car il n'apporte pas de réponse à des questions fondamentales. Pour n'en citer que quelques-unes : il n'inclut pas la gravitation, n'explique pas l'observation d'une matière noire aux échelles galactique et cosmologique, ni la hiérarchie des masses des fermions, ni même la valeur de celle du boson de Higgs. L'origine du mécanisme de Higgs, quant à elle, reste inconnue. Ainsi le modèle standard est-il très largement considéré comme un modèle effectif à basse énergie, élément d'une théorie plus fondamentale qui reste à découvrir.

De quelle théorie s'agit-il ? Supersymétrie, dimensions supplémentaires, modèles de boson de Higgs composite ou secteur de Higgs étendu, existence d'un secteur « caché », ... Les propositions théoriques ne manquent pas mais l'échelle d'énergie à laquelle la physique non décrite par le modèle standard pourrait se manifester reste totalement inconnue. Le programme de recherche au LHC et en particulier dans l'expérience ATLAS est donc très largement consacré à la recherche d'indices qui pourraient nous renseigner sur cette échelle d'énergie et nous guider dans l'élaboration d'une théorie au-delà du modèle standard.

La découverte de nouvelles particules a été intimement liée à l'histoire de la construction du modèle

standard et à ses succès. Elle est aujourd'hui l'un des axes privilégiés du programme d'exploration du LHC. Si lors des premières périodes de collecte de données l'accent a été mis sur des théories solidement motivées telles que la supersymétrie, il se déplace aujourd'hui vers des recherches faites dans le cadre de modèles plus génériques (modèles à deux doublets de Higgs par exemple) ou des recherches de signatures communes (impulsion transverse manquante) ou moins conventionnelles (vertex déplacés).

Un second axe d'exploration est celui des mesures dites de précision. Celles des observables électrofaibles au LEP, collisionneur électron-positron qui a précédé le LHC dans le même tunnel au CERN, ont permis, dans l'hypothèse où le modèle standard était vérifié, d'indiquer la fenêtre de masse la plus plausible où devait se situer le boson de Higgs. Désormais, la masse du Higgs peut être mesurée directement tout comme les autres paramètres fondamentaux de la théorie électrofaible : constante de Fermi, angle de Weinberg, masses des bosons vecteurs ou du quark top. Obtenir une précision de plus en plus grande sur ces paramètres, en particulier au LHC, est un moyen de tester la cohérence du modèle standard et peut-être de révéler une éventuelle physique non décrite par le modèle standard. C'est dans le même esprit qu'une étude minutieuse des propriétés du boson de Higgs doit être réalisée car la physique non décrite par le modèle standard pourrait également modifier la valeur de ses couplages. En particulier, et afin de paramétrer d'éventuelles déviations du modèle standard de façon la plus générique possible, ces dernières années ont vu un fort développement des études faites dans le cadre d'une théorie effective des champs, proposant une extension du modèle standard.

Les activités de l'équipe Masse et Interactions Fondamentales participent complètement de cette quête de la physique non décrite par le modèle standard. Au sein de la collaboration ATLAS, le LPNHE mène des recherches de candidats de matière noire se couplant à un boson de Higgs, identifié par sa désin-

tégration en une paire de quark-antiquark b ou en une paire de photons, et de potentielles nouvelles résonances se désintégrant également en deux photons. Ce même canal est utilisé pour explorer les propriétés du boson de Higgs (masse, sections efficaces différentielles) tandis que le canal quark-antiquark b a permis la première observation de cette désintégration et, en combinaison avec d'autres canaux, celle des modes de production du Higgs associé à un boson vecteur ou une paire top-antitop.

De manière similaire, les compétences du LPNHE sur la reconstruction des jets, qui sont un ensemble de particules collimées signant la présence d'un quark ou d'un gluon dans l'événement étudié, lui permettent de mener à la fois des recherches de nouvelles résonances se désintégrant en une paire de jets et des études précises du modèle standard, ici dans le domaine de l'interaction forte. Par ailleurs, le travail sur la mesure de la masse du quark top s'est poursuivi, à travers l'exploitation des désintégrations contenant un méson J/ψ ou un méson D qui permettent une mesure dont l'incertitude systématique est relativement faible.

Au sein de la collaboration ATLAS, l'équipe est très impliquée dans les études de performance, nécessaires pour optimiser l'impact des recherches et améliorer la précision des mesures : identification et isolation des photons, étalonnage des jets, ou encore identification des jets provenant de quarks b. Elle participe en outre à l'effort sur les moyens de stockage des données et de traitement dans le cadre de la grille de calcul dont le détail est donné dans la partie Organisation du laboratoire de ce rapport.

Lors de la construction et des premières années de prise de données, le LPNHE avait contribué très significativement au calorimètre à argon

liquide de l'expérience ATLAS. Son effort s'est depuis réorienté et développé sur les détecteurs silicium notamment lors de l'ajout d'une couche supplémentaire au détecteur de vertex, au plus près du tube à vide, l'*Insertable B-Layer* (IBL) dont le support n'est séparé du tube que de 0,2 mm. Dans le cadre de la préparation à la phase de haute luminosité du LHC pour laquelle le détecteur doit être adapté, des ingénieurs, des techniciens et des chercheurs travaillent ensemble sur deux projets de développement :

- ITk (*Inner Tracker*), le nouveau trajectographe interne de l'expérience entièrement en silicium et avec une nouvelle géométrie qui doit remplacer l'ensemble des sous-détecteurs occupant la cavité interne du calorimètre à argon liquide qui, lui, est conservé ;
- HGTD (*High Granularity Timing Detector*), un nouveau sous détecteur, également en silicium, conçu pour rejeter le bruit de fond d'empilement grâce à une mesure temporelle de très haute précision.

Le laboratoire a développé et exploite avec ces deux projets une expertise reconnue sur les détecteurs silicium, leur conception et leur construction.

Le LPNHE a par ailleurs poursuivi ses contributions au programme de calorimétrie CALICE pour un possible détecteur conçu pour un futur collisionneur linéaire, l'*International Linear Collider* (ILC). Ces travaux sont également pertinents dans le cadre de la R&D pour des expériences auprès d'autres futurs accélérateurs.

Enfin, des membres de l'équipe participent à la réflexion naissante sur un projet de collisionneur circulaire au CERN, le *Futur Circular Collider* (FCC), un projet ambitieux proposant de repousser la frontière en énergie à des collisions de l'ordre de 100 TeV contre 14 TeV actuellement.

Physique du boson de Higgs dans ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du modèle standard

Des mesures des plus en plus précises des propriétés du boson de Higgs

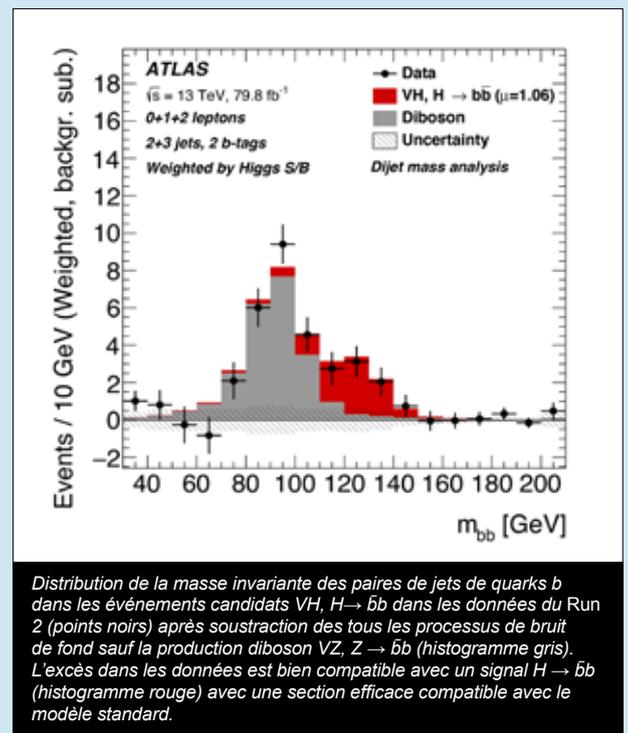
Après avoir contribué à la découverte du boson de Higgs (H) en 2012, lors des collisions proton-proton (pp) du *Run 1* du LHC à 7 et 8 TeV, et avoir mené des premières études sur sa production à 13 TeV avec les données initiales du *Run 2* du LHC en 2015, nous avons profité en 2017-2019 de la grande quantité de données fournies par la suite du *Run 2* (36 fb⁻¹ en 2015-2016, 40 en 2017 et 60 en 2018) pour mesurer les propriétés du boson de Higgs avec plus de précision et pour rechercher des processus non observés lors du *Run 1*.

La masse du boson de Higgs est un paramètre crucial du modèle standard de la physique des particules. Sa valeur, qui n'est pas prédite par le modèle standard, est un ingrédient nécessaire pour calculer les processus à haute énergie et peut avoir aussi des implications importantes pour la stabilité de l'univers par rapport aux fluctuations quantiques. Utilisant 36_{fb-1} de collisions pp à 13 TeV et les modes de désintégration en deux photons, H→γγ et en quatre leptons, H→ZZ*→4ℓ, nous avons mesuré la masse du boson de Higgs, m_H=124.97±0.24 GeV, avec une précision égale à celle de la combinaison des mesures du *Run 1* d'ATLAS et CMS.

Avec un rapport d'embranchement de 58%, la désintégration du boson de Higgs en b \bar{b} est la plus probable, mais souffre d'un niveau de bruit de fond important au LHC ce qui rend son observation très difficile. La principale méthode pour améliorer le rapport signal sur bruit est de rechercher les événements VH où le boson de Higgs est produit en association avec un boson V (V=W ou Z) se désintégrant en leptons.

L'analyse de 80 fb⁻¹ des données du *Run 2* nous a permis de trouver un signal de désintégration

VH, H→b \bar{b} avec une significativité de 4,9 écarts-types (σ) (figure ci-dessous). La combinaison avec les résultats du *Run 1* et avec la recherche des désintégrations H→b \bar{b} dans le mode de production ttH a conduit à l'observation des désintégrations H→b \bar{b} avec une significativité de 5,4 σ et à une mesure de leur taux d'embranchement en accord avec le



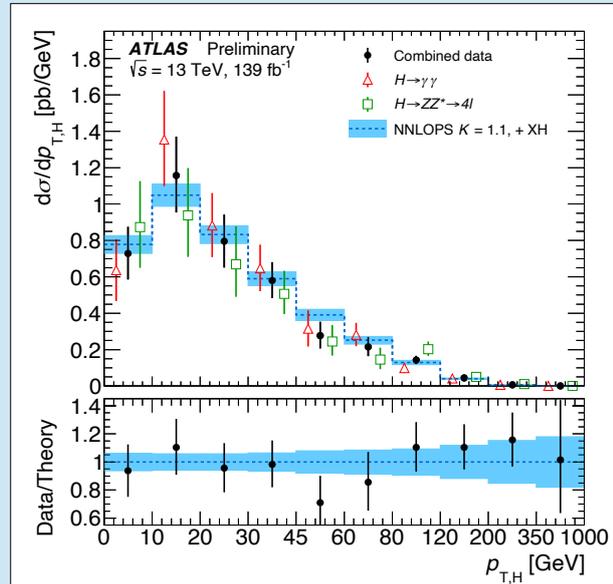
modèle standard. Ce résultat complète l'observation des couplages du boson de Higgs aux fermions chargés élémentaires de la troisième génération et confirme ainsi les prédictions du modèle standard dans le secteur de Yukawa – pour la troisième génération – avec une précision meilleure que 20%.

La combinaison des résultats de l'analyse VH, H→b \bar{b} avec des recherches des événements VH, H→γγ ou H→ZZ a aussi conduit à l'observation – avec une significativité de 5,3 σ – de la production VH, le seul mode de production avec une section efficace supérieure à 1% du total qui n'avait pas encore été confirmé.

L'analyse des mêmes données a permis aussi une première mesure de la section efficace de production VH en fonction du p_T du boson V, dont le bon accord avec le modèle standard a permis de contraindre l'intensité de possibles interactions HVV au-delà du modèle standard.

Contrairement à celles en $b\bar{b}$, les désintégrations du boson de Higgs en deux photons sont rares (rapport d'embranchement de l'ordre de 0,2%) mais facilement identifiables et bien mesurées, permettant d'étudier ses propriétés avec une grande précision. Nous avons utilisé toutes les données du Run 2 pour mesurer la section efficace de production du boson de Higgs en fonction de plusieurs quantités, comme son moment transverse (figure ci-contre), qui peuvent être utilisées pour sonder différents mécanismes de production et chercher des écarts par rapport aux interactions du modèle standard. Un bon accord avec le modèle standard a été trouvé et des limites ont été mises sur la force des interactions hypothétiques au-delà du modèle standard du boson de Higgs avec les bosons de jauge, et sur la valeur de son couplage au quark charm.

Afin d'améliorer la sensibilité de ces mesures nous avons travaillé sur l'optimisation des techniques d'analyse, mais aussi sur l'amélioration des mesures de certaines performances du détecteur qui sont des ingrédients fondamentaux pour les mesures de masse ou de section efficace. Il s'agit de l'échelle d'énergie et de l'efficacité d'identification des photons dans le calorimètre d'ATLAS et de l'efficacité d'identification des jets de quarks b dans son trajectographe. Nous travaillons aussi sur l'étiquetage de $H \rightarrow b\bar{b}$ dans le régime boosté et l'étalonnage de ces algorithmes d'identification des jets de quarks b et des $H \rightarrow b\bar{b}$.



Section efficace différentielle de la production du boson de Higgs en fonction de son moment transverse ($p_{T,H}$) mesurée à partir des deux canaux individuels ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \gamma\gamma$) et leur combinaison.

Enfin, nous avons recherché - pour l'instant sans succès - les désintégrations rares (prévues par le modèle standard) du boson de Higgs en $Z+\gamma\gamma$ dans les données du Run 2, et nous avons contribué aux projections des mesures des propriétés du boson de Higgs à la phase haute-luminosité du LHC, qui ont été un des ingrédients des discussions menées par notre communauté dans le cadre de la mise à jour de la stratégie européenne en physique de particules.

CHIFFRES CLEFS

140 fb⁻¹ de collisions pp à **13 TeV** collectées par ATLAS, soit **~30** fois plus que les données utilisées pour la découverte du boson de Higgs

2 x 10³⁴ cm⁻² s⁻¹, la valeur typique de la luminosité instantanée au début de chaque run de collisions pp, plus élevée d'un facteur 2 que la luminosité de conception du LHC (**1 x 10³⁴ cm⁻² s⁻¹**)

Recherche de physique au-delà du modèle standard : le problème de la matière noire et autres questions ouvertes

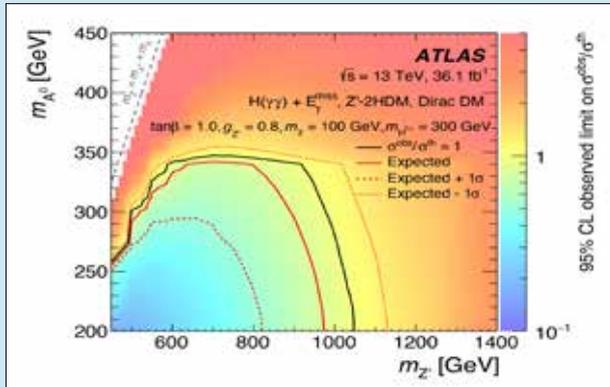
Après la découverte du boson de Higgs, la recherche de la physique non décrite par le modèle standard bat son plein au LHC pour éclairer un certain nombre de questions fondamentales auxquelles ne répond pas le modèle standard : pourquoi y a-t-il trois familles de particules qui diffèrent par leur échelle de masse mais qui semblent avoir des propriétés universelles vis-à-vis des interactions ? Pourquoi y a-t-il une telle hiérarchie de masse entre les différentes familles de neutrinos ? Pourquoi la matière domine sur l'antimatière dans l'Univers ? Peut-on construire une théorie des interactions intégrant les quatre interactions fondamentales alors que le modèle standard n'inclut pas la gravitation ? Le boson de Higgs est-il fondamental ? ...

Au-delà de ces questions très théoriques, le modèle standard échoue sur une question très concrète, celle de la nature de la matière noire dont de nombreux indices expérimentaux convergents suggèrent l'existence à toutes les échelles d'organisation de l'Univers sans que nous en connaissions la nature microscopique.

L'équipe se consacre à la recherche de nouvelles particules de plusieurs manières différentes. Dans un premier axe de recherche, elle confronte les données du LHC aux prédictions de différents modèles théoriquement séduisants qui prévoient l'existence de nouvelles particules pouvant composer la matière noire comme par exemple les modèles supersymétriques. Dans un axe complémentaire, nous travaillons à tester la possibilité d'une supersymétrie entre les bosons et les fermions. Dans un dernier axe, nous suivons une approche ouverte largement modèle-indépendante visant à découvrir de nouvelles résonances prédites dans le cadre

de modèles construits pour résoudre les grandes questions précédemment évoquées.

Le groupe, spécialiste des photons, des jets et de la physique du boson de Higgs dans ses canaux de désintégration les plus sensibles au niveau expérimental, a beaucoup travaillé sur la possible production de bosons de Higgs en association avec des particules de matière noire n'interagissant pas dans le détecteur (canaux où le boson de Higgs se désintègre en une paire de quarks beaux ou une paire de photons). Dans de tels événements, la conservation de l'impulsion transverse mesurée dans le détecteur semblerait brisée, tout en offrant un état final à deux photons ou deux jets de quark beaux propres à être reconstruits expérimentalement. De manière complémentaire, notre groupe a contribué à la recherche d'un quark top unique produit en association avec une énergie transverse manquante signant la production possible d'une particule de matière noire. Ces différentes recherches de matière noire ont nécessité un travail de fond sur la reconstruction de l'énergie transverse manquante à laquelle notre groupe a apporté des améliorations importantes, notamment pour renforcer sa robustesse face au taux d'événements parasites présents dans les collisions du LHC (*pile-up* ou empilement). Par ailleurs, ce projet de recherche génère une activité régulière sur le perfectionnement de la reconstruction des photons et des jets s'inscrivant dans les activités des groupes de performance associés à la collaboration ATLAS. Cette recherche n'a pour l'instant conduit à aucune découverte majeure et a donc donné lieu à la publication de limites sur les modèles envisageant l'existence de candidats matière noire (*figure ci-après*). Une extension assez simple de l'analyse menée pour rechercher l'état final à deux photons en association avec de l'énergie transverse manquante a permis de produire des résultats mettant des contraintes intéressantes sur l'existence de certains modèles supersymétriques. Ce travail a donné lieu à la soutenance de trois



Limites à 95% de niveau de confiance sur le rapport section efficace visible sur section efficace visible prédite par le modèle standard sur la production de matière noire dans le cadre d'un jeu de paramètres du modèle Z'-2HDM dans le plan.

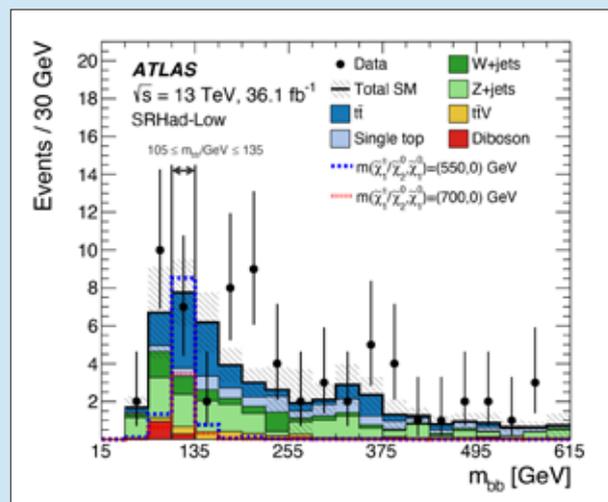
thèses au cours de la période couverte par le présent rapport d'activité. Une thèse encore en cours fera un état des lieux sur la base de l'ensemble des données du Run 2 du LHC. De manière complémentaire, notre groupe a participé à la recherche de neutralinos et de charginos prédits dans le cadre de la supersymétrie en explorant l'état final WH produit en association avec de l'énergie transverse manquante et dans lequel le W aurait une désintégration totalement hadronique (*figure ci-contre*). Là encore, aucune découverte n'est à rapporter.

Par ailleurs, l'équipe poursuit la recherche de résonances se désintégrant en paire de photons de plusieurs manières. Elle poursuit les recherches adoptant la même stratégie que celle utilisée pour découvrir le boson de Higgs mais dans d'autres domaines de masse, soit à haute masse jusqu'au-delà du TeV, soit dans des masses beaucoup plus faibles que celle du boson de Higgs qui n'ont pour l'instant pas pu être recherchées de manière optimale car nécessitant le développement de voies de déclenchement dédiées et une amélioration des performances de la reconstruction des photons à basse énergie transverse. Notre équipe s'est donc investie dans des études de performance conséquentes

pour améliorer le rejet du bruit d'empilement et l'efficacité de sélection au niveau déclenchement de tels signaux. Cette recherche à hautes et basses masses fait l'objet de deux thèses en cours sur la base d'une partie des données du Run 2 du LHC montrant l'absence de découverte pour l'instant. Par ailleurs, nous avons également contribué à la combinaison des résultats des recherches de résonances di-bosoniques et di-leptoniques fondés sur les données 2015 et 2016 d'ATLAS.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

- Gregorio Bernardi, Reina Camacho Toro,
- Sandro de Cecco, Bertrand Laforge,
- Alexander Leopold, Alvaro Lopez Solis,
- Stefano Manzoni, Giovanni Marchiori,
- Ioannis Nomidis, José Ocariz,
- Luis Pascual Dominguez, Dilia Portillo,
- Lydia Roos, Marton Sandes do Santos,
- Werner Spolidoro-Freund, Renjie Wang,
- Yufeng Wang

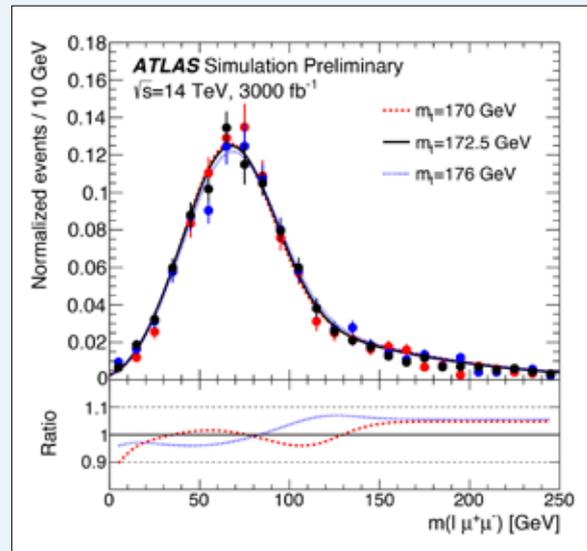


Comparaison des prédictions du modèle standard et des données d'ATLAS dans le canal de recherche de production d'une paire de neutralinos en association avec un higgs (en bb) et un boson W se désintégrant hadroniquement.

Mesure de la masse du quark top dans ATLAS

Le quark top est la particule élémentaire la plus massive du modèle standard. Il se couple donc fortement au boson de Higgs. Il pourrait ainsi jouer un rôle particulier dans le phénomène de brisure spontanée de la symétrie électrofaible qui reste incompris, mais aussi dans de nombreuses extensions du modèle standard.

Le groupe a poursuivi son programme de mesure de la masse du quark top, m_t , en utilisant des événements top-antitop dans lesquels l'un des jets issus de la désintégration d'un quark b produit soit un méson J/ψ (recherché dans son canal de désintégration en paires de muons $\mu^+\mu^-$) soit un méson D (un D^0 produit en association avec un μ ou un D^* [2010]). La mesure est basée sur une méthode des gabarits issue de la simulation utilisant la sensibilité à la masse du quark top de la masse invariante du système formé par un lepton issu du boson W et du méson (*figure ci-contre*). N'utilisant que des leptons ou des traces de particules chargées, la mesure dépend peu de l'échelle d'énergie des jets, qui est la source d'incertitude dominante dans la plupart des autres mesures. En revanche, les rapports d'embranchement de ces processus étant faibles, les mesures sont limitées par la statistique disponible. Par ailleurs, ces mesures sont sensibles à la modélisation des processus de fragmentation et d'hadronisation des quarks b. Une thèse est en cours sur le sujet et sera soutenue durant l'été 2020.



Paramétrisation des gabarits montrant la sensibilité de $m_{l\mu^+\mu^-}$ à m_t .

Des études de prospective, effectuées dans le cadre d'un *CERN Yellow Report* ont montré qu'une précision de l'ordre de 0,5 GeV pourrait être atteinte avec l'ensemble des données à haute luminosité du HL-LHC.

Chercheur et doctorant :

Frédéric Derue, Jad Zahreddine

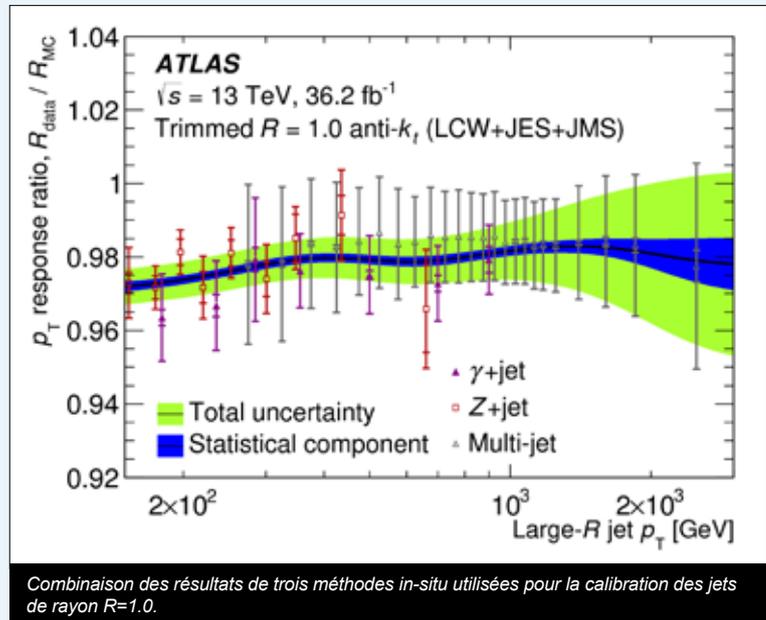
CHIFFRES CLEFS

$\sigma(m_t) \sim 0.5$ GeV avec le J/ψ
à la fin du Run HL-LHC

Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans ATLAS

Les jets produits dans des collisions de haute énergie sont des gerbes de particules issues de quarks et de gluons comme cela a été dit en introduction. Leur étude permet de comprendre la structure et les interactions de la matière aux distances les plus courtes accessibles en laboratoire.

Avant qu'ils puissent être utilisés pour des études de physique, les jets reconstruits par le détecteur doivent être calibrés le plus précisément possible en énergie puisque l'incertitude sur cette mesure est souvent l'incertitude dominante des mesures de l'expérience ATLAS, les jets intervenant dans la majorité des analyses. Le travail effectué par le groupe a permis une amélioration significative de la méthode de calibration, afin d'utiliser une granularité fine pour la correction et de mieux comprendre ses incertitudes systématiques. En effet, grâce à la mise en œuvre d'une solution analytique pour résoudre un système sur-contraint alors que précédemment seule une méthode numérique était utilisée, l'algorithme est maintenant plus stable et s'exécute environ mille fois plus vite. L'utilisation de méthodes *in-situ*, méthodes utilisant la balance en impulsion transverse entre un objet dont l'énergie est très bien connue comme un boson Z ou un photon et un jet dans les données, a été généralisée pour la calibration de jets de grandes dimensions, ce qui a permis une réduction importante de son incertitude (*figure ci-dessus*). Les méthodes développées auparavant dans le groupe, pour la combinaison des méthodes *in-situ*, l'évaluation et la propagation des incertitudes systématiques avec leurs corrélations, y sont utilisées également. Les jets larges sont



particulièrement importants pour les recherches de physique non décrites par le modèle standard impliquant des particules lourdes *boostées*.

En plus d'avoir été étendues à de nombreuses analyses de physique, les améliorations de la calibration ont apporté des bénéfices importants aux études auxquelles le groupe a participé. Parmi celles-ci il y a les mesures de sections efficaces inclusives des jets (*figure ci-contre*), de la masse du système di-jet, ainsi que de l'impulsion transverse la plus élevée parmi celles des jets de chaque événement. Cette dernière est une mesure originale, effectuée entièrement par le groupe, utilisant les données à 13 TeV. Une comparaison quantitative a été effectuée entre les sections efficaces mesurées et la prédiction du modèle standard, pour différentes descriptions des PDF (*Parton Density Function*, fonction décrivant le contenu partonique des protons), dans diverses régions de l'espace de phases. Celle-ci a été complétée par une étude

originale et détaillée de l'impact des incertitudes sur les corrélations, causées par les « incertitudes à 2 points », expérimentales et théoriques.

Le groupe a aussi contribué à la recherche de physique non décrite par le modèle standard dans la distribution de masse di-jet, reconstruite au niveau du déclenchement. En effet, cette approche permet d'augmenter de manière significative la statistique accumulée à basse masse, améliorant donc la sensibilité de ces recherches. Nous avons développé une méthode permettant de réduire les fluctuations statistiques dans la fonction de calibration *in-situ*, qui représentaient un point critique pour cette étude. L'ensemble des activités décrites dans les paragraphes précédents a fait l'objet d'une thèse soutenue en septembre 2019.

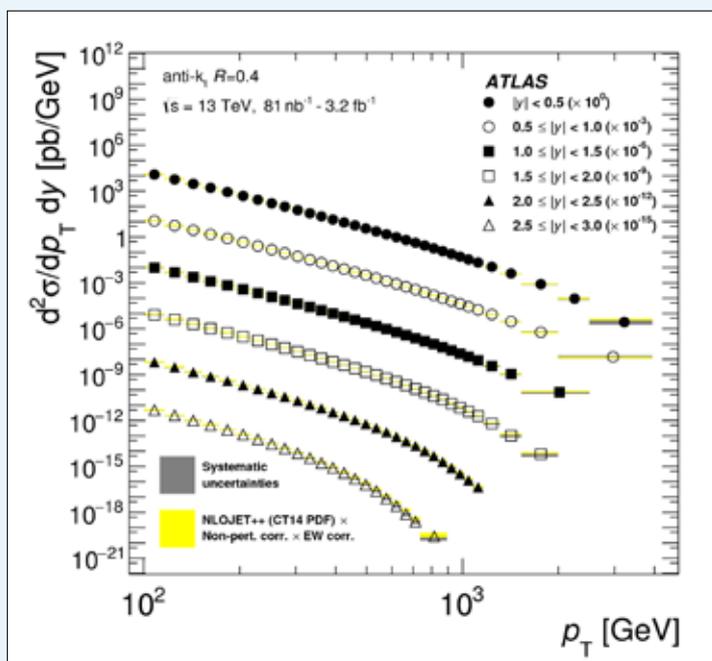
De plus, durant la période 2017-2019, un membre du groupe a été coordinateur du groupe modèle standard d'ATLAS dans lequel environ 80 analyses sont en permanence en cours et auquel plus

de 400 chercheur.euse.s contribuent. À ce titre, il a coordonné des analyses et a été éditeur et évaluateur de différents travaux. Il a, parallèlement, continué des travaux sur la physique de précision à basse énergie, concernant entre autres des études pour déterminer la contribution hadronique au g-2 du muon.

Par ailleurs, la mesure du spectre de masse de jets issus de la désintégration $Z \rightarrow b\bar{b}$ à haute impulsion transverse a été effectuée pour des événements Z gamma en utilisant les données d'ATLAS à 13 TeV pour la première fois. Des techniques de reconstruction de la structure interne des jets ont été utilisées. La désintégration $Z \rightarrow b\bar{b}$ est importante pour évaluer les incertitudes systématiques et les techniques d'identification pour la mesure de $H \rightarrow b\bar{b}$ à haute impulsion transverse, ainsi que pour la recherche des résonances massives se désintégrant en dibosons Z ou H.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Reina Camacho Toro, Robert Hankache, Bogdan Malaescu, Mélissa Ridel



Mesure doublement différentielle de la section efficace inclusive de production de jets à 13 TeV, en fonction de l'impulsion transverse et de la rapidité des jets, comparée à une prédiction théorique.

ATLAS ITk – R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération

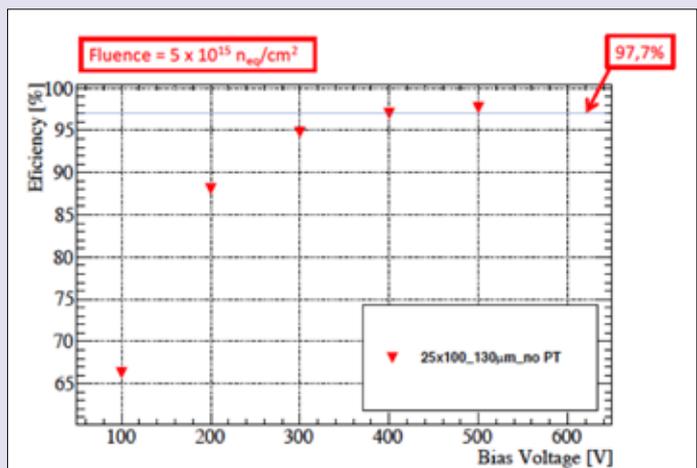
Une intense activité de R&D est en cours pour le dessin et la construction du détecteur de traces d'ATLAS (*Inner Tracker*, ITk) pour la phase de haute luminosité du LHC (HL-LHC). L'activité principale au laboratoire est centrée sur le développement des capteurs à pixels en silicium et la construction des modules qui feront partie du nouveau détecteur. Plusieurs axes de recherche satellites sont aussi développés en liaison avec le travail sur l'ITk. Parmi eux, le groupe ATLAS du LPNHE a acquis une maîtrise reconnue dans le dessin et l'étude de systèmes de refroidissement avancés, basés sur l'utilisation de micro-canaux.

Des capteurs minces et résistants aux radiations pour l'ITk

Le programme de l'HL-LHC prévoit une augmentation de la luminosité instantanée d'un facteur de 5 à 7 à partir de 2026, pour accumuler jusqu'à 3000 fb^{-1} sur une période de 10 ans. Cela représente une opportunité unique pour mieux comprendre les propriétés du boson de Higgs ainsi que pour étendre la portée de la recherche de la physique au-delà du modèle standard. Dans cette nouvelle configuration expérimentale, le trajectographe actuel ne sera plus en mesure de faire face à l'augmentation de la radiation instantanée attendue au HL-LHC et au nombre de traces par événement. Un détecteur plus performant sera nécessaire, avec une nouvelle génération de capteurs, d'électronique *Front End* et de chaîne d'acquisition, ainsi qu'une nouvelle structure de support mécanique et un système de refroidissement plus performant.

Depuis plusieurs années, le groupe ATLAS du LPNHE a un rôle majeur dans le développement des capteurs à pixels, particulièrement des capteurs minces, où l'épaisseur réduite nous permet de faire face au phénomène typique de piégeage de charge après irradiation. Au laboratoire, des solutions spécifiques ont été étudiées dans la conception pour optimiser l'acceptance géométrique et spécialement pour garder une bonne performance dans la région en bordure du capteur.

Depuis plusieurs années, des productions de ces dispositifs conçus au LPNHE ont été élaborées en collaboration avec la *Fondazione Bruno Kessler* (FBK) à Trento en Italie et testées avant et après irradiation dans la salle blanche du laboratoire et avec des tests en faisceau. Les résultats montrent que l'efficacité de détection de traces après la fluence attendue au HL-LHC dépasse 97%, une performance bien en accord avec les spécifications imposées par la collaboration ATLAS pour le futur trajectographe, donc ces capteurs seront des candidats naturels pour la construction de l'ITk (*figure ci-dessous*).



Efficacité de détection de traces en fonction du voltage appliqué après une irradiation à la fluence de $5 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$.

Le *Technical Design Report* du nouveau détecteur à pixels d'ATLAS a été approuvé en 2018 et le LPNHE aura un rôle de premier plan dans la construction des modules en France pour le nouveau trajectographe ; plusieurs membres du groupe ont déjà tenu des rôles de responsabilité dans la caractérisation des capteurs des différentes fonderies. La construction en France des modules de l'ITk sera faite dans le cadre de la création d'un regroupement parisien avec le LPNHE, l'IJCLab et le CEA/Irfu. Le regroupement devra produire plus de 30% des modules de la partie extérieure du tonneau de l'ITk, soit quelques 3000 objets, et les valider à travers une procédure de test et de contrôle de qualité. L'infrastructure du laboratoire a été renforcée en vue de cette construction. Une machine à bonder a été installée dans la salle blanche d'ATLAS ainsi que d'autres instruments, comme un microscope pour la métrologie à haute résolution. Plusieurs membres du service électronique du laboratoire ont acquis l'expérience nécessaire pour les utiliser. La machine est un des éléments importants de l'instrumentation du LPNHE pour les années à venir.

Le programme de contrôle de qualité des modules produits demandera aussi une participation importante des services techniques, avec un cahier des charges incluant plusieurs tests électriques et thermomécaniques comme des mesures de stabilité du courant de fuite, des cycles chaud-froid rapides dans l'enceinte thermique ou un programme de métrologie.

Une solution innovante pour le système de refroidissement : les micro-canaux

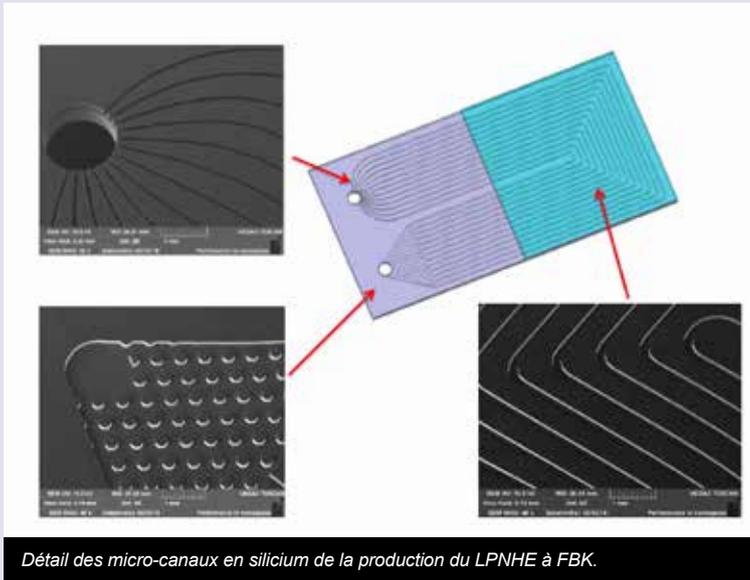
Cette nouvelle génération de détecteurs à pixels exige des solutions plus performantes pour dissiper la puissance générée non seulement par la puce de

lecture mais aussi par le capteur lui-même, à cause du courant de fuite qui devient important après irradiation même si sa valeur est maîtrisée lors de la production des capteurs comme cela a été décrit précédemment. La température de refroidissement pendant la prise de données sera comprise entre -20°C et -25°C pour maîtriser les dégâts dus à l'irradiation puisque ce détecteur se trouve au plus près de l'axe du faisceau. Pour obtenir cette performance, un refroidissement par évaporation au dioxyde de carbone (CO_2) sera utilisé. Pour les détecteurs à pixels qui seront utilisés dans les futurs collisionneurs, l'uniformité du refroidissement sera également extrêmement importante pour éliminer le risque d'emballement thermique, qui peut se produire dans les régions du capteur où le refroidissement est moins efficace. Un système de micro-canaux gravés dans des plaquettes de silicium, utilisés pour la circulation du CO_2 et connectés aux modules, permettra de réduire la quantité de matière du système, d'avoir une plus grande surface utilisée pour l'échange thermique par rapport aux tuyaux classiques et d'avoir le même coefficient de dilatation entre le bloc de refroidissement et le module, tout en éliminant les problèmes liés à la dilatation thermique.

AIDA-2020 est un groupement d'infrastructures de recherche et de développement majeures en Europe ainsi que de laboratoires choisis qui soutient financièrement des travaux pointus de développement de systèmes de refroidissement avancés. Grâce à la participation du groupe à AIDA-2020 mais aussi à des financements obtenus par le CNRS (notamment avec les projets REFLECS et REFLECS2, lors de l'appel d'offre « Instrumentation aux limites ») des dispositifs de refroidissement à micro-canaux ont été dessinés et fabriqués en collaboration avec la *Fondazione Bruno Kessler* (FBK) et à l'Institut d'Élec-



tronique Fondamentale. Un détail des éléments produits à la FBK est visible sur la figure ci-dessous.



Un certain nombre des dispositifs produits dans le cadre d'AIDA-2020 a été caractérisé par des tests thermomécaniques au CERN (dans le département *Experimental Physics* du groupe *Detector Technologies* dans l'unité de refroidissement des détecteurs) et le résultat de ces mesures a été publié.

Puces de *Front End* avancées

Pour exploiter les capteurs pixel dans les expériences HL-LHC une nouvelle puce de *Front End* est nécessaire. La collaboration RD53 a été créée avec l'objectif de développer cette nouvelle technologie *Front End* avancée qui sera utilisée par ATLAS et CMS lors de la mise à niveau de leurs trajectographes respectifs. Le LPNHE fait partie de RD53 depuis le début et a eu une contribution majeure dans le cœur numérique des nouvelles puces. Un

premier prototype appelé RD53A a été produit en 2017 et a été la base de toutes les dernières R&D pour l'ITk d'ATLAS. Une première puce ATLAS pour l'ITk, *ItkPixV1*, a été envoyée en production début 2020.

Reconstruction de la trajectoire des particules en temps réel

Afin d'exploiter pleinement le potentiel de l'expérience, il est nécessaire de disposer d'une sélection intelligente des événements à enregistrer pour l'analyse. Une grande partie des événements n'est pas utile et, sans ce tri précoce, le potentiel de découverte de l'expérience est très réduit. Les informations provenant du trajectographe sont essentielles pour cette sélection (*photo ci-contre, un prototype d'un des éléments composant le futur trajectographe*). Afin de reconstruire en temps réel la trajectoire des particules qui traversent le trajectographe, il est nécessaire de développer des algorithmes et des processeurs dédiés. Le projet FTK (*Fast Track*) a eu pour objectif la mise à niveau du processeur utilisé pour la reconstruction des traces pour la Phase I du LHC et HTT (*Hardware Track Trigger*) est le projet de mise à niveau pour la Phase II du LHC (HL-LHC) ; les deux projets sont basés sur des puces de mémoire associative (AM pour *Associative Memory*). Le LPNHE est un leader mondial dans le développement de la technologie des puces AM depuis la production de l'AM05 en 2015. L'AM06 pour FTK a été produite en 2016 et plus de 8000 puces ont été fournies à la collaboration. Le LPNHE aurait dû être engagé dans la coordination du test pour la production du deuxième lot de 8000 puces prévu pour 2020 mais le projet FTK a été annulé en 2019. En 2018, la puce prototype AM07 pour HTT,

la première puce AM 28 nm, a été produite et la puce AM08, le deuxième prototype, est en cours de développement. Il devrait être terminé en 2020. Le LPNHE est en charge du développement des tests de caractérisation et de qualification de ces puces.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Marco Bomben, Giovanni Calderini, Audrey Ducourthial, Louis D'Eramo, Ilaria Luise, Giovanni Marchiori, Reem Taibah, Yajun He

Équipe technique :

Julien Coridian, Rémi Cornat, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, David Martin, Yann Orain, Philippe Repain

CHIFFRES CLEFS

3000 fb⁻¹ de données seront recueillies lors du *Run HL-LHC*

Taille des pixels :
50 μm x 50 μm et
25 μm x 100 μm

L'ensemble des pixels représente une surface de **13m²** de silicium



Prototype du nouveau détecteur à pixels de l'expérience ATLAS. Ce futur détecteur à pixels sera un des éléments du nouveau détecteur de traces interne (ITk) tout en silicium qui est actuellement en cours de développement.

Études et réalisations du détecteur HGTD

Le projet HGTD (*High Granularity Timing Detector*) prend place dans le cadre de la phase à haute luminosité du LHC (HL-LHC) comme ITk, qui commencera en 2026/2027. Pour cette phase, le nombre d'interactions par croisement de faisceau – ce que l'on appelle l'empilement – augmentera considérablement par rapport aux premiers *Runs*, et atteindra 200 contre 33 en moyenne durant le *Run 2* du LHC. La seule résolution spatiale du détecteur ITk ne permettra pas de distinguer les événements qui sont trop rapprochés spatialement, notamment pour les traces à haute pseudo-rapidité η , c'est-à-dire partant vers les bouchons du détecteur ATLAS. Le détecteur HGTD, qui couvrira la région η entre 2,4 et 4,0, possédera une résolution temporelle de 30 ps et une fine granularité (1,3x1,3 mm²), ce qui assurera un association trace/vertex primaire efficace. Par ailleurs, HGTD permettra une meilleure estimation de la luminosité, paramètre crucial pour les mesures de précision.

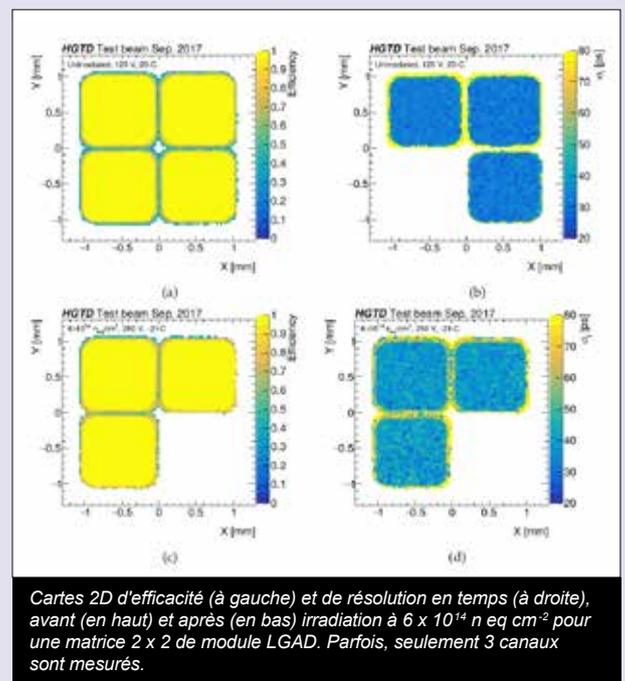
Les implications du groupe HGTD du laboratoire sont multiples :

- Au niveau des modules de détection, qui sont des capteurs silicium de type LGAD, nous prenons une part active à l'analyse des données récoltées sur faisceaux afin de qualifier les niveaux de performance de ces capteurs, notamment leur tenue à l'irradiation (*figure ci-contre*). Nous montrons ainsi que pour une irradiation de 3×10^{15} neutrons équivalents par cm², les résolutions temporelles gardent un niveau de performance suffisant.
- Nous prenons part aux simulations de performance et à l'algorithmique de reconstruction bas niveau de traces, de rejet de l'empilement et de correspondance au vertex primaire des traces.

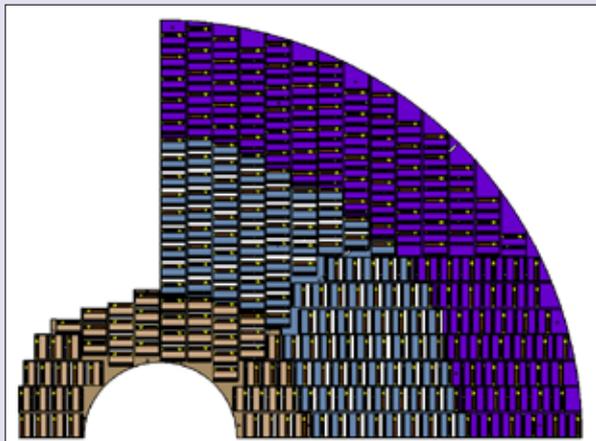
Les algorithmes ainsi développés ont permis une amélioration très significative de la procédure de reconstruction des traces avec un niveau de pureté élevé, permettant de reconstruire correctement jusqu'à 60% des traces. Il a également été développé un algorithme de sélection utilisant un arbre de décision rapide permettant de définir l'instant initial du vertex, le t_0 , pour 75% des événements. Le rejet de l'empilement a par ailleurs été amélioré jusqu'à 45% pour des impulsions transverses jusqu'à 50 GeV.

Cette activité est également liée à l'optimisation de la disposition finale des modules de détection. La disposition finale proposée et approuvée a été établie par le laboratoire.

- Au niveau électronique, nous effectuons les études de recherche et développement du *wire-bonding* qui doit prendre place entre l'ASIC de lecture et le capteur LGAD.

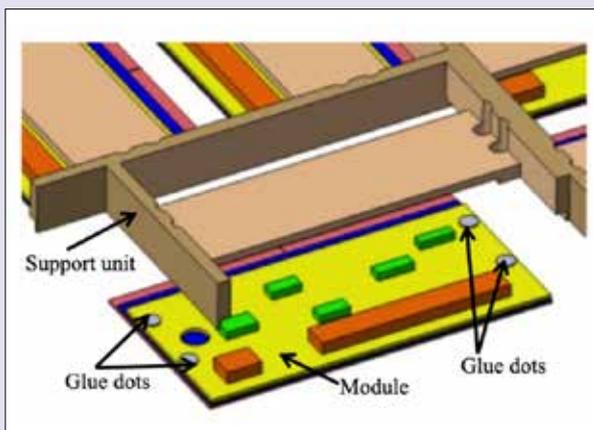


- Enfin, au niveau mécanique, le groupe est en charge de l'implantation des modules sur des unités de support qui seront fixés sur les disques de refroidissement (*figure ci-dessous*). Cet aspect



Unités support des modules pour les parties interne, médiane et externe.

couvre la disposition des modules (*figure ci-dessous*), leur fixation et l'étude des unités. À terme, le laboratoire sera en charge du suivi de la production et du chargement des modules sur ces unités par collage avant envoi au CERN pour installation finale. Ces études et les premiers essais sont déjà en œuvre au laboratoire.



Vue schématique d'un module fixé avec 4 points de colle sur une unité support.

Après l'« *initial design report* » d'août 2017, l'« *expression of interest* » de novembre 2017 et le « *technical proposal* » d'avril 2018, le « *technical design review* » a été préparé en 2019 pour une publication en 2020.

Parmi les objectifs à court terme, le groupe travaille activement depuis 2019 à la réalisation d'un prototype de démonstration d'HGTD qui comprendra 2x19 modules.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Tristan Beau, Didier Lacour, Bertrand Laforge, Alexander Leopold, Bogdan Malaescu, Irena Nikolic, Sophie Trincaz-Duvoid

Équipe technique :

Kevin Biernacki, Pascal Corona, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, Patrick Ghislain, Didier Laporte, Éric Pierre, Julien Philippe, Ibrahima Sylla

CHIFFRES CLEFS

200 interactions par croisement lors de la prise de données HL-HLC contre **33** en moyenne au *Run 2*

HGTD doit construire :

- **8032** modules de détection
- **16064** ASIC de lecture
- **3 614 400** pad sensibles soit **6,1 m²** de surface sensible de détection

Résolution en temps **30 ps**

R&D

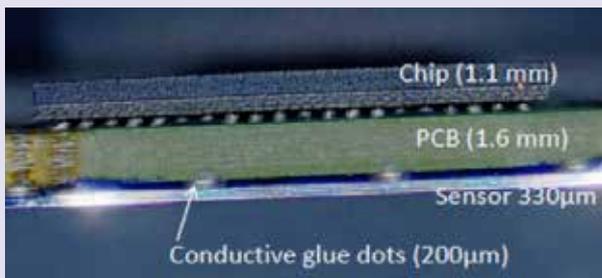
Conception des détecteurs pour ILC : le programme de R&D CALICE



Robot d'assemblage d'unités de détecteur permettant le positionnement et le collage des capteurs sur les cartes électroniques de lecture.

Les détecteurs du futur collisionneur ILC (*International Linear Collider*) sont en phase de recherche et développement. Depuis 2011, une équipe du LPNHE participe au programme de R&D CALICE concevant la calorimétrie, notamment électromagnétique, pour le détecteur ILD (*International Linear Detector*). Les contributions du laboratoire sont centrées sur la partie active du calorimètre et concernent les capteurs silicium placés de chaque côté des absorbeurs en tungstène.

L'équipe technique est en charge de l'étude du procédé de collage des capteurs silicium sur les circuits imprimés et les caractérisations électriques de ces capteurs. Les premières contributions ont permis la mise au point du procédé de collage (*photo ci-dessus*) et la participation à la fabrication d'un prototype simple de calorimètre (*photo ci-dessous*) qui a été testé en faisceaux à DESY en Allemagne en



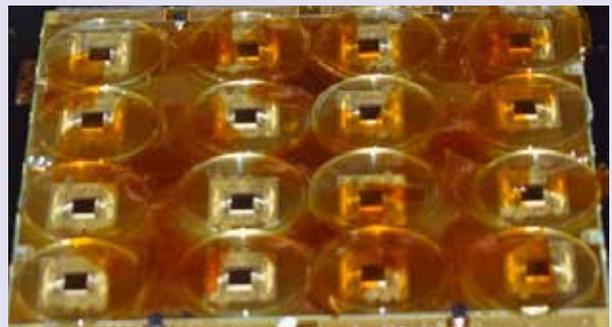
Visualisation transverse d'un plan de calorimètre silicium avec ses différents composants, le collage du capteur est réalisé au LPNHE.

CHIFFRES CLEFS

Calorimétrie ultragranulaire visant une densité de volumes de mesure de l'ordre **5000/dm³**

Reproductibilité de placement du robot : **25 µm**

2012 et 2013. En 2014 et 2015, la conception et la mise en œuvre d'un système complet de manipulation des capteurs silicium et de collage sur les circuits électroniques de lecture a été mis au point (*photo ci-dessous*). La fabrication au LPNHE d'une dizaine de plans de détecteur a permis de construire un premier module de calorimètre testé en faisceaux au CERN en 2016, 2017 et 2018. De plus, une étude systématique de la géométrie des circuits imprimés a été mise en place pour en évaluer la qualité qui est cruciale pour l'assemblage. L'utilisation d'une machine numérique tridimensionnelle du service mécanique du LPNHE permet un contrôle micrométrique des dimensions. Les caractéristiques électriques des capteurs avant et après le collage sur circuit imprimé sont vérifiées par une mesure du courant en fonction de la tension appliquée, grâce à un système dédié. Des premiers contacts avec la société Eolane ont été pris depuis 2015 dans le but d'industrialiser le processus de collage.



Unité active de détection d'un calorimètre électromagnétique silicium-tungstène avec les puces de lecture incorporées dans le circuit imprimé (protégées sur cette photo par les dômes plastiques).

Chercheur :

Didier Lacour

Équipe technique :

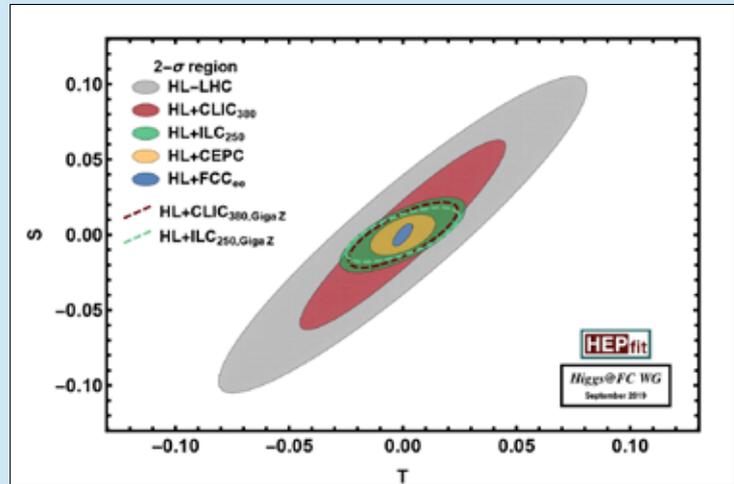
Julien Coridian, Rémi Cornat,

Patrick Ghislain, Jean-Marc Parraud

Activité de prospective sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs : FCC

Pour préparer l'après LHC et sa phase à haute luminosité, le laboratoire a créé un groupe de travail autour des divers projets futurs. La communauté s'oriente vers une première phase de mesures de précision, afin de contraindre encore mieux le modèle standard, via des collisions électrons-positrons e^+e^- , et une phase exploratoire à la plus haute énergie possible, 100 TeV en collisions proton-proton, pp.

De tous les projets potentiels, le FCC (*Future Circular Collider*) au CERN à Genève est un des plus attrayants : en démarrant par une phase e^+e^- dans un nouveau tunnel circulaire de 100 km de circonférence, il permettra de gagner un ordre de grandeur sur la précision des diverses mesures, comme les couplages électrofaibles, grâce notamment à sa très haute luminosité (*figure ci-contre*). Profitant de l'infrastructure existante, il sera suivi d'une phase exploratoire à la plus haute énergie envisageable en collisions hadroniques, permettant notamment d'accéder à l'auto-couplage du boson de Higgs avec grande précision.



Comparaison de la sensibilité des différents projets de collisionneurs futurs (dans la paramétrisation S,T) à des déviations potentielles aux prédictions du modèle standard dans les mesures de précision électrofaibles (EWPO).

Le laboratoire entend s'impliquer de plus en plus dans les études de physique, afin de mieux définir le potentiel du FCC et d'optimiser les détecteurs. A cet effet, l'expertise acquise via les développements de détecteurs de traces en silicium pour HL-LHC, ainsi que l'implication dans la R&D CALICE pour la calorimétrie à silicium, sont des atouts majeurs.

Chercheurs :

Gregorio Bernardi, Alain Blondel,
Bogdan Malaescu,
Giovanni Marchiori, Luc Poggioli

CHIFFRES CLEFS

Phase e^+e^- : prise de données à 4 énergies : pic du Z (5×10^{12} Z produits), ZH (10^{10} Higgs), WW (10^8 W), tt (10^6 top)

Phase hh : 100 TeV dans le centre de masse, 10^{10} Higgs, 10^{17} b, 10^{12} top

Phase eh : 10^6 Higgs, 10^7 top

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET RESPONSABILITÉS

Publications

La liste des publications du LPNHE de juillet 2017 à décembre 2019 est disponible sur le site internet du laboratoire à l'adresse <http://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1526>

Communications à des conférences

Pierre Antilogus

- « LSST », SF2A, Bordeaux, France, juillet 2018
- « La R&D pour les CCD dédiée à l'astronomie », Journée semi-conducteur IN2P3&IRFU, Grenoble, France, juin 2018
- « Introduction for Image Sensors for Precision Astronomy », ISPA, Pasadena, États-Unis, décembre 2018

Pierre Astier

- « Shape of the Photon transfer curve of CCD sensors », ISPA, Pasadena, États-Unis, décembre 2018
- « LSST VLT in the 2030 », Garching, Allemagne, mai 2019

Aurélien Bailly-Reyre

- « Portability and reproducibility/repeatability in research », contributions au poster de C. Cavet, S. Gadrat and the ComputeOps, CHEP 2019, Australie, novembre 2019

Eli Ben-Haim

- « Vus in tau decays and Lepton universality in D decays », Moriond EW, La Thuile, Italie, mars 2019
- « Dalitz plot analyses of $B \rightarrow Kshh'$ decays in LHCb ($h' = K/\pi$) », CKM 2018, Heidelberg, Allemagne, septembre 2018

Emilie Bertholet

- « Time-integrated CP violation in beauty decays at LHCb », Moriond EW, La Thuile, Italie, mars 2019
- « Extraction of the angle gamma from charmless 3-body B-meson decays », Future Challenges in Non-Leptonic B Decays : Theory and Experiment, Mainz, Allemagne, janvier 2019
- « Extraction of the angle gamma from charmless 3-body B-meson decays », Implications of LHCb measurements and future prospects, CERN, Suisse, octobre 2018
- « Extraction of the angle gamma from charmless 3-body B-meson decays using results from BaBar experiment », CKM 2018, Heidelberg, Allemagne, septembre 2018
- « Measurement of CP violation in charmless two-body B-hadron decays to charged hadrons », FPCP, Hyderabad, Inde, juillet 2018
- « Extraction of the CKM phase gamma using charmless 3-body B-meson decays », Workshop on multibody charmless B-hadron decays, Paris, France, juin 2018

Marc Betoule

- « StarDICE : preliminary results from the proof of concept », IAU, Vienne, août 2018

Simon Bienstock

- « Recent results from T2K », 13th Rencontres du Vietnam : Neutrinos, Quy Nhon, Vietnam, septembre 2017

Julien Bolmont

- « Testing Lorentz Invariance with Active Galactic Nuclei : current status and prospects », VHEPU 2018, Quy Nhon, Vietnam, août 2018
- « Testing Lorentz Invariance with Astrophysical Sources : review, issues and prospects », DISCRETE 2018, Vienne, Autriche, novembre 2018
- « Looking for QG Effects with Astrophysical Gamma-ray Sources », COST Action CA18108 Inauguration Workshop, Barcelone, Espagne, octobre 2019

Marco Bomben

- « Modeling Radiation Damage to Pixel Sensors in the ATLAS Detector », Pixel 2018, Tapei, Taiwan, décembre 2018

Giovanni Calderini

- « Performance of the FBK-INFN-LPNHE thin active-edge pixel detectors for the upgrade of the ATLAS Inner Tracker », Pixel 2018, Tapei, Taiwan, décembre 2018
- « Active-edge FBK-INFN-LPNHE thin n-on-p pixel sensors for the upgrade of the ATLAS Inner Tracker », 14th Pisa Meeting on Advance Detectors, Italie, mai 2018

Reina Camacho Toro

- « HEP Capacity Building in Latin-America », 1st workshop on Latin-American Strategy for Research Infrastructures (LASF4RI), Sao Paulo, Brésil, avril 2019
- « SUSY searches - electroweak production », 26th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY2018), Barcelone, Espagne, juillet 2018

Sami Caroff

- « Determination of the single photo-electron spectrum and gain measurement for the Cherenkov Telescope Array camera NectarCAM SPIE : Optical engineering & applications », Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy IX, San Diego, États-Unis, août 2019

Matteo Cerruti

- « Models of gamma-ray emission from active galactic nuclei », Probing quantum spacetime with Astrophysical Sources : the CTA era and beyond, Paris, France, novembre 2017
- « Multiwavelength follow-up coordination », Transient sky 2020, Montpellier, France, juin 2018
- « Gammas and neutrinos from TXS 0506+056 », SF2A 2018, Bordeaux, France, août 2018
- « TeV blazars with HESS », Half a Century of blazars and beyond, Turin, Italie, juin 2018
- « Multiwavelength follow-up coordination », Transient sky 2020, Montpellier, France, juin 2018
- « Gammas and neutrinos from TXS 0506+056 », SF2A 2018, Bordeaux, France, août 2018
- « Neutrinos from TeV blazars », TeVPA 2017, Columbus, États-Unis, août 2017
- « Flat Spectrum Radio Quasars with HESS II », TeVPA 2017, Columbus, États-Unis, août 2017
- « Extragalactic Observations with HESS : Past and Future », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Target of Opportunity Observations of Blazars with H.E.S.S. », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017

- « H.E.S.S. discovery of very-high-energy emission from the blazar PKS 0736+017 : on the location of the γ -ray emitting region in FSRQs », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017

Matthew Charles

- « CKM physics at hadron colliders », CKM 2018, Heidelberg, Allemagne, septembre 2018
- « Heavy flavour spectroscopy at ATLAS, CMS and LHCb », Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, La Thuile, Italie, mars 2018

Francesco Crescioli

- « AM07 : Characterization of the Novel Associative Memory Chip Prototype Designed in 28nm CMOS Technology for High Energy Physics and Interdisciplinary Applications », 14th Pisa Meeting on Advance Detectors, Italie, mai 2018

Olivier Dadoun

- « Portability and reproducibility/repeatability in research », contributions au poster de C. Cavet, S. Gadrat and the ComputeOps, CHEP 2019, Australie, novembre 2019

Valentin Decoene

- « The GRANDProto300 experiment », ICRC2019, Madison, États-Unis, juillet 2019
- « Ultrahigh energy cosmic-rays and neutrinos from neutron-star mergers », UHECR 2018, Paris, France, octobre 2018
- « Ultrahigh energy neutrinos from neutron-star mergers », Journées Théories du LPNHE, Paris, France, octobre 2018
- « Ultrahigh energy cosmic-rays and neutrinos from neutron-star mergers », TeVPA 2018, Berlin, août 2018

Louis D'Eramo

- « New Higgs results from ATLAS », LHC Days 2018, Split, Croatie, septembre 2018

Audrey Ducourthial

- « Thin and edgeless sensors for ATLAS pixel detector upgrade », PSD11, États-Unis, septembre 2017
- « Modeling Radiation Damage to Pixel Sensors in the ATLAS Detector », PSD11, États-Unis, septembre 2017

Giulio Dujany

- « LVF and other very rare decay searches at LHCb », CKM 2018, Heidelberg, Allemagne, septembre 2018
- « Study of rare heavy flavour decays at the LHC », Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste La Thuile, Italie, mars 2018
- « Charmless b-hadron decays at LHCb », Flavour Physics Conference, Quy Nhon, Vietnam, août 2017

Gabriel Emery

- « Observations of the FSRQ 3C 279 during the flaring state of 2017 and 2018 with H.E.S.S. », ICRC 2019, Madison, États-Unis, août 2019
- « Observations of blazar PKS 2023-07 in flaring state with HESS and Fermi-LAT in 2016-2017 and constraints on an intrinsic cut-off », ICRC 2019, Madison, États-Unis, août 2019

Romain Gaïor

- « Dark matter searches with DAMIC », snolab detector, Matera, Italie, septembre 2019
- « Dark matter searches with DAMIC detectors », PALS 2019, Paris, France, septembre 2019
- « Studies of the microwave emission of extensive air showers with GIGAS and MIDAS at the Pierre Auger Observatory », ICRC2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017

Claudio Giganti

- « Darkside: the quest for Dark Matter with Liquid Argon », 9th Symposium Large TPCs for low-energy rare event detection, Paris, décembre 2018
- « Darkside latest results and future prospects 30th Rencontres de Blois », Blois, juin 2018

Claire Juramy-Gilles

- « Tearing and related field distortions in deep-depletion CCDs », ISPA, Pasadena, États-Unis, décembre 2018
- « Diagnostic tools and CCD readout optimization in the first rafts of LSST », SDW, Baltimore, États-Unis, septembre 2017

Hector Gil-Marin

- « Constraining cosmological parameters with BAO and RSD from BOSS & eBOSS galaxy clustering datasets », Tensions in the LCDM paradigm, Mainz, Allemagne, mai 2018
- « Redshift-space distortion analysis from the DR14 eBOSS quasar sample in Fourier space », Statistical challenges for the large-scale structure in the era of the LSST, Oxford, Royaume Uni, avril 2018
- « Baryonic Acoustic Oscillation studies with the eBOSS DR14 quasar sample », Rencontres de Moriond, La Thuile, Italie, mars 2018
- « Latest eBOSS results. BAO analysis of the quasar sample in $1 < z < 2$ », Meeting on Fundamental Cosmology, Espagne, septembre 2017
- « Latest eBOSS BAO analysis of the DR-14 quasars at $1 < z < 2$ », Understanding Cosmological Observations, Espagne, août 2017

Vladimir Gligorov

- « Machine Learning in the LHCb trigger system », Inter-experimental ML meeting, CERN, Suisse, juillet 2019
- « Flavourful roads to New Physics », ICNFP 2017, Kolymbari, Grèce, août 2017
- « Data challenges TUPFP 2018 », Warwick, Royaume Uni, avril 2018
- « Working Group 4 (flavour) summary », HL-LHC workshop, CERN, Suisse, juin 2018
- « Too much of a good thing : how to drink new physics from a 40 Tb/s firehose », SKA/AI, Londres, Royaume Uni, septembre 2018
- « LHCb upgrade II plans, including data processing », TUPFP 2019, Durham, Royaume Uni, avril 2019
- « Trigger and data processing at LHCb in the future Reunion CEA-LHCb », CEA, Saclay, France, octobre 2019
- « The LHCb Real-Time analysis project », German LHCb community meeting, Rostock, Allemagne, octobre 2019

- « Variable latency tracking at 30 MHz », Learning to discover workshop, Orsay, France, octobre 2019

Robert Hankache

- « Using jets as tools for searches for new physics at the LHC », ISMD 2019, États-Unis, septembre 2019
- « ATLAS Jet Measurements for PDFs and their Uncertainties », DIS, États-Unis, mars 2020

Frédéric Kapusta

- « Towards an analytical threshold function of the two lepton pair production in gamma-gamma collisions », Photon2019, Frascati, Italie, juin 2019

Daniel Kerszberg

- « The cosmic-ray electron spectrum measured with H.E.S.S. », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017

Didier Lacour

- « A High-Granularity Timing Detector for the Phase-II upgrade of the ATLAS Calorimeter system : detector concept description and first beam test results », CHEF2017, Lyon, France, octobre 2017

Bertrand Laforge

- « DM matter searches at LHC (ATLAS, CMS, LHCb) », New Trends in High Energy Physics, Odessa, Ukraine, mai 2019
- « Répondre au défi du jeu sérieux à l'Université : le projet play@SU », Game For Change et Journée du Comité des Usages Mutualisés du numérique pour l'Enseignement, Paris, France, décembre 2017 et avril 2018
- « Répondre au défi du jeu sérieux à l'Université : le projet Ikigai », Workshop Ikigai, Paris, France, juin 2019

Pierre-Francois Léget

- « Cosmic shear with LSST : Challenges of shear measurement », Rencontres du Vietnam, Quy Nhon, Vietnam, août 2019

Francois Legrand

- « AHM (Ansible Host Manager), un outil graphique pour gérer vos fichiers hosts pour Ansible », JRES 2017, Nantes, novembre 2017

Jean-Philippe Lenain

- « FLAapLUC : a pipeline using Fermi-LAT data for prompt alerts on flaring blazars », Half a Century of Blazars and Beyond, Torino, Italie, juin 2018
- « H.E.S.S. observations following multi-messenger alerts in real-time », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Target of Opportunity Observations of Blazars with H.E.S.S. », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Observation of the extremely bright flare of the FSRQ 3C279 with H.E.S.S. II », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « H.E.S.S. discovery of very-high-energy emission from the blazar PKS 0736+017 : on the location of the gamma-ray emitting region in FSRQs », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017

- « Gammapy : high level data analysis for extragalactic science cases with the Cherenkov Telescope Array », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Performance of the upgraded H.E.S.S. cameras », ICRC 2017 », Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Gammapy - A prototype for the CTA science tools ICRC 2017 », Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Run-Wise Simulations for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope Arrays », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Hardware and software architecture of the upgraded H.E.S.S. cameras », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « The cosmic-ray electron spectrum measured with H.E.S.S. », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Multi-wavelength observations of flaring blazars with ATOM and Fermi-LAT », 7th Fermi symposium, Garmisch-Partenkirchen, Allemagne, octobre 2017
- « FLAapLUC : a pipeline using Fermi-LAT data for prompt alerts on flaring blazars », Half a Century of Blazars and Beyond, Turin, Italie, juin 2018
- « Gammas and neutrinos from TXS 0506+056 », SF2A 2018, Bordeaux, France, août 2018
- « Monitoring blazars with Fermi-LAT and prompt triggering on flares at very high energies with H.E.S.S. », Monitoring the non-thermal Universe, Cochem, Allemagne, septembre 2018
- « Observations of blazar PKS 2023-07 in flaring state with HESS and Fermi-LAT in 2016-2017 and constraints on an intrinsic cut-off », ICRC 2019, Madison, États-Unis, juillet 2019
- « H.E.S.S. searches for TeV gamma-rays associated to high-energy neutrinos », ICRC 2019, Madison, États-Unis, juillet 2019

Alexander Leopold

- « A High-Granularity Timing Detector for the Phase-II upgrade of the ATLAS Calorimeter system », detector session poster, EPS HEP 2019, Ghent, Belgique, juillet 2019

Christelle Levy

- « Lorentz Invariance Violation searches: combined likelihood study on data by H.E.S.S., MAGIC and VERITAS », TeVPA 2019, Sydney, Australie, décembre 2019
- « Lorentz Invariance Violation searches : modeling intrinsic time-lags in flaring blazars », TeVPA 2019, Sydney, Australie, décembre 2019

Changqiao Li

- « Evidence for the H to bbar decay with the ATLAS detector », XXXII Rencontres de Physique de La Vallée d'Aoste, La Thuile, Italie, février 2018

Kun Liu

- « Higgs studies in ATLAS and CMS », Workshop on Connecting Insights in Fundamental Physics : Standard Model and Beyond, Corfu 2019, Corfou, Grèce, août 2019

Benoît Loiseau

- « An Advantage of « Upper Levels » », avec la contribution de Sławomir Wycech, 3rd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics, Cracovie, Pologne, juin 2019
- « Parametrizations of three-body hadronic B- and D-decay amplitudes », CHARM 2018, The 9th International Workshop on Charm Physics, Novosibirsk, Russie, mai 2018
- « $B^0 \rightarrow KS^0K^+K^-$ amplitudes in terms of analytic and unitary kaon form factors », Future Challenges in Non-Leptonic B Decays: Theory and Experiment, Mainz, Allemagne, janvier 2019

Ilaria Luise

- « ATLAS observation of $H \rightarrow b\bar{b}$ decays in the VH production mode », Higgs Hunting 2018, Paris, France, juillet 2018

Bogdan Malaescu

- « Standard model measurements with the ATLAS detector », HEP2018, Valparaiso, Chili, janvier 2018
- « Hadronic contribution to $(g-2)_\mu$ from e^+e^- annihilations », Workshop on hadronic vacuum polarization contributions to muon $g-2$, KEK, Japon, février 2018
- « Hadronic contribution to $(g-2)_\mu$ from e^+e^- annihilations », $g-2$ Workshop, Mainz, Allemagne, juin 2018
- « Treatment of uncertainties and correlations in combinations of e^+e^- annihilation data », $g-2$ Workshop, Mainz, Allemagne, juin 2018
- « Inclusive jet and dijet production at the LHC », QCD at LHC, Dresden, Allemagne, août 2018
- « PDF benchmarking report », Workshop LHC EWWG, CERN, Suisse, juillet 2019
- « ATLAS Status Report », Session ouverte LHCC, CERN, Suisse, septembre 2019
- « Proposal : conservative merging of model-independent HVP combination results », Third Plenary Workshop of the Muon $g-2$ Theory Initiative, Washington, États-Unis, septembre 2019
- « Project proposals for the LHC EWWG V+jets », LHC EWWG V+jets, CERN, Suisse, novembre 2019
- « Combining e^+e^- (τ) hadronic spectra and applications », GenT workshop on Precision probes of New Physics, Valencia, Espagne, décembre 2019

Giovanni Marchiori

- « Rare and lepton-flavour-violating Higgs boson decays in ATLAS », EPS-HEPS 2019, Ghent, Belgique, juillet 2019
- « Higgs boson couplings to bosons in ATLAS LHC Days 2018 », Split, Croatie, septembre 2018
- « Experimental prospects on single Higgs measurements at HL-LHC », IRN Terascale workshop, Annecy, France, mai 2019
- « Recent highlights from the ATLAS experiment with the LHC Run2 data », 12th workshop of the France-Chine Particle Physics Laboratory, Shanghai, Chine, avril 2019

Olivier Martineau

- « Status of the GRAND project », ICRC2019, Madison, États-Unis, juillet 2019
- « The GRAND project & GRANDProto300 experiment », UHECR2018, Paris, France, octobre 2018
- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », VHEPU2018, Quy Nhon, Vietnam, août 2018
- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », TEVPa2017, Columbus, États-Unis, août 2017

Ariel Matalon

- « The search for light dark matter with DAMIC and DAMIC-M », SJTSF, Paris, France, décembre 2018
- « Development of a test chamber to characterize CCDs for next-generation Dark Matter direct-detection with DAMIC-M », Congrès des Doctorants, Paris, France, mars 2019
- « Measurements of radioactive backgrounds in the high-resistivity silicon CCDs of the DAMIC Experiment at SNOLAB », Low Radioactivity Techniques Workshop, Canfranc Espagne, mai 2019
- « Measuring cosmogenic activation rates in active detector material », Low Radioactivity Techniques Workshop, Canfranc, Espagne, mai 2019
- « The Search for Light Dark Matter with DAMIC and DAMIC-M », JRJC2019, Paris, France, novembre 2019

Victor Mendoza

- « Portability and reproducibility/repeatability in research », contributions au poster de C. Cavet, S. Gadrat and the ComputeOps, CHEP 2019, Australie, novembre 2019

Andrea Mogini

- « Testing lepton flavour universality with LHCb », LHCP 2018, Bologne, Italie, juin 2018
- « LHCb full-detector real-time alignment and calibration : latest developments and perspective », LHCP 2018, Bologne, Italie, juin 2018

Anyssa Navrer-Agasson

- « Results from the ARIS experiment », 30^{ème} Rencontres de Blois, Blois, France, juin 2018

Ioannis Nomidis

- « Measurement of cross sections in Higgs boson decays to two photons with the ATLAS detector », EPS-HEPS 2019, Ghent, Belgique, juillet 2019
- « Higgs measurements in the di-boson final state », Moriond EW, La Thuile, Italie, mars 2018

Giorgos Papadopoulos

- « ADC evaluation for the DAMIC-M experiment », Congrès des doctorants, Paris, mars 2019
- « Novel electronics for DAMIC-M », JRJC2019, Paris, novembre 2019

Cédric Perennes

- « First combined studies on Lorentz Invariance Violation from observations of astrophysical sources », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Intrinsic time lags in blazar flares and the search of Lorentz Invariance Violation signatures », ICRC 2017, Busan, Corée du Sud, juillet 2017
- « Intrinsic spectral timelags in blazar TeV flares », TeVPa 2018, Berlin, Allemagne, août 2018
- « Energy dependent time lag search in blazar emissions with H.E.S.S. », TeVPa 2018, Berlin, Allemagne, août 2018

Sandrine Perruchot

- « Integration and testing of the DESI multi-object spectrograph : performance tests and results for the first unit out of ten », SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, États-Unis, juin 2018

Francesco Polci

- « Lepton flavor violating B-decays at LHCb and B-factories », Workshop on rare semileptonic b decays 2019, Lyon, France, septembre 2019
- « Plans and prospects for flavor physics at LHC », LHCP 2019, Puebla, Mexique, mai 2019

- « Performance of the LHCb trigger and full real-time reconstruction in Run 2 of the LHC », LHCP 2019, Puebla, Mexique, mai 2019
- « Lepton flavour (universality) violating B decays in loops », XIII meeting on B physics, Marseille, France, octobre 2018
- « Lepton flavour universality tests at LHCb », QCD 2017, Montpellier, France, juillet 2017
- « Hints of possible standard model deviations at LHCb », IRN Terascale, Montpellier, France, juillet 2017

Renato Quagliani

- « LHCb Trigger Upgrade », Connecting the Dots, Seattle, États-Unis, mars 2018
- « A novel standalone track reconstruction algorithm for the LHCb upgrade », Connecting the Dots, Seattle, États-Unis, mars 2018
- « B-flavour anomalies in $b \rightarrow sll$ and $b \rightarrow clnu$ transitions at LHCb », QCD 2019, Montpellier, France, juillet 2019

Nicolas Regnault

- « New Calibration Methods », SCAM, Chicago, États-Unis, octobre 2019

Florian Reiss

- « Report from RAMP challenge on fast vertexing », Connecting the Dots, Valence, Espagne, avril 2019

Clare Saunders

- « Improving the Standardization of Type Ia Supernovae », Rencontres du Moriond, La Thuile, Italie, mars 2018
- « New Models for Type Ia Supernovae with Spectrophotometric Data from the Nearby Supernova Factory », EWASS 2018, Liverpool, Royaume Uni, avril 2018
- « SNEMO : Demonstration and Applications of a New Empirical Model for Type Ia Supernovae », AAS Meeting #233, Seattle, États-Unis, janvier 2019
- « SNEMO : Type Ia Supernova Modeling with Spectrophotometric Data from the Nearby Supernova Factory », AAS Meeting #231, Washington, États-Unis, janvier 2018

Luca Scotti Lavina

- « The ultimate low-background astroparticle physics observatory », 15th Patras Workshop on Axions, WIMP and WISP, Freiburg, Allemagne, juin 2019

Reem Taibah

- « Performance of LPNHE/FBK/INFN thin n-on-p planar pixels sensors for the ATLAS ITK », 14th « Trento » Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors, Trento, Italie, février 2019

Ahmed Tarek

- « Measurement of Higgs boson fiducial and differential cross sections in the two-photon decay channel with 80 fb⁻¹ of 13 TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector », Corfu 2018 : Workshop on the Standard Model and Beyond, Corfou, Grèce, août 2018

Sophie Trincaz-Duvodin

- « Test Beam Results for HTGD sensors », Journées Upgrade ATLAS IN2P3, Annecy, France, avril 2018

Dorothea vom Bruch

- « Online track reconstruction on GPUs for the Mu3e and LHCb experiment », Real-time workshop, Williamsburg, États-Unis, juin 2018
- « LHCb full-detector real-time alignment and calibration : latest developments and perspectives », Real-time workshop, Williamsburg, États-Unis, juin 2018

- « Physics and computing performance of reconstruction algorithms for the GPU High Level Trigger 1 of LHCb », poster présenté à l'oral comme gagnante du prix du meilleur poster, ACAT 2019, Saas Fee, Suisse, mars 2019
- « Physics performance and event throughput of the GPU High Level Trigger 1 of LHCb », CHEP 2019, Adelaide, Australie, novembre 2019
- « A GPU High Level Trigger 1 for LHCb », PASC 2019, Zurich, Suisse, juin 2019

Da Yu Tou

- « NN tracking for LHCb vertex detector », IN2P3 machine learning workshop, Lyon, France, mars 2018
- « HF results as probes for the charged Higgs sector », Higgs Hunting 2019, Orsay, France, juillet 2019

Jean-Philippe Zopounidis

- « Latest results from the Xenon1T Dark Matter Experiment, and future prospects », 31st Rencontres de Blois, Blois, France, juin 2019

Séminaires

Reina Camacho Toro

- « Searches for New Physics in boosted diboson topologies at ATLAS », TU Dresden, Dresde, Allemagne, janvier 2018

Matteo Cerruti

- « A window on the TeV sky : recent results from H.E.S.S. II », OCA, Nice, France, janvier 2018
- « A window on the TeV sky : recent results from H.E.S.S. II », RIKEN, Tokyo, Japon, janvier 2018
- « A window on the TeV sky : recent results from H.E.S.S. II », Rikkyo University, Tokyo, Japon, janvier 2018

Valentin Decoene

- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », Penn State, États-Unis, août 2019
- « Ultrahigh energy cosmic-rays and neutrinos from neutron-star mergers », IAP-APC, Paris, France, juin 2019
- « GRAND as a high-energy observatory: high energy source modeling and reconstruction challenges », KIT, Karlsruhe, Allemagne, novembre 2019

Romain Gaïor

- « DM searches with DAMIC », Chiba University, Japon, décembre 2019
- « DM searches with DAMIC », ICRR Tokyo University, Japon, décembre 2019

Claudio Giganti

- « Darkside : the quest for Dark Matter with Liquid Argon », INSP, Paris, janvier 2019

Vladimir Gligorov

- « Detecting long-lived particles », Pizza seminar Heidelberg University, Heidelberg, Allemagne, juillet 2018
- « How to not dig yourself a hole: searching for long-lived particles at LHCb », Bohr Seminar, University of Manchester, Manchester, Royaume Uni, février 2019

Michael Joyce

- « Dark matter clustering in the dissipationless limit », Center for Astrophysics, Harvard University, Cambridge, États-Unis, février 2018
- « Dark matter clustering in the dissipationless limit Department of Physics », University of Pennsylvania, États-Unis, mars 2018

- « Dark matter clustering in the dissipationless limit Department of Physics », New York University, États-Unis, mai 2018
- « Towards high precision predictions for non-linear clustering of dark matter LUPM », Montpellier, France, octobre 2019

Pierre-Francois Léget

- « Improved description of Type Ia Supernovae variability for a better understanding of dark energy properties », CPPM, Marseille, France, janvier 2019
- « Improved description of Type Ia Supernovae variability for a better understanding of dark energy properties », IPNL, Lyon, France, janvier 2019
- « Improved description of Type Ia Supernovae variability for a better understanding of dark energy properties », LPNHE, Paris, France, mars 2019
- « Modeling atmospheric turbulence for optical wide field surveys in astronomy », SLAC, Menlo Park, États-Unis, octobre 2019
- « Improved description of Type Ia Supernovae variability for a better understanding of dark energy properties », University of Rochester, Rochester, États-Unis, octobre 2019
- « Challenges for constraining dark energy properties using LSST : reducing instrumental and astrophysical systematic effects », Duke University, Durham, États-Unis, octobre 2019
- « Cosmic shear with the Vera Rubin Observatory (LSST) : Challenges of shear measurement », LPC, Clermont-Ferrand, France, janvier 2020

Antoine Letessier Selvon

- « DAMIC-M a novel Dark Matter Experiment », University of Chicago in Paris, FACCTS program, février 2019
- « Techniques expérimentales pour les Sciences souterraines », IPNL, Lyon, France, novembre 2018
- « Recherche de matière noire légère et exploration du secteur caché au Laboratoire Souterrain de Modane », LPSC, Grenoble, France, mai 2018
- « Rayons Cosmiques 100 ans d'une réalité insoupçonnée », Académie des Sciences du Maroc, Rabat, Maroc, février 2018
- « DAMIC », JMN au LPNHE, Paris, novembre 2017

Benoît Loiseau

- « Charm 2018 summary », LPNHE, Paris, France, novembre 2018

Bogdan Malaescu

- « Les mesures de sections efficaces des jets », joint Talk ATLAS – Theory, CERN, Suisse, mars 2018

Olivier Martineau

- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », XiDian University, Xi'An, Chine, mars 2019
- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », CPPM, Marseille, France, mai 2018
- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection », Kun-Ming Astronomical Observatory, Chine, décembre 2017

José Ocariz

- « La physique du boson de Higgs au LHC : qu'avons-nous appris depuis sa découverte ? », Observatoire de Paris, Paris, France, février 2018

Boris Popov

- « Recent results from T2K an NA61/SHINE experiments », DNLP, JINR, Dubna, Russie, juillet 2019
- « Status of Japan-based accelerator neutrino program : from T2K to Hyper-Kamiokande », DNLP, JINR, Dubna, Russie, décembre 2019

Renato Quagliani

- « Real time triggering and event reconstruction in LHCb, its upgrade and beyond », Séminaires du DPhP CEA-Saclay, France, mai 2019

Clare Saunders

- « Les améliorations actuelles et futures de l'utilisation de Supernovae de Type Ia pour la cosmologie », IPNL, Lyon, France, mars 2017
- « Improving Type Ia Supernovae as Cosmological Indicators », ICG, Portsmouth, Royaume Uni, avril 2019

Luca Scotti Lavina

- « Present and future of Direct Dark Matter Search », LAL, Orsay, France, février 2018
- « Physics potential of dark matter search with XENON Project », ICAP Meeting, Observatoire de Paris, Paris, France, octobre 2018
- « Direct Dark Matter Search with XENON Project », LLR, Palaiseau, France, janvier 2020
- « Direct Detection with noble liquids », Prospective nationales : Physique des neutrinos et matière noire, GT06, Bordeaux, France, octobre 2019

Dorothea vom Bruch

- « Allen : A High Level Trigger on GPUs for LHCb », LNS colloquium at MIT, Cambridge, États-Unis, octobre 2019

Interventions dans les écoles thématiques

Pierre Astier

- « Cosmology », TESHEP, Slovénie, juillet 2017
- « Cosmology », TESHEP, Ukraine, juillet 2018
- « Grands relevés », Euclid, France, 2017, 2018 et 2019

Reina Camacho Toro

- « Introduction to Standard Model », Journées de Rencontre des Jeunes Chercheurs 2018, Lège-Cap-Ferret, France, octobre 2018
- « Introduction to Standard Model », Journées de Rencontre des Jeunes Chercheurs 2019, Logonna-Daoulas, France, novembre 2019

Guillaume Daubard

- « Stratégie de calcul de vis dans un cas de dilatation différentielle », ANF « Liaisons Mécaniques », Fréjus, France, septembre 2019

Romain Gaïor

- « Introduction astroparticules et cosmologie », Journées de Rencontre des Jeunes Chercheurs 2019, Logonna-Daoulas, France, novembre 2019

Vladimir Gligorov

- « From Collisions to Analysis », CERN-Fermilab summer school, CERN, Suisse, septembre 2017

Pierre-Francois Leget

- « Interpolating data using Gaussian Processes : With great power comes great responsibility », LSST-Dark Energy School, France, juillet 2019

Philippe Repain

- « Actualité de l'impression 3D Métal et formations disponibles », ANF I3D Métal, France, octobre 2018

Pascal Vincent

- « Physique des détecteurs », Technique de base du détecteur, Cargèse, avril 2019

Organisation de conférences et d'écoles thématiques

Pierre Antilogus

- Chair du comité scientifique, DESC meeting, Berkeley, Etats-Unis, février 2019
- Membre du comité d'organisation et du comité scientifique, DESC meeting, Paris, France, juillet 2019

Christophe Balland

- Organisateur, eBOSS in Paris 2018, LPNHE, Paris, France, décembre 2018
- Organisateur, eBOSS/DESI France, LPNHE, Paris, France, février 2018

Eli Ben-Haim

- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : Multibody charmless b-hadron decays, LPNHE, Paris, France, juin 2018

Gregorio Bernardi

- Membre du comité d'organisation, Higgs Hunting workshop VIII, Orsay, France, juillet 2017
- Membre du comité d'organisation, Higgs Hunting workshop IX, Orsay, France, juillet 2018
- Membre du comité d'organisation, Higgs Hunting workshop X, Orsay, France, juillet 2019
- Deputy Chair du comité d'experts internationaux, LHCP 2018, Bologne, Italie, mai 2018
- Membre du comité d'organisation, Joint ApPEC-NuP-PEC-ECFA seminar, Orsay, France, octobre 2019

Alain Blondel

- Membre du comité d'organisation, FCC-France, LPNHE, Paris, France, novembre 2019

Julien Bolmont

- Organisateur, Probing Quantum Spacetime with Astrophysical Sources : the CTA era and beyond, LPNHE, Paris, France, novembre 2017

Marco Bomben

- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, SIMDET2018- École thématique IN2P3 sur la simulation des détecteurs à silicium, Paris, France, octobre 2018

Giovanni Calderini

- Chair du comité d'organisation et membre du comité scientifique, SIMDET2018- École thématique IN2P3 sur la simulation des détecteurs à silicium, Paris, France, octobre 2018
- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, TESHEP2017, Slovenie, juillet 2017
- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, TESHEP2018, Ukraine, juillet 2018
- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, TESHEP2019, Ukraine, juillet 2019

Reina Camacho Toro

- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, 11th International Workshop on Boosted Object Phenomenology, Reconstruction and Searches in HEP (BOOST 2018), Boston, États-Unis, juillet 2018

Matthew Charles

- Chair du comité d'organisation, Workshop on Implications of LHCb measurements and future prospects, CERN, Suisse, octobre 2018
- Chair du comité d'organisation, Workshop on Implications of LHCb measurements and future prospects, CERN, Suisse, octobre 2019

- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : Multibody charmless b-hadron decays, LPNHE, Paris, France, juin 2018
- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : Singly and doubly charmed baryons, LPNHE, Paris, France, juin 2018
- Membre du comité d'organisation, GDR-Inf : annual meeting, Arles, France, novembre 2018

Jacques Dumarchez

- Organisateur, Moriond EW, La Thuile, Italie, mars 2017, mars 2018, mars 2019
- Organisateur, Moriond QCD 2017, La Thuile, Italie, mars 2017, mars 2018, mars 2019
- Chair de la conférence, Moriond VHEPU 2017, La Thuile, Italie, mars 2017
- Chair de la conférence, Moriond Grav, La Thuile, Italie, mars 2017, mars 2019
- Organisateur, Rencontres de Blois, Blois, France, juin 2017, juin 2018, juin 2019
- Chair de la conférence, Vietnam Cosmo, Quy Nhon, Vietnam, juillet 2017, août 2019
- Organisateur, Vietnam 2017 Neutrinos, Quy Nhon, Vietnam, juillet 2017
- Organisateur, Moriond Cosmo 2018, La Thuile, Italie, mars 2018
- Chair de la conférence, Vietnam 2018 Windows, Quy Nhon, Vietnam, août 2018
- Organisateur, Vietnam 2018 VHEPU, Quy Nhon, Vietnam, août 2018
- Organisateur, Neutrino History 2018, Paris, France, septembre 2018
- Organisateur, Vietnam 2019 « 3 neutrinos and beyond », Quy Nhon, Vietnam, août 2019

Romain Gaïor

- Membre du comité d'organisation, JRJC2019, Lognonn -Daoulas, France, novembre 2019

Hector Gil-Marín

- Organisateur, COSMO 17, Paris, France, août 2017
- Organisateur, eBOSS/DESI France, Paris, France, février 2018

Vladimir Gligorov

- Organisateur, Atelier sur l'analyse en temps réel, Dortmund, Allemagne, novembre 2018
- Organisateur, 1st Real Time Analysis workshop, Institut Pascal, Orsay, France, juillet 2019

Frédéric Kapusta

- Membre du comité d'experts internationaux, Photon2019, Frascati, Italie, juin 2019

Bertrand Laforge

- Organisateur, Dissecting the LHC results, Paris, France, avril 2017
- Organisateur, ILP day on Machine Learning Paris, France, novembre 2018

Didier Laporte

- Membre du comité d'organisation, journées ATLAS-Upgrade France, Grenoble, France, novembre 2019
- Membre du comité de pilotage, ANF Mécanique IN2P3, Aussois, France, septembre 2020

Olivier Le Dortz

- Membre du comité de pilotage, École IN2P3 d'électronique numérique FIAP, Paris, France, novembre 2019

Francois Legrand

- Organisateur, Rencontre des services informatiques de la fédération APC/LLR/LPNHE, LPNHE, Paris, France, octobre 2017

Bogdan Malaescu

- Organisateur, Workshop ATLAS sur la réinterprétation des données, CERN, Suisse, juillet et septembre 2017
- Organisateur, Workshop sur le programme de physique utilisant les données collectées avec les détecteurs avant d'ATLAS, CERN, Suisse, mars 2018 et avril 2019
- Organisateur, Workshop sur les données de bas pile-up collectées avec ATLAS, CERN, Suisse, mars 2018
- Organisateur, Workshop sur les études des théories effectives de champs utilisant des données ATLAS, CERN, Suisse, juillet et décembre 2018
- Organisateur, Workshop ATLAS Modèle Standard, Londres, Royaume Uni, septembre 2018 et Belgrade, Serbie, septembre 2019
- Convener de la session "QCD and Hadronic Physics", EPS, Ghent, Belgique, juillet 2019
- Organisateur, Ultimate precision at hadron colliders, Paris-Saclay, France, décembre 2019
- Organisateur, Réunion générale LHC EWWG, CERN, Suisse, décembre 2019

Giovanni Marchiori

- Membre du comité d'organisation, Joint ApPEC-NuP-PEC-ECFA seminar, Orsay, France, octobre 2019
- Organisateur, Workshop on Photon Physics and Simulation at Hadron Colliders, Frascati, Italie, juin 2019
- Organisateur, 16th Workshop of the LHC Higgs cross section working group, CERN, Suisse, octobre 2019
- Organisateur, 15th Workshop of the LHC Higgs cross section working group, CERN, Suisse, décembre 2018
- Membre du comité d'organisation et membre du comité scientifique, École thématique IN2P3 sur la simulation des détecteurs à silicium, Paris, France, octobre 2018
- Membre du comité scientifique, XVI Seminar on Software for Nuclear, Subnuclear and Applied Physics, Alghero, Italie, mai 2019
- Membre du comité scientifique, XV Seminar on Software for Nuclear, Subnuclear and Applied Physics, Alghero, Italie, mai 2018

Olivier Martineau

- Organisateur, Workshop on radio detection, Columbus, États-Unis, août 2017

Irena Nikolic

- Membre du comité d'organisation, Journées ATLAS Upgrade France, Annecy, France, 2018

Francesco Polci

- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : The future of the intensity Frontier, CERN, Suisse, février 2018
- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : Multibody charmless b-hadron decays, LPNHE, Paris, France, juin 2018
- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : Singly and doubly charmed baryons, LPNHE, Paris, France, juin 2018
- Membre du comité d'organisation, GDR-Inf : annual meeting, Arles, France, novembre 2018
- Membre du comité d'organisation, GDR-Inf lectures : gamma and Dalitz Plot analyses, LPNHE, Paris, France, mai 2019
- Membre du comité d'organisation, Workshop GDR-Inf : QED corrections to (semi-) leptonic B decays, LPNHE, Paris, France, juillet 2019

- Membre du comité d'organisation, GDR-Inf lectures : Vub determination, LPNHE, Paris, France, septembre 2019
- Membre du comité d'organisation, 7th workshop on rare semileptonic B decays, IP2I, Lyon, France, septembre 2019
- Membre du comité d'organisation, GDR-Inf annual workshop, Sommières, France, novembre 2019

Philippe Repain

- Organisateur, ANF I3D Métal, Samatan, France, octobre 2018
- Organisateur, Colloque Impression 3D pour la physique des 2 Infinis, Orsay, France, décembre 2018
- Organisateur, GT 3 : Impression 3D, JDEV du Réseau DevLog, Marseille, France, juillet 2017

Sophie Trincaz-Duvoind

- Membre du comité d'organisation, journées ATLAS-Upgrade, Grenoble, France, novembre 2019
- Membre du comité d'organisation, Workshop Physique ATLAS France, Vogüé, France 2017

Patricia Warin-Charpentier

- Membre du comité d'organisation, Journée Technique (JoSy) Monitoring, LPNHE, France, mars 2017
- Membre du comité d'organisation, Journée Technique (JTech) CEPH, LPNHE, France, novembre 2018

Marco Zito

- Membre du comité d'organisation, FCC-France, LPNHE, Paris, France, novembre 2019

Responsabilités dans les comités d'évaluation, les instances scientifiques et techniques

Pierre Antilogus

- LSST DESC Technical Coordinator, depuis 2017
- Responsable scientifique pour la contribution de l'IN2P3 au plan focal de LSST, depuis 2007
- Responsable scientifique pour la contribution de l'IN2P3 au changeur de filtre de LSST, depuis 2015

Pierre Astier

- Membre du conseil scientifique de l'IP2I de Lyon, France, depuis 2015
- Responsable du groupe Sensor Anomalies de DESC depuis 2015
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2018
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2017

Christophe Balland

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, de 2017 à 2019

Eli Ben Haim

- Coordinateur du groupe Rare Decays de Heavy Flavour Averaging Group (HFLAV), depuis 2013
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2008 à 2017
- Coordinateur du groupe de travail b-hadrons decays with no charm / 3 body decays de LHCb, de 2017 à 2019
- Coordinateur du groupe de travail b-hadrons decays with no charm / event selection de LHCb, depuis 2019
- Coordinateur du groupe de travail charmless B decays de BaBar, depuis 2009

Gregorio Bernardi

- Directeur du LPNHE, de 2017 à 2019
- Président du conseil scientifique du LPNHE, de 2017 à 2019

- Président du conseil de laboratoire du LPNHE, de 2017 à 2019

Emilie Bertholet

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail b-hadrons decays with no charm et Simulation de LHCb, de 2018 à 2019

Julien Bolmont

- Membre du conseil scientifique de la DIM ACAV+ de la région Ile de France, depuis 2018
- Directeur adjoint du LPNHE, de 2015 à 2018
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, de 2015 à 2018
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2015 à 2018
- Membre du bureau de l'action COST Européenne CA18108 et responsable du comité pour l'attribution des bourses de participation aux conférences, depuis 2019
- Responsable des stages au LPNHE, de 2016 à 2018

Marco Bomben

- Responsable des tests en faisceaux pour les détecteurs à pixels et ITk d'ATLAS, depuis 2011
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Nicolas Busca

- Responsable eBOSS/DESI France pour l'IN2P3, de 2017 à 2018

Giovanni Calderini

- Coordinateur ITk France, depuis 2016
- Chair du conseil d'institut de AIDA-2020, depuis 2017
- Coordinateur de ITk Pixel Procurement, depuis 2018
- Co-éditeur de la section Capteurs et de la section Modules du TDR ITk Pixels de 2017
- Coordinateur de la partie Microchannel de AIDA-2020 (WP9), depuis 2015
- Membre de l'équipe de préparation de la proposition AIDA-Innova 2019, depuis 2019

Reina Camacho Toro

- Coordinateur du sous-groupe Flavour Tagging Calibration d'ATLAS, depuis 2019
- Membre du Early Career Scientist Board d'ATLAS, depuis 2019
- Membre du Latin-American Strategy for Research Infrastructures Group (LASF4RI), depuis 2019
- Coordinatrice de l'analyse Measurement of the jet mass in high transverse momentum $Z(bb)\gamma$ production at 13 TeV, de 2018 à 2019
- Coordinatrice de l'analyse Search for chargino and neutralino production in final states with hadronically decaying Higgs boson and missing transverse momentum at 13 TeV, de 2017 à 2018
- Coordinatrice de l'analyse Combination of searches for heavy resonances decaying into bosonic and leptonic final states at 13 TeV, de 2017 à 2018

Matteo Cerruti

- Coordinateur adjoint du groupe de travail extragalactique pour H.E.S.S., de 2017 à 2018

Matthew Charles

- Coordinateur de physique élu de LHCb, depuis 2018
- Responsable Early Career, Gender and Diversity Office de LHCb, de 2016 à 2018
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2017
- Coordinateur du groupe Heavy flavour production and spectroscopy du GDR Intensity frontier, de 2017 à 2018

Rémi Cornat

- Directeur technique du LPNHE, depuis 2017
- Membre invité du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2017
- Membre invité du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2017

Olivier Dadoun

- Président du jury du concours CNRS BAP E, octobre 2019

Wilfrid da Silva

- Membre du Coordination Board de COMET, depuis 2014

Guillaume Daubard

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2017
- Membre du comité de pilotage des ANF Mécanique IN2P3, de 2017 à 2019
- Président de jury de concours CNRS, en 2019

Giulio Dujany

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail Rare decays et Stripping de LHCb, en 2017
- Coordinateur du groupe de travail Tracking, alignment and vertexing de LHCb, en 2018

Jacques Dumarchez

- Membre du Publication Board de T2K, en 2017

Claudio Giganti

- Co-coordinateur de l'analyse d'oscillation dans T2K, de 2017 à 2018
- Responsable du projet ND280-upgrade, depuis 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2017

Hector Gil-Marín

- Chair du groupe de travail Galaxy clustering de eBOSS, de 2017 à 2018

Vladimir Gligoric

- Coordinateur du groupe Upgrade software de LHCb, de 2017 à 2018
- Responsable du projet Real Time Analysis (RTA) de LHCb, depuis 2019
- Responsable des Masterclasses au LPNHE, depuis 2017
- Éditeur du Yellow Report sur HL-LHC, en 2018
- Co-éditeur du physics case pour une deuxième jouvence de LHCb, de 2017 à 2018
- Coordinateur adjoint de physique de LHCb, de 2016 à 2018

Thomas Grammatico

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail b-hadrons decays with no charm et Simulation de LHCb, depuis 2019

Mathieu Guigue

- Co-coordinateur du ND280-upgrade software, depuis 2019

Delphine Hardin

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Claire Juramy-Gilles

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2017 à 2019

Frédéric Kapusta

- Responsable de COMET-France, depuis 2018

Bertrand Laforge

- Contact pour l'analyse Higgs $\rightarrow\gamma\gamma$ + MET d'ATLAS, de 2017 à 2019
- Co-responsable du groupe ATLAS Calorimeter Global Monitoring, de 2018 à 2019
- Responsable du Monitoring e/γ d'ATLAS, de 2017 à 2019

Didier Laporte

- Membre du comité de pilotage du groupe de travail pour les prospectives IN2P3 « Détecteurs et instrumentation associée », depuis 2019
- Membre du comité de pilotage et représentant des administrateurs locaux d'Atrium
- Membre élu conseil scientifique de l'IN2P3, depuis 2019
- Membre de jury de concours externe CNRS technicien en BAP G, en 2019

Hervé Lebbollo

- Coordinateur WP Electronic de DAMIC-M, depuis 2018

Olivier Le Dortz

- Responsable de l'électronique Back End du projet SciFi pour la jouvence de LHCb, depuis 2016

Pierre-François Leget

- Responsable du groupe Point Spread Function de LSST DESC, depuis 2019
- Membre du LSST DESC collaboration council, depuis 2019

François Legrand

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Laurent Le Guillou

- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2017 à 2019

Jean-Philippe Lenain

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, de 2014 à 2018
- Coordinateur du groupe de travail Simulations pour H.E.S.S., depuis 2019

Antoine Letessier Selvon

- Coordinateur scientifique international de DAMIC-M, depuis 2018
- Co-Directeur du Labex ILP, depuis 2016
- Président du conseil scientifique de Cosmos à l'école, depuis 2015

Kun Liu

- Coordinateur de l'analyse VH, H \rightarrow bb resolved d'ATLAS, de 2018 à 2019

Bogdan Malaescu

- Coordinateur du groupe Standard Model d'ATLAS, de 2017 à 2019
- Coordinateur du LHC EW Working Group faisant partie du LPCC en tant que représentant d'ATLAS, depuis 2019
- Membre du comité de statistique d'ATLAS, depuis 2019

Giovanni Marchiori

- Coordinateur de l'analyse Higgs $\rightarrow\gamma\gamma$ differential cross sections d'ATLAS, en 2019
- Membre du conseil scientifique de la FRIF, en 2019
- Coordinateur du groupe de travail 1 du LHC Higgs cross section working group, de 2018 à 2019
- Coordinateur du groupe de travail Higgs $\rightarrow\gamma\gamma$ (HGam) d'ATLAS, en 2017

Olivier Martineau

- Porte-parole de TREND, jusqu'en 2019
- Porte-parole de GRAND, depuis 2017

Evelyne Méphane

- Membre de jury de concours externe CNRS et MEN
- Membre invitée du conseil de laboratoire du LPNHE

Jean-Luc Meunier

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2018
- Coordinateur Front End Board de NectarCAM, depuis 2019

Andrea Mogini

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail Rare decays et Tracking, alignment and vertexing de LHCb, de 2016 à 2017

Ioannis Nomidis

- Coordinateur du groupe de travail Higgs $\rightarrow\gamma\gamma$ (HGam) d'ATLAS, depuis 2019
- Coordinateur de l'analyse d'ATLAS Low- and high-mass diphoton resonances, depuis 2019
- Contact des analyses Low/high-mass $\gamma\gamma$ resonances d'ATLAS, depuis 2019

José Ocariz

- Membre du comité de pilotage du laboratoire Franco-Japonais FJPL-TYL, de 2018 à 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2017 à 2019

Ignasi Pérez Ràfols

- Membre du groupe Survey de WEAWE-QSO, en 2019

Francesco Polci

- Coordinateur du groupe de travail Tracking, alignment and vertexing de LHCb, de 2016 à 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, de 2017 à 2019
- Directeur du GDR Intensity frontier, de 2017 à 2021

Boris Popov

- Coordinateur de l'analyse des données de NA61/SHINE pour T2K, depuis 2017
- Co-coordinateur du groupe faisceau de T2K, de 2017 à 2018
- Membre du speaker's board de T2K, de 2017 à 2018

Paolo Privitera

- Porte-parole de DAMIC-M, depuis 2018

Nicolas Regnault

- Co-coordinateur du groupe Photometric calibration de LSST DESC, depuis 2015
- Membre du conseil scientifique du Programme national Cosmologie et Galaxies, depuis 2014
- Membre du LSST DESC collaboration council, de 2016 à 2018

Florian Reiss

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail Tracking, alignment and vertexing et PID de LHCb, de 2018 à 2019

Philippe Repain

- Membre du COPIL RDM, de 2018 à 2019
- Membre du groupe de travail I3D Métal de l'IN2P3, de 2017 à 2019
- Coordinateur du groupe de travail I3D RDM, de 2015 à 2019

Mélissa Ridet

- Membre conseil scientifique de l'IN2P3 et de son bureau, de 2015 à 2018
- Responsable des propositions de thèses et stages de M2 du LPNHE, jusqu'en 2017
- Directrice adjointe du LPNHE, depuis 2019
- Membre invitée du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2019
- Membre invitée du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Lydia Roos

- Contact des analyses Low/high-mass $\gamma\gamma$ resonances d'ATLAS, en 2018
- Directrice adjointe scientifique de l'IN2P3 en charge du domaine « Laboratoires et sites », depuis 2018

Luca Scotto Lavina

- Responsable du groupe de travail XENON Computing and analysis tools, depuis 2019
- Responsable du groupe de travail XENON Storage and recovery systems, depuis 2012
- Responsable du groupe de travail DARWIN LXe target, depuis 2014
- Membre du Speakers Bureau de XENON, depuis 2016
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2017

François Toussenet

- Responsable technique national de CTA pour l'IN2P3, depuis 2018
- Coordinateur Front End Electronics de NectarCAM, depuis 2016

Sophie Trincas-Duvoid

- Représentante du LPNHE dans le comité Physique ATLAS France, de 2016 à 2019
- Correspondante du LPNHE pour le site internet ATLAS France, depuis 2018
- Responsable des stages au LPNHE, depuis 2019

Pascal Vincent

- Membre du conseil scientifique et du bureau scientifique de la DIM ACAV+ de la région Ile de France, de 2012 à 2017
- Membre du bureau de H.E.S.S., de 2001 à 2019

Patricia Warin-Charpentier

- Membre du comité de pilotage de la fédération de réseaux RESINFO, depuis 2016
- Membre du comité de coordination des informaticiens de l'IN2P3 et de l'IRFU
- Correspondante Sécurité des Systèmes d'Information du LPNHE
- Autorité d'enregistrement pour les certificats CNRS
- Membre de jury de concours externe CNRS IE et IR, en 2017 et en 2019

Da Yu Tou

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail Tracking, alignment and vertexing et le projet RTA de LHCb, depuis 2018

Marco Zito

- Responsable du projet ND280-upgrade, de 2017 à 2018
- Directeur du LPNHE, depuis 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2019
- Président du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Conférences Grand Public

Christophe Balland

- « Cosmologie Observationnelle : mesurer l'expansion de l'Univers », intervention en classe préparatoire, Lycée Charlemagne, Paris, 2017

Sébastien Bongard

- Conférence NEPAL, Classe Préparatoire, École Militaire d'Autun, Dijon, France, deux fois par an

Romain Gaïor

- « La vie des rayons », Séminaires dans un collège avec l'Association F93, France, 2017 et 2018
- « L'effet nucléaire », Séminaires dans un collège avec l'Association F93, France, 2018 et 2019

Bertrand Laforge

- « Propriétés du boson de Higgs et recherche de matière noire au LHC », Fête de la science, Paris, France, octobre 2017

Jean-Philippe Lenain

- « Une promenade dans le ciel », Intervention en grande section de maternelle, France, mars 2018
- « Planètes et fusées », Intervention en petite et moyenne section de maternelle, France, mai 2019

Antoine Letessier Selvon

- « Matière noire », Institut National d'Histoire de l'Art, Paris, France, mars 2019
- « Cosmos à l'École », Observatoire de Paris, Paris, juin 2018

José Ocariz

- « Après le Boson de Higgs », série de 3 conférences, Université Ouverte, Université Paris Diderot, Paris, France, mai 2018, mars et avril 2019

Luca Scotto Lavina

- « La vie des rayons », Séminaires dans un collège avec l'Association F93, France, 2017 et 2018
- « L'effet nucléaire », Séminaires dans un collège avec l'Association F93, France, 2018 et 2019

Sophie Trincaz-Duvoit

- « Préparation d'un détecteur de physique des particules pour le collisionneur à très haute luminosité LHC », Séminaire pour l'association des Étudiants de Physique de Sorbonne Université CuriOcity, Sorbonne Université, 2019

Marco Zito

- « Les neutrinos dévoilent les secrets de la matière et des étoiles », Fête de la Science, LPNHE, Paris, France, octobre 2018

Activités de vulgarisation

Tristan Beau

- « Enseignement scientifique, nouveau programme, 1^{ère} », co-auteur, ouvrage scolaire, Belin éducation, mai 2019

Eli Ben-Haim

- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Reina Camacho Toro

- Visite virtuelle de la caverne du détecteur ATLAS sur l'accélérateur LHC au CERN, fête de la Science, LPNHE, Paris, France, octobre 2019
- ICTP's Physics without Frontiers program for Latin-America : Ecuador and Colombia, août 2019
- ICTP's Physics without Frontiers program for Latin-America : Uruguay and Argentina, septembre 2018
- Article dans la revue de vulgarisation PERSEA, revue scientifique d'Amérique Latine, octobre 2018

Matthew Charles

- Guide lors des « CERN Open Days 2019 », CERN, Suisse, septembre 2019
- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019
- Contributions à plusieurs articles de vulgarisation sur LHCb pour le CERN Courier notamment, en 2018 et 2019

Guillaume Daubard

- Animateur Atelier Impression 3D, fête de la science, LPNHE, France, Paris, octobre 2019

Giulio Dujany

- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Romain Gaïor

- Atelier Radioactivité, LPNHE, France, fête de la science, octobre 2018 et octobre 2019

Vladimir Gligorov

- Organisation de quatre journées Masterclasses LHCb au LPNHE et intervenant lors de ces journées, mars 2018 et avril 2019

Thomas Grammatico

- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Hubert Krivine

- « Comprendre sans prévoir, prévoir sans comprendre », publications aux éditions Cassini, 2018
- « Petit traité de hasardologie », publications aux éditions Cassini, 2017

François Legrand

- « Speed dating », fête de la science, LPNHE, France, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Jean-Philippe Lenain

- Participations, fête de la science, LPNHE, France, octobre 2018 et octobre 2019

Antoine Letessier Selvon

- « Kosmos, l'épopée des particules », publication aux éditions de poche, novembre 2019

Bogdan Malaescu

- Guide pour la visite de députés français dans la salle de contrôle ATLAS, CERN, Suisse, mars 2018
- Participation à une table ronde sur le thème de la recherche en présence du ministre roumain de la recherche, CERN, Suisse, novembre 2018
- Participation à une table ronde sur le thème de la recherche en présence de M. Klaus Iohannis, président roumain et de M. Gérard Mourou, prix nobel de physique 2018, Paris, France, novembre 2018

José Ocariz

- Article dans la revue de vulgarisation PERSEA, revue scientifique d'Amérique Latine, octobre 2018
- Podcast pour la revue de vulgarisation PERSEA, revue scientifique d'Amérique Latine, avril 2019

Cédric Perennes

- Visites du LPNHE, fête de la Science, LPNHE, France, octobre 2017 et octobre 2018

Ignasi Pérez Ràfols

- « Joves i Ciència », supervision de 5 étudiants pour la réalisation d'un article, septembre à décembre 2019

Francesco Polci

- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Philippe Repain

- Animateur Atelier Impression 3D, fête de la science, LPNHE, France, Paris, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Mélissa Ridel

- Visites du LPNHE, fête de la Science, LPNHE, France, octobre 2018 et octobre 2019

Luca Scotto Lavina

- « Autour de la question », participation à une émission radio de RFI sur la matière noire, juillet 2017

Dorothea vom Bruch

- Implication dans l'organisation et des visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Patricia Warin-Charpentier

- Participation à l'organisation technique, fête de la science, LPNHE, France, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019
- « Speed dating », fête de la science, LPNHE, France, octobre 2017, octobre 2018 et octobre 2019

Distinctions

Collaborations D0 et CDF

- EPS HEP Prize for the discovery and the precise study of the Top Quark, 2019

Audrey Ducourthial

- 2^{ème} prix du meilleur poster lors de la conférence PSD11, 2017

Hubert Krivine

- Mention au palmarès des Trophées Tangentes 2017 pour son livre « Petit traité de hasardologie »

Jean-Philippe Lenain

- Prix de la collaboration H.E.S.S., 2018

Stefano Manzoni

- Prix « Marcello Conversi » de l'INFN pour les meilleures thèses en physique des particules, 2019
- Prix « ATLAS Thesis award 2018 » de la collaboration ATLAS pour une des meilleures thèses de l'année, 2019

Dorothea vom Bruch

- The Lee Grodzins Postdoctoral Award (MIT) pour son travail sur la reconstruction de traces sur GPU pour le logiciel de déclenchement de la jouvence du détecteur LHCb (projet ALLEN), 2019

Enseignement et formation par la recherche

- L'enseignement supérieur et le LPNHE
 - La Licence
 - Le Master
 - Le Doctorat
- Responsabilités dans les instances universitaires
 - Instances nationales
 - Sorbonne Université
 - Université de Paris
- Les thèses au LPNHE
 - L'attractivité du laboratoire
 - Le financement des thèses
 - L'accueil et le suivi des étudiant.e.s
- Liste des thèses soutenues au LPNHE entre juillet 2017 et décembre 2019
- Liste des habilitations à diriger des recherches soutenues au LPNHE entre juillet 2017 et décembre 2019
- Les stages au LPNHE
 - Les formations d'origine des stagiaires
 - L'offre de stages
 - Les thématiques des stages
 - L'accueil au laboratoire
- Action pédagogique spécifique : Ikigai, mettre le jeu au service de la pédagogie dans le supérieur et au service de la médiation scientifique et culturelle

ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE

Les activités de formation et de diffusion des connaissances constituent une des missions principales du LPNHE. Les 24 enseignant.e.s-chercheur.euse.s du laboratoire, rattaché.e.s soit à Sorbonne Université (SU), soit à l'Université de Paris (UP), dispensent des enseignements à tous les niveaux, du L1 au doctorat, en abordant les concepts de base aussi bien que les avancées les plus récentes de la recherche. La majorité des chercheur.euse.s et enseignant.e.s-chercheur.euse.s du LPNHE est impliqué dans l'encadrement de thèses de doctorat.

La formation par la recherche est également essentielle au laboratoire. Les équipes scientifiques et techniques accueillent chaque année une cinquantaine de stagiaires de tous niveaux (du collège au M2), ainsi qu'une demi-douzaine de nouveaux.elles doctorant.e.s. La prise en charge des stagiaires est

coordonnée par un.e responsable des stages.

Le suivi des doctorant.e.s est continu et un comité de thèse assure pour chaque doctorant.e des conditions de travail optimales tout au long de sa présence au laboratoire.

D'autre part, des chercheur.euse.s, enseignant.e.s-chercheur.euse.s et personnels techniques ou administratifs participent chaque année, en tant que formateur.trice.s, à des écoles thématiques.

L'implication particulièrement forte des enseignant.e.s-chercheur.euse.s du LPNHE dans les parcours d'enseignement et la gestion de différents masters permet d'établir un lien fort entre le laboratoire et les étudiant.e.s et de renforcer la visibilité du LPNHE auprès de ces dernier.ères.s et auprès des universités de tutelle.

L'enseignement supérieur et le LPNHE

Environ la moitié des chercheur.euse.s du LPNHE sont des enseignant.e.s-chercheur.euse.s (EC) de Sorbonne Université et de l'Université de Paris.

Le tableau ci-dessous montre que le nombre total d'enseignant.e.s-chercheur.euse.s est stable depuis plusieurs années.

Université d'appartenance	Catégorie	2016	2017	2018	2019	2020
Sorbonne Université	PR	5	5	5	6	6
	MCF	11	11	11	10	10
Université de Paris	PR	2	2	2	2	1
	MCF	6	6	6	4	4
	Total	24	24	24	22	21

Évolution des effectifs enseignant.e.s-chercheur.euse.s au LPNHE entre janvier 2016 et janvier 2020.

À l'enseignement des enseignant.e.s-chercheur.euse.s titulaires, s'ajoute celui de moins d'une dizaine de doctorant.e.s chargé.e.s de mission d'enseignement. Des chercheur.euse.s et ingénieur.e.s du CNRS participent aussi à des enseignements à

l'université, dans des grandes écoles, des écoles thématiques de l'IN2P3 ou des écoles d'été.

Les enseignements sont dispensés en Licence, en Master ou encore dans les cursus de Méde-

ciné. Les disciplines enseignées à l'université dans lesquelles le LPNHE possède une expertise sont la physique des particules et des astroparticules, la cosmologie observationnelle, l'instrumentation, l'analyse et le traitement de données ainsi que l'électronique et la programmation scientifique.

La Licence

Les enseignant.e.s-chercheur.euse.s du LPNHE participent aux enseignements des trois années de la licence dans les différentes mentions proposées par les universités de tutelle. Ils/elles sont impliqué.e.s non seulement dans l'enseignement des matières correspondant aux activités du laboratoire, mais aussi dans l'enseignement de la physique générale (mécanique, électromagnétisme, thermodynamique, ondes, optique, physique quantique, physique nucléaire, etc.) dans tous les cycles. Outre les enseignements proprement dits, ils/elles assurent la responsabilité d'une vingtaine d'unités d'enseignement, certaines ayant des effectifs de plus de 1000 étudiant.e.s. Un enseignant-chercheur du laboratoire est responsable de la coordination des enseignements de physique au niveau de la première année de Licence. Depuis 2019, un enseignant-chercheur du laboratoire est responsable de l'enseignement



de physique pour la Première Année Commune des Études de Santé (PACES). Ce cours s'adresse à quelque 1700 étudiant.e.s qui concourent pour intégrer la suite des études en médecine, pharmacie, odontologie ou maïeutique.

Le Master

En première année de master, les enseignant.e.s-chercheur.euse.s assurent les enseignements liés aux activités du laboratoire : physique nucléaire et des particules, interaction particule-matière, physique numérique et projets expérimentaux dans les mentions « Physique et Applications » (PA) et « Sciences De l'Ingénieur » (SDI) du master « Physique fondamentale et applications » de Sorbonne Université, dans la mention « Physique Fondamentale et Sciences pour l'Ingénieur » (PFSI) du master « Sciences, Technologie et Santé » et du master « Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation » de l'Université de Paris.

En deuxième année de master, le laboratoire est impliqué dans quatre spécialités et accueille, pour certaines, leurs enseignements.

- Spécialité Noyau, Particules, Astroparticules et Cosmologie (NPAC)

Dans les domaines de la physique des hautes énergies, cette spécialité offre aux étudiant.e.s une formation équilibrée sur trois plans – théorie, modélisation, instrumentation. Les personnels du LPNHE interviennent dans les enseignements de physique des particules, cosmologie, astroparticules et instrumentation en physique des hautes énergies. La



co-responsabilité de cette spécialité est assurée par deux enseignant.e.s-chercheur.euse.s de Sorbonne Université du laboratoire.

Partenariats : Sorbonne Université, Université de Paris, Université Paris-Saclay

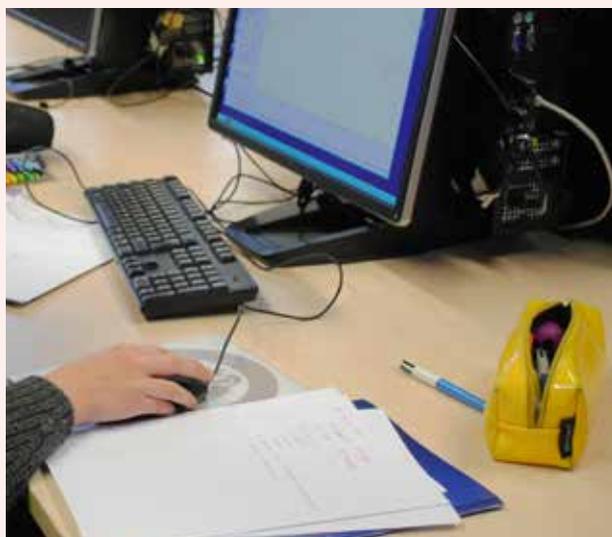
- Spécialité Capteurs, Instrumentation et Mesures (CIMES)

Cette spécialité propose un enseignement généraliste dans des domaines variés recouvrant l'environnement, le médical ou l'industrie. Elle donne aux étudiant.e.s une formation large et diversifiée en physique des capteurs, en acquisition et traitement du signal, ainsi qu'en analyse des données. Les personnels du LPNHE y enseignent les interactions particules-matière, le traitement du signal, les grands instruments ou les modélisations d'expériences. La co-responsabilité de cette spécialité est assurée par un enseignant-chercheur du laboratoire.

Partenariats : Sorbonne Université et ESPCI - Paris - PSL

- Spécialité Ingénierie Nucléaire (IN)

Cette spécialité a pour objectif de former des étudiant.e.s dans les domaines du génie civil, l'instrumentation pour le nucléaire, la gestion des ressources et la modélisation du stockage des déchets. Dans le cadre de cette formation, des



personnels du LPNHE ont la responsabilité des cours et des travaux pratiques de physique nucléaire et d'instrumentation. Depuis 2016, un enseignant-chercheur du laboratoire est en charge du cours de neutronique.

Partenariat : Sorbonne Université



Le Doctorat

Depuis 2014, le LPNHE est rattaché à l'école doctorale (ED) « Sciences de la Terre et de l'Environnement, et Physique de l'Univers » (ED 560, STEP'UP) et intervient dans la composante « Physique de l'Univers ». Un enseignant-chercheur du laboratoire est directeur adjoint de cette école doctorale et fait partie du bureau de l'ED, une autre assure la responsabilité de la formation des doctorant.e.s pour la composante « Physique de l'Univers » et fait partie du Conseil de l'École doctorale.

Le laboratoire est également impliqué dans la formation à l'enseignement des doctorant.e.s chargé.e.s de mission d'enseignement affectés à l'UFR de physique De Sorbonne Université. Un de ses enseignant.e.s-chercheur.euse.s assure la coordination de cette formation en lien avec l'Institut de Formation Doctorale de Sorbonne Université.

Un enseignant-chercheur du laboratoire participe également chaque année à l'enseignement doctoral transdisciplinaire « Forme et fonction du vivant : morphogenèse, épigénétique et évolution » à l'interface de la physique et de la biologie organisée par l'école pratique des hautes études.

Instances nationales

- Membres du CNU section 29 :
 - Depuis 2019 : Julien Bolmont (Suppléant)
 - Depuis 2019 : José Ocariz (Suppléant)
 - Jusqu'en 2019 : Delphine Hardin (Suppléante)
 - Jusqu'en 2019 : Irena Nikolic (Suppléante)

Sorbonne Université

Conseils, groupes, commissions

- Membre de la Commission de la Formation et de la Vie Universitaire et du Conseil Académique :
 - De 2016 à 2018 : Bertrand Laforge
- Membre du conseil scientifique d'UFR :
 - De 2017 à 2019 : Christophe Balland
 - De 2015 à 2019 : Daniel Vincent
- Membre du Conseil d'UFR :
 - De 2017 à 2019 : Christophe Balland
 - Depuis 2017 : Vladimir Gligorov
 - Depuis 2019 : Sophie Trincaz-Duvoid
- Membre du bureau de l'UFR :
 - De 2017 à 2019 : Christophe Balland
 - Depuis 2019 : Sophie Trincaz-Duvoid
- Membre du groupe d'experts de l'UFR de physique :
 - Delphine Hardin (membre A)
- Membre de la commission des thèses et HDR :
 - Bertrand Laforge
- Membre du conseil des enseignements :
 - Bertrand Laforge (nommé, responsable L1)
 - Depuis 2019, Christophe Balland
- Membre du conseil du Département du Cycle d'Intégration (DCI) :
 - Bertrand Laforge
- Membre de la commission des personnels enseignants :
 - De 2017 à 2019 : Christophe Balland (Président)
 - Depuis 2019 : Sophie Trincaz-Duvoid (Présidente)

Chargés de mission - structures partenaires

- Institut Lagrange Paris (ILP) :
 - Nicolas Regnault, Bertrand Laforge, Antoine Letessier Selvon
- Domaine d'Intérêt Majeur - Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie (DIM-ACAV+) :
 - Julien Bolmont

- Chargé de mission auprès de la Vice-Présidence Recherche :
 - Jusqu'en 2017 : Pascal Vincent
- International Doctorate Network in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology (IDPASC) :
 - Bertrand Laforge

Responsabilités dans l'enseignement

- Responsables de la spécialité M2 NPAC :
 - Delphine Hardin
 - Depuis 2018, Eli Ben-Haïm
 - Jusqu'en 2018, Sophie Trincaz-Duvoid
- Responsable de la spécialité M2 CIMES :
 - Pascal Vincent
- Conseil de département de master de physique et applications :
 - Delphine Hardin
 - Pascal Vincent
 - Depuis 2018, Eli Ben-Haim
 - Jusqu'en 2018, Sophie Trincaz-Duvoid
- Directeur Adjoint de l'école doctorale « Science de la Terre et Environnement et Physique de l'Univers, Paris (STEP'UP, ED 560) :
 - Depuis 2019, Christophe Balland
 - Jusqu'en 2019, Pascal Vincent
- Membre du bureau de l'école doctorale STEP'UP :
 - Depuis 2019, Christophe Balland
 - Jusqu'en 2019, Pascal Vincent
- Responsable de suivi au sein de l'école doctorale Physique en Ile de France :
 - Michael Joyce
- Membre du conseil de l'école doctorale PHENIICS :
 - Depuis 2019, Mélissa Ridel
- Co-responsabilité du tableau de service :
 - Sophie Trincaz-Duvoid
- Membre de l'Équipe de Formation Universitaire (EFU) :
 - Bertrand Laforge (directeur des études L1-L2)
- Responsable de la plateforme de travaux pratiques de physique nucléaire du master :
 - Julien Bolmont, Wilfrid Da Silva
- Responsable de la formation des doctorants chargés de mission d'enseignement de l'UFR de physique :
 - Bertrand Laforge

- Coordinateur de la physique en L1 et responsable de la plateforme de physique expérimentale en L1 :
 - Depuis 2019, *Christophe Balland*
 - Jusqu'en 2019, *Bertrand Laforge*
- Co-responsable de l'UE Mécanique Physique 1
 - Depuis 2019, *Christophe Balland*
 - Jusqu'en 2019, *Bertrand Laforge*
- Responsable de la collection d'expériences de cours de physique :
 - *Bertrand Laforge*
- Responsable de l'enseignement de physique pour la Première Année Communes des Études de Santé (PACES) :
 - *Pascal Vincent*
- Coordinateur du projet IKIGAI (play@SU) de développement d'une plateforme participative de jeux vidéo éducatifs pour le supérieur :
 - Depuis sa création, depuis 2017, *Bertrand Laforge*

Université de Paris

Conseils, groupes, commissions

- Membre du conseil scientifique d'UFR :
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*
- Membre du Conseil d'UFR :
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*

Chargé.e.s de mission - structures partenaires

- LA-CoNGA-Physics :
 - *Marco Bomben, Reina Camacho Toro, José OCariz*

Responsabilités dans l'enseignement

- Membre du conseil de l'école doctorale PHENIICS :
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*
- Membre du conseil de l'école doctorale STEP'UP :
 - Depuis 2019, *Irena Nikolic*
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*
- Membre du bureau de l'école doctorale STEP'UP :
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*
- Responsable des formations de l'école doctorale STEP'UP pour la composante « Physique de l'Univers » :
 - Depuis 2019, *Irena Nikolic*
 - Jusqu'en 2019, *Mélissa Ridel*
- Président de jury de baccalauréat, académie de Créteil, série S :
 - 2018, *Tristan Beau*



Les thèses au LPNHE

Le LPNHE s'investit particulièrement dans l'accueil des doctorant.e.s en agissant à trois niveaux : la visibilité du laboratoire pour les étudiant.e.s en recherche de thèse, l'accueil des doctorant.e.s et enfin leur suivi durant la thèse. Ces actions sont menées par un comité des thèses. Depuis 2012, une demi-douzaine de nouveaux doctorant.e.s rejoint le LPNHE à chaque rentrée universitaire.

L'attractivité du laboratoire

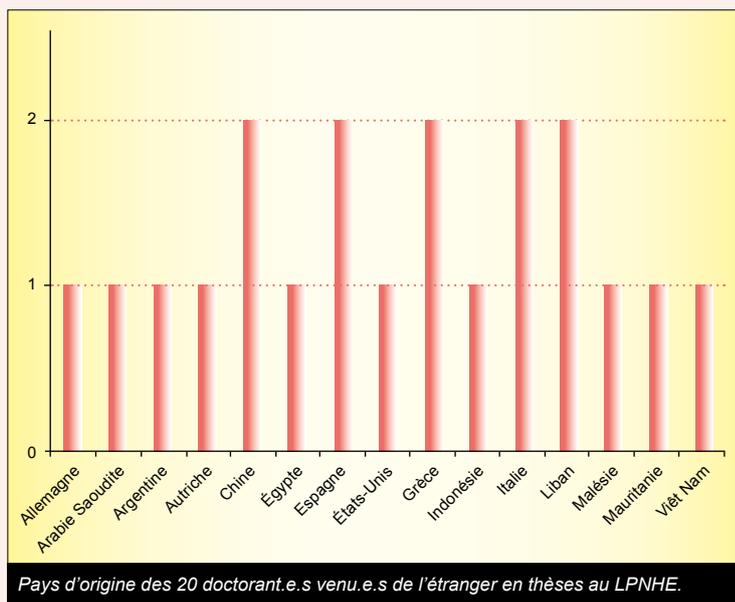
À la pointe de la recherche dans les domaines de la physique des particules, des astroparticules et de la cosmologie, le LPNHE est un environnement naturellement stimulant pour de nouveaux.elles doctorant.e.s, à la fois par l'excellence de la recherche qui y est conduite et par sa situation exceptionnelle sur le campus Pierre et Marie Curie de Sorbonne Université, au cœur du 5^{ème} arrondissement de Paris. Les enseignant.e.s-chercheur.euse.s du laboratoire contribuent largement à le faire connaître auprès des étudiant.e.s, que ce soit lors de leurs enseignements dans les cursus de Licence ou Master de Sorbonne Université et de l'Université de Paris, ou par l'organisation de visites du laboratoire et une politique de stages volontariste auprès des étudiant.e.s de L3 et M1 de Sorbonne Université et de l'Université de Paris. Ainsi, une

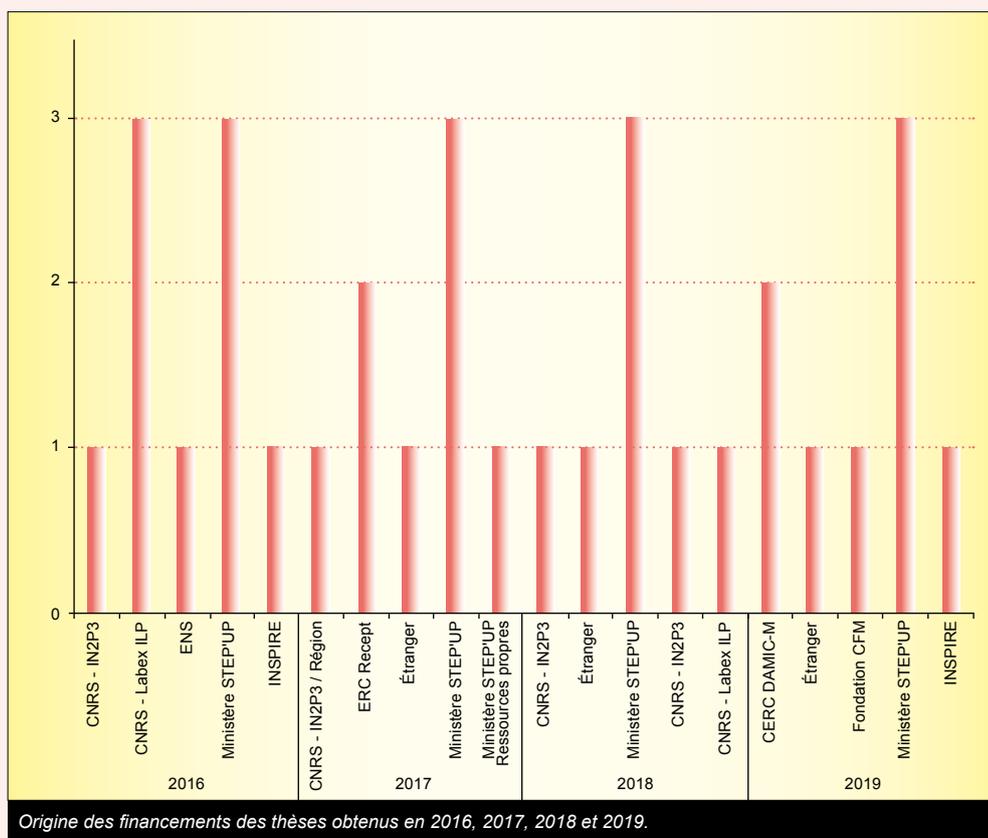
grande majorité des stagiaires de M2, futur.e.s doctorant.e.s, ont déjà fait un stage au laboratoire les années antérieures.

Le laboratoire jouit par ailleurs d'une bonne visibilité internationale, grâce à des coopérations, en particulier avec le Brésil, la Chine, la Colombie, l'Italie, la Pologne et le Venezuela. Les collaborations internationales dans lesquelles travaillent les chercheur.euse.s contribuent aussi à la visibilité du LPNHE à l'étranger. Ainsi entre 2017 et 2019, sur 33 doctorant.e.s arrivé.e.s au laboratoire, 20 viennent de pays étrangers (*graphe ci-dessous*).

Le financement des thèses

Le financement des thèses au LPNHE est assuré par l'ED 560 « STEPUP » (contrats Sorbonne Université et Université de Paris), par le Labex Institut Lagrange de Paris, ILP (jusqu'en 2019), par l'IN2P3, par la région Ile-de-France (à travers le Défi d'Intérêt Majeur Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie - DIM-ACAV -), ainsi que par des financements provenant de programmes internationaux (citons par exemple, l'*European Research Council* - ERC-, le Laboratoire Franco-Chinois de Physique des Particules - FCPPL -, les financements de l'Ambassade de France pour les étudiant.e.s Vénézuélien.ne.s, ou encore le programme de co-tutelle avec l'Italie « *International Doctorate on AstroParticle Physics* » - IDAPP -). Le graphe ci-contre montre l'origine des financements des thèses au LPNHE.





L'accueil et le suivi des étudiant.e.s

Une journée d'accueil des nouveaux.elles entrant.e.s est organisée chaque année, traditionnellement un vendredi de novembre. Au cours de cette journée, une rencontre avec le directeur et une présentation des activités et des services du LPNHE sont organisées. Les nouveaux.elles doctorant.e.s sont également invité.e.s à se présenter lors de la réunion hebdomadaire du laboratoire.

Afin d'assurer un suivi de thèse de qualité, un système de « parrainage » a été mis en place. Chaque étudiant.e de première année choisit un « parrain » ou une « marraine », membre du laboratoire mais extérieur à son domaine de thèse. Le/la parrain/marraine s'assure du bon déroulement de la thèse, des bonnes relations entre l'étudiant.e et l'encadrant.e. Il/elle l'informe des possibilités qui lui sont offertes (financement d'une école d'été, d'une conférence internationale au cours de la thèse, de sa participation aux Journées Jeunes Chercheurs de la Société Française de Physique). Une réunion des parrains/marraines

se tient deux à trois fois par an pour faire un bilan et discuter, pour chaque étudiant.e, des problèmes éventuels et des actions à mener pour y remédier.

Un espace web dédié aux doctorant.e.s sur le site du laboratoire centralise les informations importantes pour le bon déroulement de la thèse. Il recense les offres de stages M2 et de thèses et propose des liens vers des sites utiles. Cet espace constitue aussi un début de réseau des ancien.ne.s doctorant.e.s du laboratoire, permettant d'apporter par le partage d'expériences et des témoignages, une aide à l'insertion professionnelle après la thèse. Enfin, depuis 2011, un.e représentant.e des doctorant.e.s siège au conseil de laboratoire.

Comité des thèses :

Depuis septembre 2018 : Sébastien Bongard

Précédemment : Sophie Trincaz-Duvoid

(fonctionnement du système des parrains/marraines, gestion de la base de données des doctorant.e.s et webmaster)

<http://lpnhe-doctorants.in2p3.fr>

Liste des thèses soutenues au LPNHE entre juillet 2017 et décembre 2019

2017

• Daniel KERSZBERG

GROUPE : H.E.S.S.

TITRE : Etude des fonds diffus galactiques et extra-galactiques avec l'expérience H.E.S.S. et le satellite Fermi et recherche de la matière noire dans l'Univers

SOUTENANCE : 2017-10-05

2017

• Remy LE BRETON

GROUPE : LSST

TITRE : Des CCD à l'énergie noire : caractérisation des senseurs de LSST et analyse de SNLS-5ans

SOUTENANCE : 2017-09-25

2017

• Alvaro LOPEZ SOLIS

GROUPE : ATLAS

TITRE : Amélioration de la mesure de l'énergie et du temps des électrons et photons dans ATLAS et recherche de matière noire dans les canaux Higgs en deux photons ou/et Higgs en Z-photon.

SOUTENANCE : 2017-09-28

2017

• Stefano MANZONI

GROUPE : ATLAS

TITRE : Etalonnage en énergie et identification des photons, mesure de la masse du boson de Higgs et recherche de supersymétrie dans l'état final avec deux photons, avec les données du Run 2 de l'expérience ATLAS au LHC

SOUTENANCE : 2017-12-15

2017

• Matej PAVIN

GROUPE : T2K - NA61

TITRE : Neutrino flux prediction at T2K

SOUTENANCE : 2017-09-27

2018

• Simon BIENSTOCK

GROUPE : T2K - NA61

TITRE : Etude de la violation de CP leptonique avec les oscillations de neutrinos dans l'expérience T2K

SOUTENANCE : 2018-09-17

2018

• Audrey DUCOURTHIAL

GROUPE : ATLAS

TITRE : Etude des propriétés du boson de Higgs au LHC dans les désintégrations en deux quarks b et importance de l'amélioration du trajectographe de l'expérience ATLAS pour cette analyse

SOUTENANCE : 2018-10-26

2018

• Changqiao LI

GROUPE : ATLAS

TITRE : B-tagging Calibration and Observation of Higgs Boson Decays to a pair of bottom quarks with the ATLAS Detector

SOUTENANCE : 2018-11-06

2018

• Andrea MOGINI

GROUPE : LHCb

TITRE : Search for Lepton Flavour Violation and other signs of New Physics in semileptonic B decays

SOUTENANCE : 2018-09-25

2018

• Cédric PERENNES

GROUPE : H.E.S.S.

TITRE : Tests de l'invariance de Lorentz avec les sources astrophysiques : effets de propagation et effets intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxies

SOUTENANCE : 2018-09-18

2018

• Dilia PORTILLO

GROUPE : ATLAS

TITRE : Search for Dark Matter Produced in Association with a Higgs Boson Decaying to a pair of bottom quarks with the ATLAS Detector

SOUTENANCE : 2018-10-24

2019

• Emilie BERTHOLET

GROUPE : LHCb

TITRE : Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

SOUTENANCE : 2019-09-25

2019

• Louis D'ERAMO

GROUPE : ATLAS

TITRE : Étude de la désintégration du boson de Higgs dans le canal avec deux quarks b à ATLAS. Recherche d'un signal, mesure des couplages aux quarks et recherche de nouvelle physique dans la production associée avec un boson Z ou W.

SOUTENANCE : 2019-09-23

2019

• João DA ROCHA

GROUPE : DAMIC

TITRE : Recherche de Matière Noire Légère avec des CCD : DAMIC (Dark Matter In CCD)

SOUTENANCE : 2019-11-06

2019

• Victoria DE SAINTE AGATHE

GROUPE : DESI/eBOSS

TITRE : Etude des BAO des forêts Ly-alpha et Ly-beta des quasars du relevé eBOSS/SDSS IV

SOUTENANCE : 2019-09-23

2019

• Robert HANKACHE

GROUPE : ATLAS

TITRE : Jet calibration, cross section measurements and New Physics searches with the ATLAS experiment

SOUTENANCE : 2019-09-24

2019

• François HAZENBERG

GROUPE : LSST

TITRE : Préparer les futures caractérisations de l'énergie noire : métrologie des flux et application aux mesures de distance des supernovae lointaines

SOUTENANCE : 2019-09-20

2019

• Ilaria LUISE

GROUPE : ATLAS

TITRE : Search and measurement for associate production V Higgs and tt Higgs in the lepton(s)+bb+X final state in ATLAS

SOUTENANCE : 2019-09-27

2019

• Anyssa NAVRER-AGASSON

GROUPE : DARKSIDE

TITRE : Recherche de matière noire avec le détecteur à Argon liquide DarkSide au LNGS

SOUTENANCE : 2019-10-01

2019

• Ahmed TAREK ABOUELFADL MOHAMMED

GROUPE : ATLAS

TITRE : Direct and Indirect searches of new physics in the ATLAS diphoton channel

SOUTENANCE : 2019-09-30

Liste des habilitations à diriger des recherches soutenues au LPNHE entre juillet 2017 et décembre 2019

2018

• Jean-Philippe LENAIN

GROUPE : H.E.S.S./CTA

TITRE : Contributions to high energy gamma-ray astronomy

SOUTENANCE : 2018-02-19

• Marco BOMBEN

GROUPE : ATLAS

TITRE : Silicon Trackers for High Luminosity Colliders

SOUTENANCE : 2018-03-26

• Vladimir GLIGOROV

GROUPE : LHCb

TITRE : Conceptualization, implementation, and commissioning of real-time analysis in the High Level Trigger of the LHCb experiment

SOUTENANCE : 2018-05-14

• Luca SCOTTO LAVINA

GROUPE : XENON

TITRE : The challenges of the direct dark matter search with liquid xenon

SOUTENANCE : 2018-10-22

• Mélissa RIDEL

GROUPE : ATLAS

TITRE : Mesures de précision avec les données du Run 1 du détecteur ATLAS auprès du LHC

SOUTENANCE : 2018-11-08

• Sophie TRINCAZ-DUVOID

GROUPE : ATLAS

TITRE : Mesure de la masse du quark top et de la section efficace de production de paires ttbar avec les expériences D0 et ATLAS. Analyse de données prises par des prototypes de capteurs silicium pour un nouveau sous-détecteur de l'expérience ATLAS.

SOUTENANCE : 2018-11-19

Les stages au LPNHE

Le laboratoire accueille en moyenne chaque année une cinquantaine de stagiaires issus de formations diverses : étudiant.e.s en Licence (principalement en niveau L3), Master (M1 comme M2) mais aussi écoles d'ingénieur.e.s et formations professionnalisantes. On peut également citer l'accueil régulier de collégien.ne.s en classe de 3^e et de lycéen.ne.s pour une semaine de découverte du monde professionnel.

Les formations d'origine des stagiaires

Les stagiaires en recherche sont issus à part égale de masters de physique (niveau M1 et M2), et de

Licence (L3). Devant l'afflux de demandes spontanées, priorité est donnée aux étudiant.e.s originaires des universités de tutelle, de bon niveau et motivé.e.s par la perspective de continuer vers un M2 recherche. Les étudiant.e.s de Sorbonne Université sont majoritaires du fait de l'implantation du laboratoire sur son campus. Dans le cadre de la formation de Licence de physique de Sorbonne Université, les étudiant.e.s de L3 ont un stage obligatoire de 15 jours en décembre. Le LPNHE participe pleinement à ce programme de découverte du milieu de la recherche en accueillant une dizaine de ces étudiant.e.s chaque année.

Niveau Année	Collège	Lycée	IUT. Ingé	Licence	M1	M2	Formation continue
2017	8	7	3	29	9	8	2
2018	10	3	4	27	8	9	1
2019	9	5	1	18	9	8	1
Total	27	15	8	74	26	25	4

Nombre de stagiaires accueillis au LPNHE par année et niveau.

L'offre de stages

C'est souvent par le biais des enseignant.e.s-chercheur.euse.s que les étudiant.e.s ont un premier contact avec le LPNHE. Un.e responsable des stages au laboratoire assure le lien entre les étudiant.e.s en recherche de stage, les responsables de leur formation et les encadrants du laboratoire. Le laboratoire envoie des propositions aux responsables des stages de la première année du master « Physique fondamentale et applications » de Sorbonne Université (et du L3 de Sorbonne Université pour les stages de janvier). Des propositions de stage dans les services techniques sont également transmises à des écoles d'ingénieur.e.s, IUT ou Licences professionnelles

ou aux CFA. De nombreuses candidatures spontanées de plusieurs universités sont aussi reçues tout au long de l'année.

Les stages de M2 sont un cas à part puisque qu'ils constituent le plus souvent un prélude à une thèse effectuée dans le même groupe de recherche avec le/la même encadrant.e. Les propositions de stage pour les M2 sont couplées aux sujets de thèse et diffusées aux étudiant.e.s via les M2, les écoles doctorales et le site internet du laboratoire. Dans certains masters de la région parisienne (NPAC par exemple), le/la directeur.trice de l'ED et les directeur.trice.s des laboratoires présentent les sujets de thèse (et donc de stages M2) aux étudiant.e.s.

Les thématiques des stages

Le tableau ci-dessous montre la répartition des stagiaires selon les équipes. Tous les projets accueillent des stagiaires chaque année et le taux de stagiaires par membre permanent (enseignant.e.s-chercheur.euse.s ou chercheur.euse.s) est d'environ un par an. Des contacts ont été noués par la

direction technique avec différentes formations débouchant sur les métiers spécifiques des services techniques et de support du laboratoire pour accroître le nombre de stages dans les services techniques. On notera enfin que les différents services sont encouragés à recruter des apprenti.e.s en alternance. Actuellement, le LPNHE en accueille deux en mécanique.

Thématique Année	Services administratifs et techniques communs	Asymétrie Matière Antimatière	Cosmologie et Énergie Noire	Masses et Interactions Fondamentales	Rayonnement Cosmique et Matière Noire
2017	12 %	21 %	11 %	38 %	18 %
2018	13 %	23 %	19 %	18 %	27 %
2019	17 %	18 %	20 %	27 %	18 %

Pourcentage de stages par thématique et par année au LPNHE.

L'accueil au laboratoire

L'arrivée massive de stagiaires au laboratoire à certaines périodes de l'année a nécessité la mise en place d'une procédure d'accueil spécifique permettant à chacun de s'insérer au mieux. Les futur.e.s stagiaires (et de manière plus générale, tous.tes les nouveaux.elles. arrivant.e.s) sont inscrit.e.s plusieurs semaines à l'avance dans la base de données de Gestion des Personnels, ce qui déclenche l'attribution d'un bureau et la pro-

grammation d'une clef, ainsi que la préparation d'un poste informatique. Un « guide d'accueil du/ de la stagiaire » a été rédigé et est disponible sur le site internet du laboratoire. Couplé à une information régulière en réunion du vendredi, il contribue à sensibiliser les encadrant.e.s à la préparation de l'accueil des stagiaires au LPNHE.

Responsable des stages :

Depuis 2019 :

Sophie Trincaz-Duvoid

Jusqu'en 2018 :

Julien Bolmont



Action pédagogique spécifique : Ikigai, mettre le jeu au service de la pédagogie dans le supérieur et au service de la médiation scientifique et culturelle

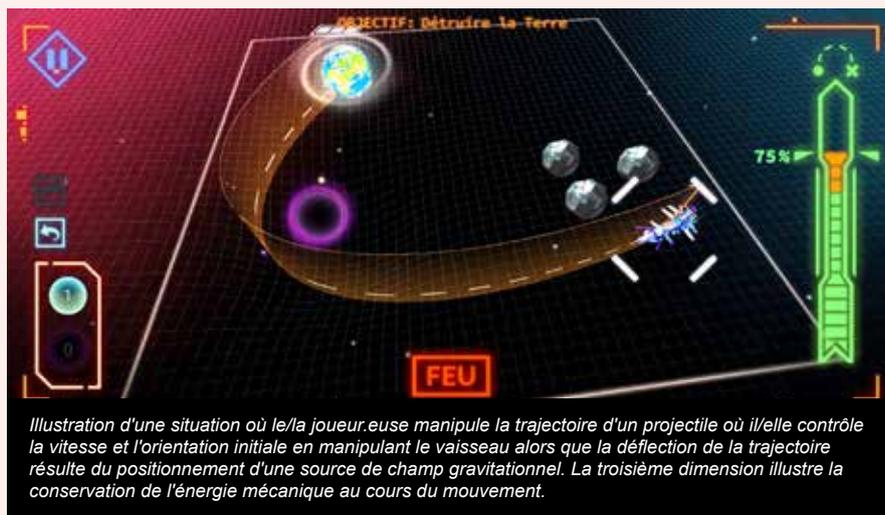
Ikigai est un portail de jeux vidéo éducatifs à destination du public étudiant. Il se destine à un usage généralisé à l'ensemble de l'enseignement supérieur français à court terme, puis à l'ensemble de l'enseignement secondaire et au grand public. Porté par Sorbonne Université, il est accessible en version beta depuis la rentrée 2019. Son objectif est de constituer le point d'entrée de référence pour du contenu ludique éducatif de qualité correspondant aux attentes des étudiant.e.s. Le projet Ikigai repose sur un consortium hétérogène (universités, grandes écoles, laboratoires de recherche, deux INSPE, studios de développement de jeu, startups EdTech) enrichi par les atouts de chaque partenaire.

Il vise notamment à mettre la simulation ludifiée au service de la manipulation concrète de systèmes étudiés par les étudiant.e.s. Cette démarche permettra une meilleure intégration des concepts théoriques complexes étudiés qui deviennent plus concrets une fois mis en situation. Un premier jeu visant à étudier le changement de paradigme consistant à aborder un problème de mécanique par les forces ou par les énergies a

été réalisé et est l'objet d'une expérimentation au sein de Sorbonne Université en première année de licence.

Il se compose de 3 parties principales : le portail web mettant à disposition les jeux vidéo, les jeux et les services associés, et une solution de récupération et de traitement des données de jeux (Learning Analytics). Il permettra l'obtention d'importants volumes de données permettant le développement de recherches ambitieuses en pédagogie et en didactique. Les données des différents établissements partenaires seront anonymisées pour être mises à disposition de projets de recherche mis en œuvre au sein du réseau d'établissements partenaires.

Ikigai est développé par une équipe pluridisciplinaire regroupant scientifiques et pédagogues de nombreuses disciplines, professionnel.le.s du jeu vidéo, et spécialistes en *Learning Analytics* et intelligence artificielle. Ce projet est dirigé par un enseignant-chercheur de Sorbonne Université membre de l'équipe ATLAS qui a initié et porte ce projet depuis plus de deux ans.



Responsable du projet :
Bertrand Laforge



Organisation du laboratoire

- Services techniques
 - Service d'électronique et d'instrumentation
 - Service informatique
 - Service Mécanique
 - Interdisciplinarité technique :
Réalisation d'une mécanique assistée pour piano de concert - CHAMP
- Plateaux techniques
 - Caractérisation des détecteurs semi-conducteurs
 - Intégration des détecteurs : machine de micro-câblage (*wire-bonding*) et assemblage par collage
 - Métrologie mécanique
 - Câblage électronique
 - Calcul scientifique
 - . GPU & Processeurs hautes performances
 - . GRIF/CLOUD
 - Environnement des plateaux techniques
 - . Salles blanches
 - . Salles serveurs
- Supports
 - Ressources financières
 - Ressources humaines du LPNHE
 - Pôle logistique et maintenance (services généraux)
 - Communication et documentation
 - Prévention des risques professionnels Radioprotection - Rayonnements optiques artificiels
- Organigramme
- Personnels au laboratoire au 31/12/2019

ORGANISATION DU LABORATOIRE

Les activités de recherche du LPNHE sont centrées très majoritairement sur des projets scientifiques expérimentaux. Les personnels sont répartis en groupes de recherche, services techniques et administratifs.

Les services techniques - mécanique, électronique, informatique et services généraux - sont assurés par une quarantaine d'ingénieur.e.s et de technicien.ne.s. Ils/elles réalisent les instruments nécessaires aux équipes de recherche et font fonctionner la partie technique et logistique du laboratoire. Que ce soit dans la conception et la réalisation d'un instrument ou des programmes de R&D, les équipes techniques s'investissent avec les physicien.ne.s porteur.se.s des projets pour proposer des solutions innovantes, basées sur leur expertise.

Les ingénieur.e.s et les technicien.ne.s du laboratoire sont sous la responsabilité d'un.e chef.fe de service (eux/elles-mêmes sous la responsabilité du directeur technique) et participent à un ou plusieurs projets relevant de leurs compétences. La direction technique du laboratoire supervise les quatre services techniques, favorisant ainsi la coordination entre services et projets. Les projets sont régulièrement suivis au

cours de réunions semestrielles où le/la responsable scientifique et le/la responsable technique de chaque projet présentent l'avancement du projet ainsi que les besoins en personnels techniques et en matériel, demandes arbitrées à l'issue de toutes les réunions en fonction des priorités du laboratoire. Les projets associés aux activités scientifiques considérées en émergence par les responsables scientifiques sont également évalués dans ces réunions, tant qu'ils n'ont pas été présentés au conseil scientifique du laboratoire.

Également essentiels au fonctionnement du laboratoire, les services de l'administration comprennent une dizaine de personnes, réparties en trois pôles : ressources humaines, gestion financière et communication.

Une vaste majorité des personnels administratifs et techniques sont des personnels CNRS.

Les groupes de recherche comptent des chercheur.euse.s et enseignant.e.s-chercheur.euse.s permanent.e.s et non permanent.e.s ainsi que des étudiant.e.s en thèse ou en stage.

Services techniques

Service d'électronique et d'instrumentation

Le service Électronique et Instrumentation du LPNHE comprend dix-sept personnes dont sept ingénieur.e.s de recherche, trois ingénieurs d'études, quatre assistants-ingénieurs et deux technicien.ne.s. Le service est impliqué dans des projets de physique auprès des grands accélérateurs de particules, des expériences d'astroparticules ou de cosmologie au sol.

Les réalisations du service électronique sont présentées dans les parties précédentes du rapport

avec les descriptions de chacun des projets sur lesquels il est impliqué.

Un pôle CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et Câblage offre toute l'assistance nécessaire pour la réalisation de cartes d'électronique. Les électronicien.ne.s du laboratoire assurent la conception, la réalisation, le test et le suivi de systèmes destinés à fonctionner sur les sites d'expériences dans des environnements souvent très sévères (rayonnements ionisants, températures extrêmes, vibrations). Pour ces raisons, les différentes réalisations suivent des critères de qualité stricts imposés par les collabora-



tions afin d'assurer un fonctionnement correct des matériels dans la durée. Ces systèmes font appel à différentes compétences en électronique : analogique rapide, faible bruit et grande dynamique, numérique rapide ou très basse puissance. Par ailleurs, ils mettent en œuvre diverses technologies : composants discrets, circuits intégrés bipolaires ou CMOS, analogiques, numériques ou mixtes, programmables ou spécifiques. Les circuits numériques programmables (FPGA) sont couramment utilisés dans les différents développements, ils sont généralement programmés dans des langages adaptés tels que VHDL ou encore VERILOG. Le service dispose notamment d'une expertise solide en électronique numérique et est capable de mener à bien des projets de systèmes de *read-out* et d'acquisition complexes (conception de puces mixtes analogiques/numériques, systèmes embarqués). Des circuits intégrés spécifiques sont également développés pour optimiser les parties analogiques des projets (amplificateurs bas bruit par exemple) ou des parties mixtes (analogiques / numériques).

En instrumentation, le service réalise des bancs de mesure et de contrôle d'instruments selon différentes normes en vigueur. Il dispose notamment d'un banc de caractérisation de détecteurs à CCD à froid qui fait référence dans le domaine.

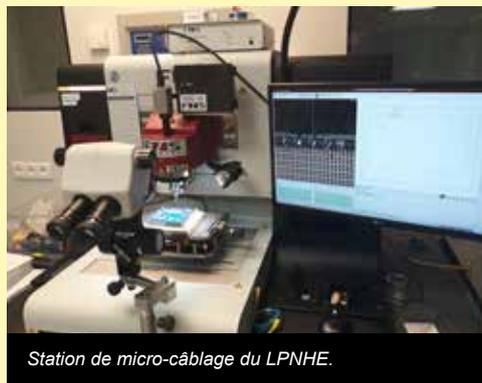
Certains ingénieurs ont des responsabilités de chef de projet dans des composantes nationales ou internationales de grandes expériences, lesquelles font de plus en plus appel aux principes de la gestion de projet et du contrôle qualité. Ces méthodologies sont désormais mises en place dès le début des projets.

CAO, Câblage et Microcâblage :

Le groupe « CAO et Câblage » offre à l'ensemble des électroniciens du laboratoire les outils et les services nécessaires à la réalisation de cartes électroniques, de circuits programmables et de circuits intégrés spécifiques submicroniques.

Au niveau logiciel, le groupe assure, en collaboration avec le service informatique, l'installation, l'administration et le support de l'ensemble des outils de CAO des sociétés Altera, Cadence, MentorGraphics, Xilinx et des kits de conception de fonderies (TSMC, AMS, XFAB). Ces logiciels de CAO permettent de concevoir tous types de systèmes électroniques numériques ou analogiques.

Leurs schémas de cartes terminés, les ingénieurs sollicitent alors le groupe « CAO et Câblage » pour effectuer le placement et le routage des cartes (ou PCB pour *Printed Circuit Board*). Les experts CAO réalisent une trentaine d'études par an, allant du PCB double face au PCB 12 couches avec microvias, de la classe 4 au hors classe 88 µm. La fabrication étant sous-traitée dans l'industrie, un dossier de suivi de fabrication, une demande de devis et la génération de fichiers nécessaires au sous-traitant sont remis aux concepteurs.

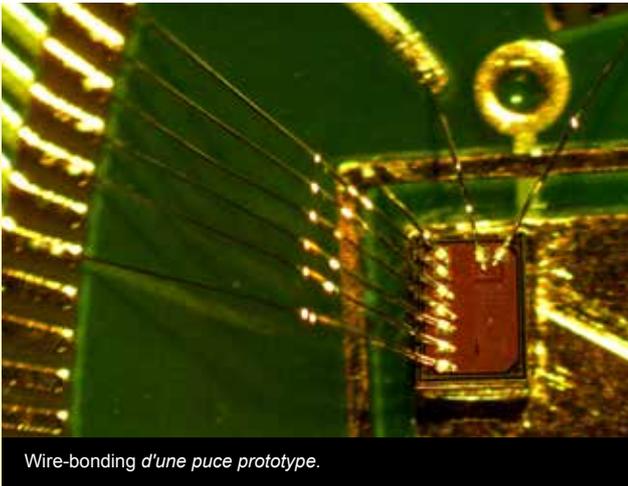


Les circuits imprimés nus (fabriqués en interne ou de retour de sous-traitance) peuvent être câblés soit manuellement soit en mode semi-automatique à l'aide d'une machine de dépôt de pâte à braser, d'une machine de placement et d'un four à refusion. Le service

CHIFFRES CLEFS

2 exemples :

- Le trajectographe à fibre scintillante de LHCb aura environ **500 000** canaux individuels de SiPM en *Front End* ; les **144** cartes *Back End* (TELL40) reçoivent en entrée **20 Tb/s** de données brutes et fournissent en sortie **4 Tb/s**
- **1µV**, c'est l'objectif de bruit rapporté à l'entrée du chip de lecture CROC de DAMIC



Wire-bonding d'une puce prototype.

dispose d'une machine de soudage et dessoudage de composants complexes, d'un appareil de nettoyage de PCB par plasma, ainsi que d'un endoscope professionnel permettant d'inspecter, souder et des-souder tout type de composants (BGA, QFN...). Un outil d'usinage (*Charly Robot*) permet également de réaliser de la petite mécanique telle que faces avant de prototypes, boîtiers et maquettes.

Le laboratoire dispose également d'une machine à pointes, installée en salle blanche, permettant notamment la caractérisation de détecteurs au silicium.

En novembre 2018, le laboratoire a fait l'acquisition d'une station de micro-câblage : machine de *wire-bonding*, machine de tests de traction de fils (*photo ci-contre*). Durant l'année 2019, un pôle de quatre membres du service a pris en main ce système grâce à des formations et la mise en pratique de cas concrets : câblages sur différents substrats, mesure de la tenue et de l'occupation spatiale des fils bondés, réparation de *wire-bonding* (*photo ci-dessus*). La plateforme sera utilisée pour une partie de la production d'assemblage de détecteurs à pixels sur substrats pour la jouvence de l'expérience ATLAS et pour le câblage de prototypes pour les autres projets expérimentaux du laboratoire.

Activités de micro-électronique

Le service possède une expertise en micro-électronique et conçoit des circuits qui s'intègrent dans les développements de cartes d'électronique dédiées à l'instrumentation de détecteurs.

De 2017 à 2019, l'activité micro-électronique s'est concentrée sur la réalisation et la soumission d'ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) en technologie CMOS 0,35 μm pour le projet DAMIC-M et en technologie 65 nm pour le projet de jouvence d'ATLAS. Il s'agit des circuits :

- CROC : circuit de lecture de CCD pour l'expérience de recherche de matière noire DAMIC-M. Il répond à un cahier des charges extrêmement sévère et devra fonctionner au froid très proche du détecteur (à 120 degrés Kelvin).

- AMchip : mémoire associative pour le déclenchement rapide à partir des données du trajectographe pour la jouvence du détecteur ATLAS (projets *Fast Tracker*, FTK et *Hardware Track Trigger*, HTT). Différentes évolutions de cette puce ont été soumises.

Équipe :

Philippe Bailly, Julien Coridian, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Jacques David, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, Romain Gaior, Maroua Garci, Claire Juramy-Gilles, Sonia Karkar, Olivier Le Dortz, Hervé Lebbolo, David Martin, Jean-Luc Meunier, Jean-Marc Parraud, Eric Pierre, Stefano Russo, Francois Toussanel, Alain Vallereau

Doctorante :

Latife Khalil

EXPERTISE

Le service d'électronique dispose des expertises nécessaires à la prise en charge de toutes les étapes de réalisation de systèmes électroniques complexes (du prototypage au suivi de la production) dans un environnement de grands projets internationaux. En particulier, il intervient dans le développement de systèmes électroniques numériques et analogiques (électronique frontale, acquisition de données, bancs de tests automatisés).

Service informatique

Le service informatique est composé de dix personnes : cinq ingénieur.e.s de recherche, quatre ingénieur.e.s d'étude et un technicien.

Le service veille à différentes tâches au sein de trois groupes :

1. Administration Systèmes et Réseaux, qui assure le bon fonctionnement et la sécurité de l'ensemble des systèmes d'information du laboratoire. Il gère entre autres : le réseau, le *wifi*, les serveurs physiques et virtuels, les postes de travail ainsi que différents services web. De plus, il administre un système de stockage de données pour les expériences, les données utilisateurs et les nombreux services virtualisés et conteneurisés. Une activité d'assistance quotidienne est proposée aux utilisateur.trice.s via un système de gestion de tickets ;
2. Grille de calcul et *Cloud* décrit ci-dessous ;
3. Les développements spécifiques pour les expériences scientifiques sont explicités dans les différents chapitres relatifs aux équipes de recherche : ATLAS, CTA/H.E.S.S., DAMIC, DarkSide, DESI, GRAND, LHCb, LSST et T2K.

L'infrastructure serveurs et réseau du service

Le service informatique administre 35 serveurs physiques dont 6 sont dédiés à la virtualisation de 40 serveurs. L'ensemble du parc est géré avec l'outil d'administration et de déploiement centralisé Ansible qui permet un déploiement multi-nœuds et l'exécution de tâches ponctuelles.

Les serveurs virtuels sont gérés avec Proxmox et connectés au réseau 10 Gbps : en cas de défaillance matérielle, les serveurs impactés seront transférés sur des machines physiques tout en minimisant l'indisponibilité des services.

Par ailleurs, le service gère également plus de 200 postes de travail et 150 ordinateurs portables. Des procédures d'installation automatique permettent de gérer ces postes sous Linux, Windows et Mac.



Avant d'une baie de brassage, avec les branchements en salle des serveurs du LPNHE.

Le support aux utilisateurs est quant à lui réalisé avec l'outil de gestion GLPI (Gestionnaire Libre de Parc Informatique).

La sécurisation des données des utilisateur.trice.s est assurée par deux serveurs de fichiers NetApp réalisant des « instantanés » des données utilisateur.trice (*snapshots*) organisés comme suit : 2 *snap*s par jour conservés pendant 2 jours, 1 par nuit conservé pendant 15 jours, 1 par semaine conservé pendant 10 semaines et un par mois conservé pendant 10 mois. L'intégralité est également sauvegardée au Centre de Calcul de Lyon quotidiennement.

CHIFFRES CLEFS

- 40** serveurs physiques,
- 6** serveurs de virtualisation (256 cpu et 812 GB de mémoire)
- 200** postes de travail
- 150** ordinateurs portables
- 800 To** brut de données disponibles,
- 300 To** utilisés
- 24** bornes wifi
- 72** switches - **2400** ports - **22** VLAN
- 8** Multiple Function Printer Xerox Altalink

Le stockage des données était assuré par un cluster GPFS (*General Parallel File System*) qui a progressivement été remplacé courant 2019 par CEPH, une architecture de stockage distribué plus performante. Ce remplacement a été suivi d'une montée en puissance de la volumétrie : 7 serveurs de stockage qui représentent un total de 800 To (100 disques de 8 To). De plus, 3 serveurs assurent l'administration, le contrôle et la gestion du stockage et 2 serveurs gèrent le système de fichiers. Le tout est interconnecté en 10 Gbps fibre.

Afin d'assurer une haute disponibilité du réseau et de réduire progressivement les goulots d'étranglement, le laboratoire a fait des investissements conséquents qui ont permis de poursuivre la mise à jour des infrastructures. Le cœur du réseau est actuellement basé sur des liens à 2x40 Gbps pour les liens principaux et 2x10 Gbps pour les liens secondaires. Différents sous-réseaux permettent de sécuriser les activités les plus sensibles et d'assurer la qualité de service.

Équipe :

Thomas Audo, Aurélien Bailly-Reyre, Olivier Dadoun, Louis Gromb, Youssef Haddad, Trung Ho, Francis Kaeseberg, François Legrand, Victor Mendoza, Eduardo Sepulveda, Diego Terront, Vincent Voisin, Patricia Warin-Charpentier

EXPERTISE

Le service informatique garantit le bon fonctionnement des infrastructures logicielles et matérielles du laboratoire pour offrir des services fiables, des outils performants aux quatre autres services techniques et administratifs et aux douze groupes de recherche du LPNHE. Il est impliqué dans le projet GRIF (Grille de Calcul Ile de France) et développe son expertise en calcul haute performance en mettant à disposition des équipes de recherche des serveurs avec des cartes GPU ou des processeurs haute performance.

Service Mécanique

Le service mécanique étudie, réalise, met au point et intègre des sous-ensembles de détecteurs en physique des particules, implantés auprès des grands accélérateurs, ou pour des expériences en astroparticules et en cosmologie. Ces développements et réalisations sont menés dans le cadre de collaborations internationales.

En 2019, le service comprend trois ingénieurs de recherche, deux ingénieurs d'études, trois assistants ingénieurs et deux apprentis.

Le service assure la maîtrise globale du processus de développement des projets d'instruments, de la

rédaction du cahier des charges jusqu'à la livraison au laboratoire ou l'installation sur site. Pour cela, ses ingénieurs assurent régulièrement des responsabilités de chef de projet ou d'ingénieur système. Grâce à l'expertise de ses membres, les compétences du service couvrent non seulement la mécanique (conception, dimensionnement et fabrication) mais aussi les domaines connexes tels que la mécatronique, le vide, la thermique, la cryogénie et l'optique. Les réalisations du service ont été détaillées dans les paragraphes décrivant chaque expérience.

Le bureau d'études est équipé de logiciels de CAO (CATIA) et de calcul aux éléments finis performants (ANSYS) et utilise les systèmes de gestion de données techniques (*Smarteam et Atrium*).





Imprimante 3D du LPNHE.

L'atelier est équipé de machines-outils classiques et à commandes numériques que les prototypistes programment à l'aide d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (Afacam). Le service dispose d'une salle de métrologie équipée entre autres d'une colonne de mesure et d'une machine de mesure tridimensionnelle, pour le contrôle des pièces. L'acquisition d'une imprimante 3D (*photo ci dessus*) utilisant la technique du fil fondu en ABS permet au service non seulement de fabriquer des maquettes pour une meilleure évaluation de l'intégration des pièces mais également de réaliser des pièces fonctionnelles de formes complexes. Le service possède également de nombreux matériels pour réaliser des tests ou démontrer la faisabilité d'un concept : capteurs de forces, pompes à vide, détecteurs de fuite, étuves et sondes de température. Le service gère les sous-traitances pour des fabrications de série ou nécessitant des techniques spéciales, en rédigeant le dossier technique nécessaire à l'appel

CHIFFRES CLEFS

-20° C de température minimale pour le caisson froid de 16 m²

3000 éléments de nomenclature pour le carrousel LSST

2000 heures de fonctionnement pour l'imprimante 3D

200 00 points de colle déposés par le robot de collage

d'offre et en assurant le suivi jusqu'à la recette. Une démarche qualité a été mise en place depuis plusieurs années.

Un ingénieur du service, en collaboration avec un physicien de l'équipe ATLAS, a mis au point un outil lié à la CAO qui évalue de manière très précise la quantité de matière présente dans un détecteur il y a plusieurs années. Cette expertise est maintenant bien reconnue au sein de la communauté des physiciens des particules.

Par ailleurs, les membres du service sont impliqués dans des formations ou dans des jurys de concours du CNRS, dans des groupes de travail (Atrium, Smarteam, qualité, gestion de projet, ingénierie système, calculs, FAO, I3D) et plus largement dans des actions de présentation du service au grand public.

Un ingénieur du service est membre du comité de pilotage du réseau national des mécaniciens du CNRS.

Équipe :

Kevin Biernacki, Bernard Canton, William Ceria, Guillaume Daubard, Patrick Ghislain, Didier Laporte, Yann Orain, Julien Philippe, Philippe Repain, Ibrahima Sylla, Daniel Vincent

EXPERTISE

Le service mécanique est reconnu pour son expertise en gestion de projet, ingénierie système et assurance produit ainsi qu'en études de faisabilité. Il intervient sur la conception de mécanismes, de structures légères, de cryostats, de bancs de test et d'outillages d'assemblage, comme sur l'intégration d'instrument ou le choix et l'intégration d'actionneurs et de capteurs (mécatronique). Il est également expert en calculs de structures et en thermique, par éléments finis (linéaire et non-linéaire), en motorisation et en engrenages ou en modélisation de mécanismes.

La fabrication de prototypes grâce à l'impression 3D et la maîtrise de la FAO complètent les compétences du service sans oublier l'installation et la maintenance sur site.

Interdisciplinarité technique : Réalisation d'une mécanique assistée pour piano de concert - CHAMP



Banc de test de CHAMP.

Le projet CHAMP concerne la réalisation d'un système de motorisation asservie de la mécanique d'un piano à queue afin d'offrir de nouvelles voies d'expression musicale aux interprètes. Il engage des compétences en électronique numérique, en mécanique et impression 3D, en physique/acoustique.

Ce projet interdisciplinaire comporte trois phases : un banc de test de quelques notes pour évaluer le système d'asservissement (*photo ci-dessus*), un assemblage sur l'instrument d'une ou deux

octaves et la réalisation du clavier complet avec présentation lors d'un concert public. Les phases une et deux (en partie) ont été financées en 2017 par la mission interdisciplinaire du CNRS.

Nous avons réalisé un châssis comprenant 3 notes pour tester les qualités de l'asservissement et nous avons acheté et remis à neuf, avec Laurent Bessières, préparateur des pianos de la Philharmonie de Paris, un piano de concert Schiedmeyer de 2m70 datant de 1916. Un stagiaire de fin d'études en électronique a assemblé un système de contrôle basé sur un FPGA, un accéléromètre et des moteurs linéaires de précision. Côté mécanique, le bâti du piano a été modifié pour accueillir les moteurs et des bassines ont été conçues en impression 3D pour recevoir les nouveaux marteaux et l'assemblage moteur.

L'interface avec le moteur de précision fournie par le constructeur complique fortement la boucle d'asservissement et cela a entraîné un délais supplémentaire à la réalisation du projet.

Chercheur :

Antoine Letessier Selvon

Équipe technique :

Hervé Lebbolo, Philippe Repain, Pierre Romet

CHIFFRES CLEFS

Projet sur **2 ans** financé pour
25 k€ par la mission interdisciplinaire
du CNRS

Le LPNHE est soucieux de maintenir un environnement technique de qualité. Les équipes scientifiques en sont les premières bénéficiaires notamment pour leur positionnement sur des contributions de recherche et sur des développements techniques à la frontière de nos connaissances.

Le LPNHE entretient ainsi des compétences en instrumentation et développe la technicité de ses équipes.

Caractérisation des détecteurs semi-conducteurs

Plusieurs projets du laboratoire portent des contributions autour des détecteurs semi-conducteurs à la fois pour les étapes de conception technologique (maîtrise des outils TCAD : ATLAS/ITk) et de qualification (ATLAS/ITk, LSST, DAMIC).

Les bancs de caractérisation sont importants pour la validation des détecteurs prototypes et/ou pour comprendre leur fonctionnement intime jusque dans les détails des interfaces et des cycles de lecture (cas des CCD de LSST par exemple).

Ce plateau technique est situé en salle blanche (*voir page suivante*) et se compose :

- d'une machine de test sous pointes semi-automatique Cascade PA200 associée à des instruments de mesure performants : source-mètre et analyseur de réseau Keysight B1505
- d'un banc d'illumination et d'interfaçage avec les services (alimentation, système de lecture) en environnement cryogénique. Le banc permet d'acquérir des images sur la gamme de longueur d'onde 350 - 1050 nm, avec une précision sur la mesure relative de l'illumination à 10^{-4} , et dans des conditions stables à 10^{-3} sur 12 h.

Intégration des détecteurs : machine de micro-câblage (*wire-bonding*) et assemblage par collage

Certaines installations pour l'intégration des détecteurs se trouvent en salle blanche, notamment une machine à bonder semi-automatique Bondtec 5832 en configuration adaptée au « *wedge bonding* » en fil d'or ou d'aluminium. Les équipes du LPNHE sont très engagées dans le développement des compétences associées dans le cadre du *cluster* de l'Île-de-France de production des modules ITk et possiblement pour HGTD.

Cette machine est complétée par une torche plasma pour le nettoyage des matériaux détecteurs ou supports.

Le laboratoire maîtrise l'étude et la mise au point de robots de placement et d'assemblage spécifiques pour l'hybridation détecteurs-supports-circuits imprimés. Le robot développé dans le cadre du projet CALICE permet des positionnements à 10 μm près dans les 3 directions sur des volumes d'environ (30cm)³ pour réaliser des assemblages par dépôt de colle technique.

Métrologie mécanique

Plusieurs machines de métrologie mécanique sont associées à ce plateau technique afin de réaliser les contrôles qualité en amont, en cours ou en sortie des procédés. Deux technologies de mesure tridimensionnelle sont disponibles : optique (plateau de 30cm X 30cm) ou à palpeur de contact jusqu'à un volume de 1m³. Cette dernière est complétée par une colonne de mesure.

Câblage électronique

Le pôle CAO-câblage du laboratoire opère la machine à bonder et offre en complément une activité de câblage de cartes électroniques (reprise des composants CMS et BGA), de câbles et d'interfaces.

Calcul scientifique

GPU & Processeurs hautes performances

Le calcul haute performance ou HPC et son écosystème sont au cœur de la plupart des projets du LPNHE. Maîtriser tous les aspects du HPC requiert un travail interdisciplinaire, reposant sur la connaissance d'un domaine applicatif et d'un savoir-faire en modélisation, simulation numérique et gestion massive des données. Le laboratoire s'équipe régulièrement de nouveaux composants hautes performances, permettant ainsi de tester de nouveaux algorithmes et de porter des simulations et logiciels déjà existants. La salle serveur est actuellement équipée de serveurs avec des cartes GPU Nvidia K2200 et Nvidia Tesla V100 ainsi que de serveurs avec des cartes XeonPhi et avec un processeur AMD EPYC.

De plus le LPNHE collabore étroitement depuis 2017 avec l'Institut des Sciences du Calcul et des Données (ISCD) qui gère les clusters de calcul parallèle de Sorbonne Université.

GRIF/CLOUD

GRIF (« Grille au service de la Recherche en Île-de-France ») est un projet commun aux laboratoires de physique des hautes énergies d'Île-de-France pour mettre en place une ressource unique de calcul et de stockage basée sur les technologies des grilles de calcul et du *cloud*. GRIF est un centre de calcul



Salle de serveurs informatiques : baie de serveurs (racks) standard 19 pouces et baies avec switch et routeur pour la grille de calcul.

de type Tier-2 pour le LHC dans le cadre de la collaboration « *World LHC Computing Grid* » (WLCG) ainsi que pour d'autres collaborations dans le cadre de la grille « *European Grid Initiative* » (EGI). Il est physiquement réparti sur plusieurs sites et géré par une équipe d'une dizaine de personnes appartenant aux différents laboratoires participants.

Les ressources à disposition au LPNHE correspondent à 162 nœuds de calcul permettant de traiter plus de 4000 tâches simultanément. Près de 85% de ces ressources sont disponibles dans le cadre de la grille de calcul, le reste dans un site de *cloud* mis en production en 2019. L'espace de stockage, accessible aussi bien par la grille que le *cloud* est de 2,5 pétaoctets sur des disques accessibles à travers

un système basé sur DPM (*Disk Pool Manager*). Le réseau consiste en des liens à 10 Gbit/s entre les membres de GRIF, vers le CCIN2P3 et les autres centres, à travers RENATER. Par ailleurs, l'équipe gère deux autres serveurs contenant respectivement deux cartes GPU et deux cartes XeonPhi.

Deux ingénieurs du service informatique (soit 1,3 ETP) assurent l'administration et l'exploitation du site du LPNHE. Ils ont contribué au déploiement de l'interlogiciel, au développement de l'outil Quattor dans l'ensemble du projet GRIF, qui permet de définir et maintenir une configuration générique des services de la grille et au développement d'outils de suivi des sites. L'opération des ressources des sites français est coordonnée par la direction de LCG-France et de France-Grilles. Des réunions entre les différents sites ont lieu deux fois par an et des réunions de coordination par vidéo-conférence tous les mois.

GRIF au LPNHE est un Tier-2 pour les expériences ATLAS, LHCb et CTA mais aussi pour des collaborations en dehors de notre discipline comme l'Institut des Systèmes Complexes (ISCP-IF). Sur la période 2017-2019, les ressources de calcul ont été utilisées par les expériences auprès du LHC, par les autres groupes de physique des hautes énergies et par des collaborations d'autres disciplines. Durant cette période GRIF a contribué à 1,9 milliards d'heures de temps de calcul effectif, dont 360 millions avec le site du LPNHE. Les ressources de stockage au LPNHE sont dédiées à 85% aux expériences auprès du LHC (ATLAS, LHCb), le reste aux collaborations H.E.S.S./CTA. Le taux de disponibilité de GRIF sur la période est supérieur à 97%.

Le projet continuera dans les années à venir et se prépare en particulier pour la phase de haute luminosité du LHC.

Chercheur :

Frédéric Derue

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reire, Victor Mendoza

CHIFFRES CLEFS

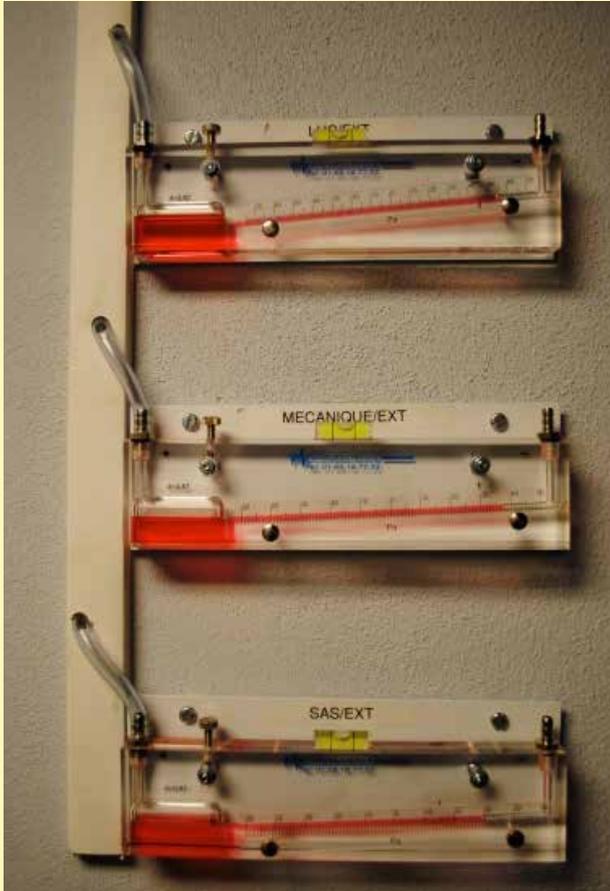
360 millions d'heures de calcul pour GRIF

Environnement des plateaux techniques

Salles blanches

Les 4 salles propres du LPNHE sont en fonctionnement depuis 2010 et sont dédiés aux détecteurs de silicium. Les classes de propreté vont de l'ISO8 à l'ISO6. Elles occupent une surface totale de 95 m² et la centrale de Traitement d'Air est située dans un local attenant.

Un dispositif de déshydratation de l'air permet de maintenir un niveau d'humidité relative autour de 50% quelles que soient les conditions climatiques extérieures. Une surveillance automatisée de la température et de l'hygrométrie de chaque salle a été mise en place. Les salles bénéficient depuis le local technique d'un appro-



Afin de garder les salles blanches propres, il est nécessaire de mesurer la pression atmosphérique, à la fois dans la salle, dans le SAS et à l'extérieur.

visionnement centralisé en air comprimé filtré, en azote gazeux et, quand cela s'avère nécessaire, en azote liquide. Par ailleurs, une pompe à vide commandée de l'intérieur des salles est située dans la coursive pour alimenter tous les dispositifs nécessitant un vide primaire.

Ces salles sont complétées par une deuxième installation d'environ 100 m² ISO8 pour les objets volumineux avec pont roulant 2t. D'autres pièces sont aussi équipées de plafonds filtrants ISO7 pour des surfaces comprises entre 10 et 30 m².

Salles serveurs

Le LPNHE dispose de trois salles informatiques. Les deux salles principales de 65m² chacune, en sous-sol, hébergent l'essentiel de l'infrastructure et des matériels du laboratoire. La troisième salle, en étage, a été aménagée afin d'héberger une infrastructure redondante susceptible de faire redémarrer les services vitaux pour le laboratoire et ainsi assurer une continuité de service en cas de défaillance ou d'indisponibilité des salles principales.

Les salles du sous-sol bénéficient d'une puissance électrique de 2x100 kVA et non ondulée de 2 x 42 kVA, d'une protection incendie et d'une climatisation. En cas de panne électrique, un onduleur peut apporter la puissance nécessaire pour maintenir les services informatiques vitaux. On notera que le laboratoire héberge également dans ces salles des serveurs pour les laboratoires APC (AstroParticule et Cosmologie), LPTHE (Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies) et LCQB (*Laboratory of Computational and Quantitative Biology*).



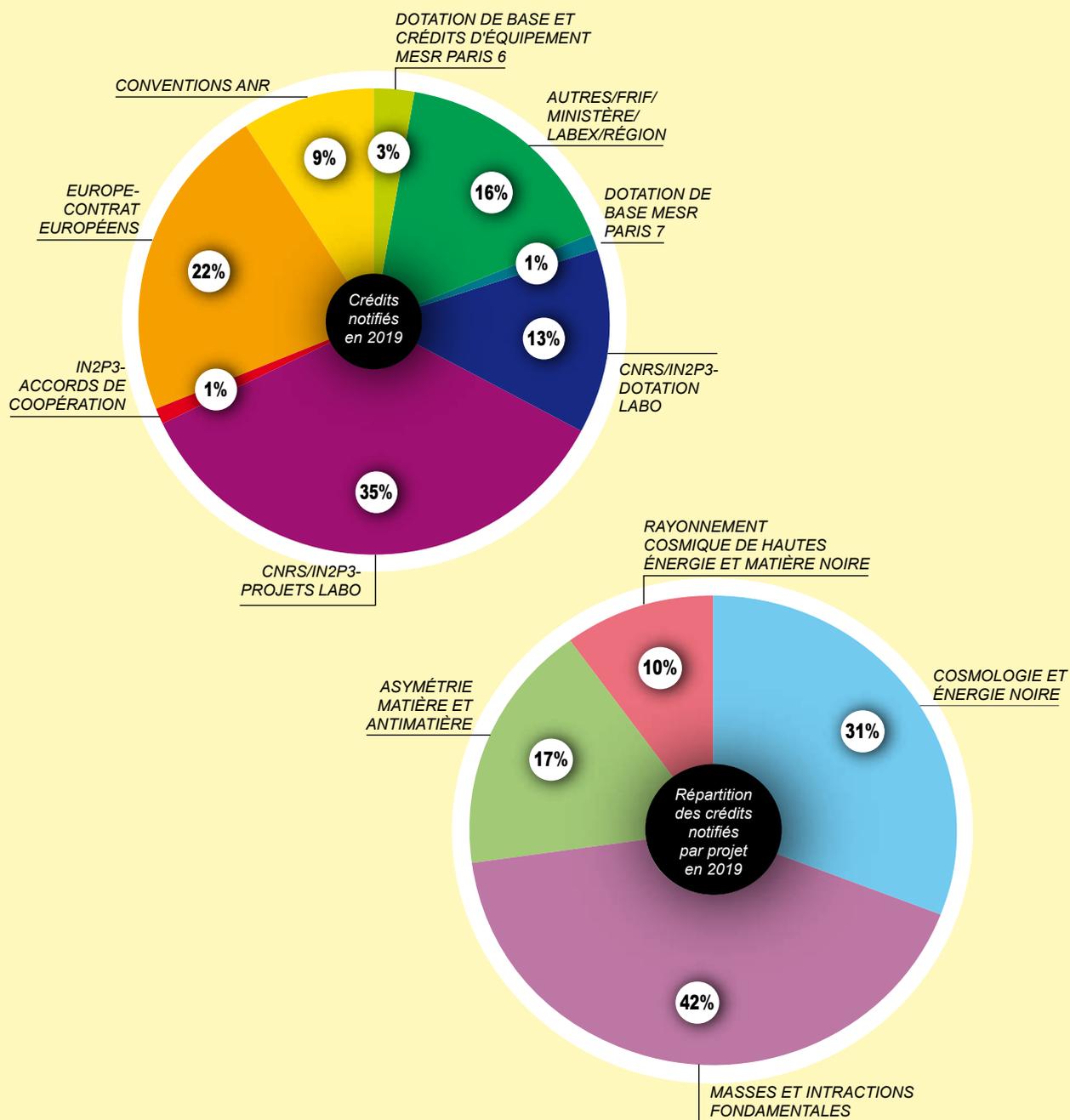
Baie de serveurs d'une salle serveur du LPNHE.

Ressources financières

Le LPNHE dispose de ressources financières qui lui sont attribuées par ses trois tutelles, CNRS/IN2P3, les universités Sorbonne Université (SU) et l'Université de Paris (UP), ainsi que de ressources propres. Ces ressources sont gérées par le pôle de gestion financière, composé de

quatre gestionnaires. Le pôle gère l'ensemble des achats de l'unité pour les groupes et les services du laboratoire en conformité avec les règles de la comptabilité publique.

A titre d'exemple, la répartition de ces ressources est représentée sur la figure ci-dessous pour l'année 2019.



Même si la notification des contrats est pluriannuelle, elle a été rapportée aux dépenses prévisionnelles de l'année pour permettre les comparaisons avec les notifications annuelles.

En 2019, la dotation annuelle (FEI : Fonctionnement, Équipement, Investissement) CNRS a représenté 13% du budget et celle de ses tutelles universitaires (Sorbonne Université et Université de Paris) 4%. Ces budgets sont alloués au fonctionnement du laboratoire pour les dépenses d'infrastructure, de vacations et pour financer des colloques, écoles et conférences.

Le reste du budget, destiné aux projets du laboratoire, provenait en 2019 du CNRS/IN2P3 (36%), de contrats ANR, Européens, Région et Labex (47%).

Affectations des ressources dans les projets

Thématiquement, le budget « Projets » s'est réparti en 2019 selon :

- Masses et interactions fondamentales (42%)
- Asymétrie Matière et antimatière (17%)
- Rayonnement cosmique de haute énergie et matière noire (10%)
- Cosmologie et énergie noire (31%)

Gestion des ressources financières

La gestion financière du LPNHE est assurée avec l'aide de l'application GESLAB qui est la base gestion des unités de recherche du CNRS. Le Système d'Information, Financier Analytique et Comptable (SIFAC) des deux universités, n'est plus utilisé depuis la mise en place, en 2010, de la Délégation Globale de Gestion financière par le CNRS.

Évolutions

Le budget projet IN2P3/CNRS a été relativement stable entre 2018 et 2019 par rapport aux années précédentes, alors que depuis l'année 2017 un accroissement considérable des ressources propres est à noter avec pour conséquence une augmentation sensible de la charge de travail des gestionnaires. Ces nouvelles ressources proviennent des financements Labex et des contrats ANR, Région, Européens, avec notamment la gestion de deux ERC, un ERC *Consolidator Grant* depuis l'automne 2017 et un ERC *Advanced Grant* en 2018 avec, entre autres, l'achat d'équipements pour notamment réaliser la construction d'une salle blanche.

Les gestionnaires ont dû continuer à s'adapter à la mise en place de la dématérialisation de la dépense.

La prise en compte de la vague 2 de Chorus pro, l'évolution du traitement du service fait et la nouvelle version de l'outil de gestion des appels d'offre, PUMA, ont entraîné pour les gestionnaires de grandes évolutions dans les méthodes de travail et dans l'acquisition de nouvelles compétences techniques et professionnelles.

La dématérialisation achevée du processus « Missions » est à venir.

Équipe pôle gestion :

Hager Baalouchi, Bernard Caraco,
Carla Carvalhais, Véronique Criart,
Paule Duriez, Evelyne Mephane

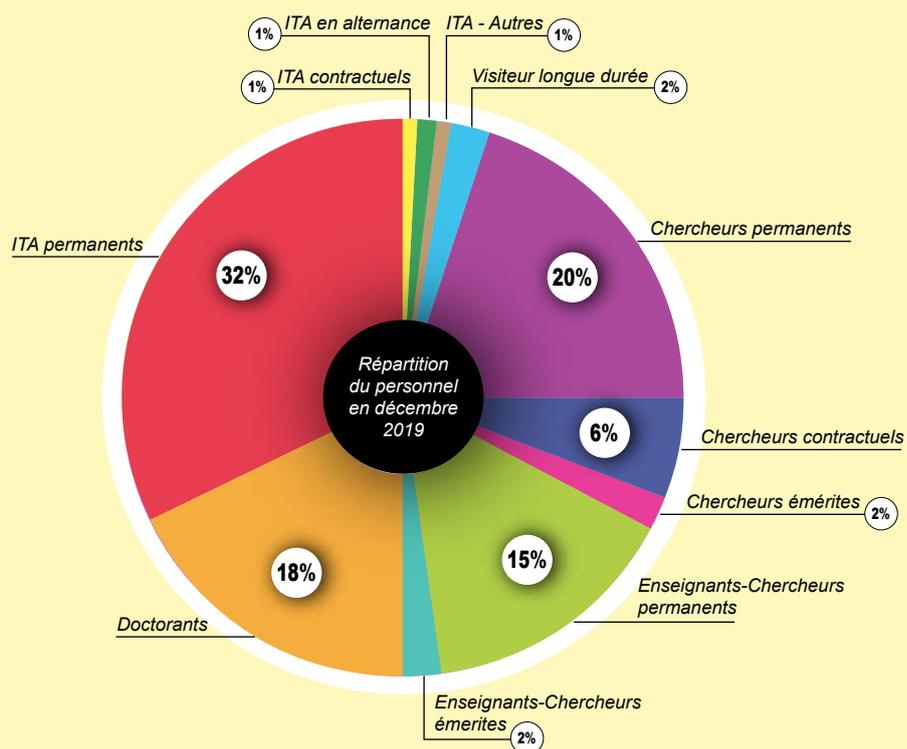


Ressources humaines du LPNHE

Le pôle Ressources Humaines assure la gestion administrative des personnels. Cette gestion consiste à réaliser le suivi de 195 agent.e.s permanent.e.s et non permanent.e.s, auxquels il faut ajouter une cinquantaine de stagiaires par an qui séjournent au laboratoire pour des périodes allant d'une semaine à 6 mois. Le pôle est en charge des procédures de recrutement (concours, mobilité interne, auxilia-riat), des procédures d'accueil des visiteur.euse.s étranger.ère.s, de stagiaires ou de doctorant.e.s (constitution des dossiers, aide dans les démarches auprès de nos tutelles, etc.). Il aide au mieux l'en-

semble des personnels dans l'établissement des dossiers de carrière, de concours et de formation. Il gère les congés et les absences et diffuse toutes les informations utiles concernant les agent.e.s de l'unité.

En décembre 2019, le laboratoire comptait exactement 49 chercheur.euse.s et enseignant.e.s-chercheur.euse.s permanent.e.s, 9 chercheur.euse.s contractuel.le.s, 11 émérités et bénévoles, 23 doctorant.e.s et post-doctorant.e.s, 46 ingénieur.e.s technicien.ne.s et administratif.ves (ITA) permanent.e.s et non permanent.e.s, 2 IT en alternance, et 55 stagiaires, soit un total de 195 personnes (*graphique ci-dessous*).



Ces dernières années, le nombre du personnel permanent est relativement stable.

Le graphique ci-dessous montre la pyramide des âges du personnel permanent. On peut anticiper un certain nombre de départs à la retraite de personnel ITA dans les prochaines années.

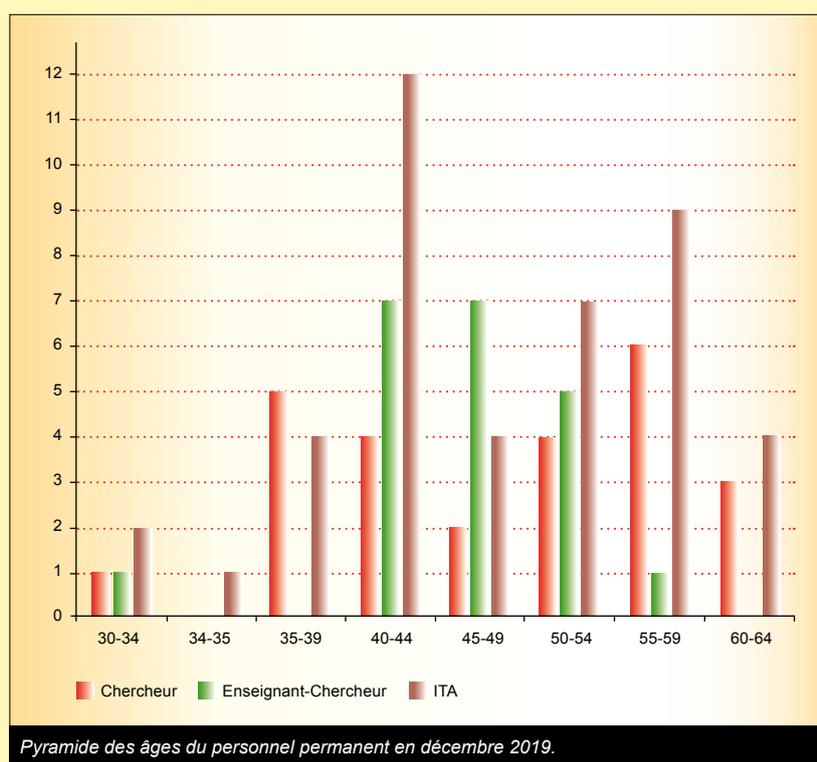
En 2018, l'avènement des sites ARIANE et Portail emploi a notablement modifié l'appréhension de la gestion des RH en laboratoire et les méthodologies de travail afférentes.

L'outil ARIANE s'inscrit dans un processus de modernisation des ressources humaines au CNRS avec pour objectif la dématérialisation complète du dossier administratif de l'agent.e.

Dans un souci de transparence, le CNRS s'est engagé dans la stratégie européenne des ressources humaines pour la recherche (HRS4R) dont il a obtenu le label. A ce titre, toute offre d'emploi de personnels contractuels, d'une durée supérieure à trois mois, doit être systématiquement publiée sur la plateforme de recrutement Portail Emploi afin de permettre l'affichage des offres d'emploi, qui sont aussi publiées sur Pôle emploi pour les postes techniques et sur *EURAXESS Jobs* pour les postes scientifiques.

Équipe pôle ressources humaines :

Hager Baalouchi, Magali Carlosse,
Véronique Criart, Evelyne Mephane



Pôle logistique et maintenance (services généraux)



Les services généraux sont composés de trois personnes (un adjoint technique de la recherche, un assistant ingénieur et un ingénieur d'études qui en assure la responsabilité).

Leurs tâches se répartissent en activités courantes et en actions spécifiques d'aménagement ou de maintenance. La période 2017-2019 est marquée par le départ en retraite du responsable de service dont l'investissement au service du laboratoire était très significatif. Cela a entraîné une importante redistribution des tâches par ses collègues restants ainsi que le rattachement du service à la direction sous forme de pôle.

L'ensemble des procédures et pratiques a été revu afin de répartir les activités sur deux personnes en conservant une qualité de service similaire.

Le pôle logistique et maintenance prend en charge les tâches courantes suivantes :

- répondre aux demandes d'intervention faites par le personnel en assurant leur suivi par un programme de gestion d'interventions ;
- assurer le bon fonctionnement des installations techniques : installations de climatisation, de sécurité (alarmes incendie, d'absence d'oxygène,

de détection de travailleur isolé...), des salles blanches, téléphonies, électricité, sanitaires et, à ce titre, être l'interlocuteur privilégié des services techniques de Sorbonne Université et des prestataires ;

- gérer le parc automobile du LPNHE, assurer son entretien, assurer le suivi des réservations se faisant par un logiciel spécifique et assurer des transports épisodiques de matériel en Île-de-France ;
- maintenir en état l'aménagement des salles de réunion (projection, sonorisation, vidéoconférence) ;
- gérer et entretenir le mobilier et les équipements généraux et établir et maintenir à jour leur inventaire ;
- établir le planning d'occupation des bureaux avec l'aide d'un logiciel de gestion du personnel, permettre l'installation des nouveaux arrivants et gérer les accès avec le système de clef programmable mis en place par l'université ;
- gérer l'utilisation de l'amphithéâtre Georges Charpak, ouvert à la réservation pour des équipes hors LPNHE, ce qui implique d'assurer l'accueil des organisateurs ; il s'agit d'une activité significative du pôle avec des contraintes horaires pour l'accueil des utilisateurs.

Sur la période couverte par ce rapport, l'éclairage de l'amphithéâtre a également été rénové complètement à partir d'un système domotique.

Le pôle logistique et maintenance prend en charge, en collaboration avec les services techniques du campus, un nombre important d'activités diverses permettant directement ou indirectement la poursuite du programme scientifique du laboratoire dans de bonnes conditions matérielles. Le pôle est aussi un acteur du maintien d'un environnement de travail de qualité.

Équipe :

Bernard Canton, Jean-François Goulian,
Michael Roynel

Communication et documentation

Les missions du pôle « Communication et Documentation » sont de :

- diffuser les activités et les résultats scientifiques et techniques du LPNHE ;
- animer la promotion de la recherche scientifique en physique des particules, astroparticules et cosmologie, auprès de divers publics choisis : grand public, scolaire, institutionnel.

Le pôle est composé de trois personnes permanentes et ses activités sont renforcées ponctuellement par l'aide de l'ensemble du personnel du laboratoire, constitué en comité d'organisation, groupe de travail ou chargé de mission.



Candidat.e.s, Lauréat.e.s et membres de Jury du concours « Ma thèse en 5mn » organisé chaque année par le pôle communication du LPNHE et l'Association Française d'Astronomie à l'occasion du Festival des 2 infinis (voir Vie du laboratoire).

Accompagner l'animation scientifique

Le laboratoire organise ou participe à une dizaine de manifestations scientifiques internationales par an. Quelques exemples significatifs sont décrits ci-dessous.

Le pôle assure notamment l'organisation des « Rencontres de Moriond », qui rassemblent chaque année à La Thuile en Italie environ 400 physiciens du monde entier autour de thèmes de physique des hautes énergies : interactions électrofaibles et théories unifiées (2018, 2019), cosmologie (2018), QCD & interactions à haute énergie (2018, 2019) et gravitation (2019).

Le pôle organise aussi chaque année avec la Société Française de Physique, la SFP, les Journées Jeunes Chercheurs, JRJC, de l'IN2P3. Elles ont eu lieu en 2017 du 26 novembre au 2 décembre à Mauges sur Loire (49), en 2018 du 14 au 20 octobre à Lège-Cap-Ferret (33) et en 2019 du 24 au 30 novembre à Logonna-Daoulas (29).

A chaque JRJC, une conférence grand public et une rencontre avec les journalistes locaux donnent l'occasion de marquer et animer l'actualité locale.

Enfin, une autre contribution récurrente du pôle consiste à organiser chaque année, en parallèle avec les Rencontres de Blois, un échange entre des scientifiques participant à la conférence et les étudiant.e.s de l'INSA et de l'IUT de Blois ainsi qu'avec des lycéen.ne.s.

Mettre en valeur les métiers de la recherche

Le pôle « Communication & Documentation » organise chaque année les portes ouvertes du LPNHE qui se déroulent sur 3 ou 4 jours pour promouvoir les sciences auprès des scolaires. Le format adopté inclut des visites guidées, des conférences, des expositions, des présentations d'expériences. Des ateliers pédagogiques sont animés par des volontaires et des expériences contre-intuitives sont présentées pour éveiller la curiosité scientifique chez les plus jeunes. Une équipe de plus de 30 personnes se mobilise pour accueillir un millier de visiteurs (le chapitre *Vie du laboratoire* décrit plus en détail la fête de la science).

Les liens tissés entre le LPNHE et le milieu éducatif se manifestent également par l'organisation chaque année de Masterclasses (également décrites dans *Vie du laboratoire*), la participation aux conférences NEPAL (Noyaux Et Particules Au Lycée) et l'accueil de nombreux stagiaires de la classe de 3^{ème} au Master 2. Nos actions de médiation scientifique se sont également concrétisées avec la signature d'une convention entre le laboratoire et l'associa-

tion F93, pour travailler sur un projet pédagogique « la vie des rayons » et intervenir pendant deux ans (2017-2018) dans les établissements scolaires à la manière des « passions recherche ».

Diffuser l'information scientifique et technique en interne et à l'extérieur du laboratoire

De nombreux outils de communication permettent la diffusion des activités scientifiques et techniques du LPNHE, en interne et vers l'extérieur :

- la conception et la réalisation du rapport d'activité (bisannuel), document institutionnel diffusé à l'ensemble de la communauté scientifique et administrative ;
- l'organisation de journées de réflexion « biennales » : elles ont eu lieu du lundi 15 au jeudi 18 avril 2019 à Montpellier (voir *Vie du laboratoire*) ;
- l'organisation logistique des séminaires hebdomadaires (voir *Vie du laboratoire*) ;
- la mise à jour des actualités du laboratoire sur le site web et les supports multimédia. Un comité web de 5 personnes est chargé du contenu éditorial et de la mise en ligne de ces actualités ;
- la communication interne est assurée via des listes de diffusion et via une page web appelée « La vie du labo » dont le contenu est aussi diffusé sur les écrans plats disposés dans les cafétérias du premier étage et du rez-de-chaussée. Pour ce faire, le pôle s'appuie sur le comité web qui est également chargé de l'alimentation et la mise à jour de cette page.

Par ailleurs, le personnel du LPNHE dispose d'une bibliothèque de recherche associée à la bibliothèque de Sorbonne Université (BSU). Un physicien chargé de la gestion de la documentation veille à la continuité des abonnements aux périodiques scientifiques et aux magazines spécialisés et prépare l'acquisition de nouveaux ouvrages. Les membres du laboratoire ont accès à de nombreuses revues en ligne, à travers la bibliothèque de Sorbonne Université et le portail BibCNRS. De plus, la bibliothèque du LPNHE dispose d'un fonds constitué

d'un peu plus de 2000 monographies spécialisées cotées selon le système Dewey. Ce fonds est intégré au catalogue général de Sorbonne Université et au catalogue national du SUDOC. Il apparaît aussi sur Google Books et WorldCat. La gestion des prêts de ces ouvrages s'effectue via un automate de prêt muni d'un lecteur de codes-barres : les utilisateurs ont ainsi la possibilité d'emprunter et de rendre les ouvrages de manière autonome, 7j/7 et 24h/24.

Participer au dialogue entre science et société

A travers un partenariat avec la Bibliothèque Nationale de France, le pôle organise les rencontres « Physique et Interrogations Fondamentales » de la Société Française de Physique tous les 2 ans. Elles sont l'occasion pour un public d'environ 350 personnes de dialoguer avec des spécialistes de champs disciplinaires différents, intervenant sur un sujet commun. En 2018, le sujet de la seizième rencontre était « Quels algorithmes pour comprendre la Nature ? ».

Équipe :

Isabelle Cossin, Frédéric Derue,
Jacques Dumarchez, Laurent Le Guillou,
Laurence Marquet, Vera de Sá-Varanda

Comité web :

Julien Bolmont, François Legrand, Mélissa Ridet,
Sophie Trincaz-Duvoid, Vera de Sá-Varanda



Scolaires participant aux « Expériences contre intuitives » animées par des étudiant.e.s en Licence Médiation scientifique de Sorbonne Université, formé.e.s par le pôle communication, pendant la fête de la science (voir *Vie du laboratoire*).

Prévention des risques professionnels Radioprotection - Rayonnements optiques artificiels

La prévention des risques professionnels, associée à l'optimisation des conditions de travail, est devenue un enjeu de premier ordre dans le monde du travail. Au LPNHE, s'appuyant sur les directives du CNRS, le directeur d'unité est assisté dans sa mission par un Assistant de Prévention (AP), placé sous sa responsabilité directe. Un assistant ingénieur assure cette mission au LPNHE depuis 2005, qui sera prochainement secondé suite au départ à la retraite en 2019 du précédent AP-adjoint. Cette fonction impose une étroite collaboration autant avec les services de Prévention des Risques Professionnels de la délégation CNRS-Paris Centre, de Sorbonne Université et de l'Université de Paris, qu'avec le Service Sécurité Incendie de Sorbonne Université-Jussieu ainsi qu'avec les médecins de prévention. Pour le suivi des risques particuliers liés aux rayonnements ionisants et aux rayonnements optiques artificiels, des personnes « référentes » complètent le dispositif de prévention : Conseiller en Radioprotection (CRP) et Référent Sécurité Laser (RSL).

Le CLHSCT du LPNHE (Comité Local d'Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail), constitué notamment par des représentant.e.s de chacune de nos tutelles et des médecins de prévention, se réunit annuellement depuis sa création en 2001 afin de débattre et de proposer des solutions en matière d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail. Les dernières réunions se sont déroulées les 28 novembre 2017, 12 décembre 2018 et 11 décembre 2019.

Concernant le suivi des expériences, un travail de conseil est apporté aux groupes du laboratoire pour que les appareillages qu'ils conçoivent soient conformes aux normes de sécurité et un travail de prévention est essentiel pour la bonne utilisation des appareils et produits présentant un risque : em-



Vue de la porte permettant d'accéder au laser et du dispositif de protection des personnes mis en place.

ploi d'appareillages laser, de liquides cryogéniques, de gaz comprimés, ...

Une commission de sécurité liée à chaque expérience a été instaurée en 2019, afin de conseiller et assurer la bonne exécution des mesures de prévention préconisées. Cette commission est composée des personnels de prévention, de la direction technique du laboratoire et de responsables du projet technique concerné.

L'ensemble des locaux est pourvu d'équipements pour la lutte contre l'incendie : système d'alarme, portes coupe-feu, extincteurs, extraction des fumées. L'entretien en est assuré par Sorbonne Université. Au vu du risque élevé, une installation dédiée a également été mise en place à l'intérieur des salles serveurs-informatiques, dotée d'un système d'extinction automatique par gaz inerte.

Afin d'anticiper d'éventuels sinistres, des exercices d'évacuation sont organisés deux fois par an par le personnel du Service Sécurité Incendie de l'université.

Concernant les premiers secours, le laboratoire s'est équipé de 3 défibrillateurs cardiaques automatiques et de 3 armoires de premiers secours, desservant les différents secteurs du LPNHE. Sept agent.e.s ont reçu la formation de secouristes.

Depuis 2011, le LPNHE s'est pourvu de dispositifs de protection pour travailleur.euse.s isolé.e.s :

14 zones, principalement des salles à risques et isolées comme les salles blanches, les salles serveurs informatiques et le hall de montage, sont équipées d'émetteurs « DATI/PTI ». Ces appareils permettent la surveillance du personnel en situation isolée (détection d'absence de mouvements et/ou de verticalité) et donnent l'alerte via une centrale connectée au réseau téléphonique.

En matière de formation, le personnel est régulièrement informé des formations « Hygiène et Sécurité » mises à sa disposition 2 fois par an par le CNRS et Sorbonne Université. En interne, un accueil des nouveaux.elles entrant.e.s au laboratoire a été instauré annuellement, incluant un volet d'information et de sensibilisation « Santé et Sécurité ». Des séances d'informations ponctuelles sont également organisées en fonction des arrivées saisonnières de personnels temporaires.

Concernant les questions de sécurité liées spécifiquement à la radioprotection, un enseignant-chercheur CRP, en charge depuis 2016, supervise toutes les actions nécessitant un suivi dans ce domaine : stockage des sources radioactives scellées au laboratoire, suivi des mouvements de ces sources pour les besoins des expériences, suivi dosimétrique des agent.e.s utilisant ces sources ou se rendant en zones surveillées lors de leurs missions.

Le suivi dosimétrique est assuré en relation avec le Service de Prévention des Risques Professionnels de Sorbonne Université, qui gère la distribution et la collecte des dosimètres trimestriellement.

Concernant les questions de sécurité liées aux rayonnements optiques artificiels (dont le risque « laser »), un ingénieur de recherche RSL nommé en 2019 assure la prévention des risques dans ce domaine. Une installation récente a notamment permis de mettre en sécurité une salle munie d'un appareil laser à impulsion accordable de classe 4 (*photo page précédente*).

L'évaluation des risques professionnels constitue un élément clef de la prévention des risques. Depuis 2014, le « Document Unique » qui en résulte est réalisé à l'aide de l'application en ligne « EvRP », consultable directement par nos tutelles. La dernière mise à jour date de décembre 2019.

Pour conclure, les acteurs de la prévention du LPNHE comptent sur l'implication de tout le personnel afin de réussir dans une démarche de sécurité et de conditions de travail optimales pour tous.

Personnels Hygiène et Sécurité - Laser - Radioprotection :

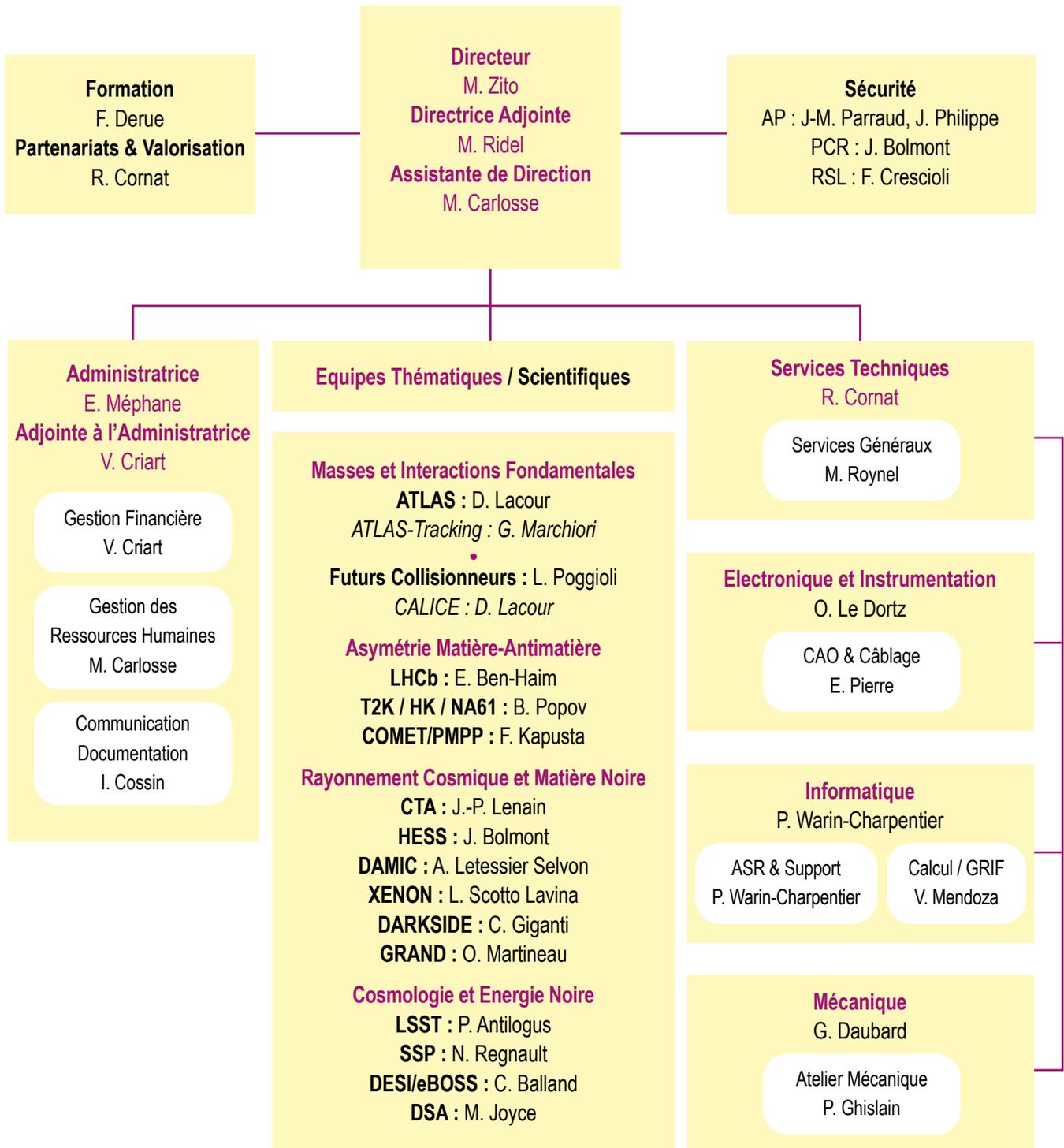
AP du LPNHE : Bernard Canton,
Jean-Marc Parraud, Julien Philippe
PCR du LPNHE : Julien Bolmont
RSL : Francesco Crescioli

CHIFFRES CLEFS

119 personnes sensibilisées à la prévention des risques par le biais de formations internes au LPNHE durant la période couverte par ce rapport (juillet 2017 à décembre 2019)

14 appareils DATI/PTI sécurisent
14 zones identifiées pour travailleur.euse.s isolé.e.s isolés

Organigramme



Personnels au laboratoire au 31/12/2019

Chercheur.euse.s CNRS

Directeur.trice.s de recherche

ANTILOGUS Pierre
ASTIER Pierre
BERNARDI Gregorio
BLONDEL Alain
CALDERINI Giovanni
DERUE Frederic
KRASNY Mieczyslaw
LACOUR Didier
LETESSIER SELVON Antoine
POGGIOLI Luc
POPOV Boris
REGNAULT Nicolas
ROOS Lydia
ZITO Marco (CEA)

Chargé.e.s de recherche

ANDRIEU Bernard
BETOULE Marc
BONGARD Sébastien
BUSCA Nicolas
CAMACHO TORO Reina
DEL BUONO Luigi
GIGANTI Claudio
GLIGOROV Vladimir
KAPUSTA Frederic
LENAIN Jean-Philippe
MALAESCU Bogdan
MARCHIORI Giovanni
POLCI Francesco
SCOTTO LAVINA Luca

Chercheurs émérites

BARRELET Etienne
BENAYOUN Maurice
DUMARCHEZ Jacques
LEVY Jean-Michel
LOISEAU Benoit

Chercheur bénévole

BONNEAUD Gérard

Enseignant.e.s-chercheur.euse.s Sorbonne Université

Professeur.e.s

BALLAND Christophe
BEN-HAIM Eli
HARDIN Delphine
JOYCE Michael
LAFORGE Bertrand
VINCENT Pascal

Maître de conférences

BAUMONT Sylvain
BOLMONT Julien
CHARLES Matthew
DA SILVA Wilfrid
GUIGUE Mathieu
LE GUILLOU Laurent
MARTINEAU Olivier
RIDEL Mélissa
ROBERT Arnaud
TRINCAZ-DUVOID Sophie

Enseignants-chercheurs émérites

BILLOIR Pierre
CHAUVEAU Jacques

Enseignant-chercheur bénévole

KRIVINE Hubert

Enseignant.e.s-chercheur.euse.s Université de Paris

Professeur

OCARIZ José

Maître de conférences

BEAU Tristan
BOMBEN Marco
NIKOLIC Irena
SCHAHMANECHE Kyan

Enseignant-chercheur émérite

VANNUCCI François

Enseignante-chercheuse bénévole

PONS Yvette

Doctorant.e.s (2016-2019)

YAP Yee (2013-2017)
KERSZBERG Daniel (2014-2017)
LE BRETON Remy (2014-2017)
LOPEZ SOLIS Alvaro (2014-2017)
MANZONI Stefano (2014-2017)
PAVIN Matej (2014-2017)
BIENSTOCK Simon (2015-2018)
DUCOURTHIAL Audrey (2015-2018)
LI Changqiao (2015-2018)
MOGINI Andréa (2015-2018)
PERENNES Cédric (2015-2018)
PORTILLO Dilia (2015-2018)
BERTHOLET Emilie (2016-2019)
D'ERAMO Louis (2016-2019)
DA ROCHA Joao (2016-2019)
DE SAINTE AGATHE Victoria (2016-2019)
HANKACHE Robert (2016-2019) H
AZENBERG François (2016-2019)
LUISE Ilaria (2016-2019)
NAVRER-AGASSON Anyssa (2016-2019)
TAREK ABOUELFADL MOHAMMED Ahmed (2016-2019)
KHALIL Latifae (2017-2020)
LEOPOLD Alexander (2017-2020)
PASCUAL DOMINGUEZ Luis (2017-2020)
REISS Florian (2017-2020)
TOU Da Yu (2017-2020)
WANG Yufeng (2017-2020)
ZAHREDDINE Jad (2017-2020)
ZOPOUNIDIS Jean-Philippe (2017-2020)
GRAMMATICO Thomas (2018-2021)
LEVY Christelle (2018-2021)
MATALON Ariel (2018-2021)
STERMER Julianna (2018-2021)
TAIBAH Reem (2018-2021)
AHMED MAOULUD Sid El Moctar (2019-2022)
AUGARDE Guy (2019-2022)
BOUQUET Romain (2019-2022)
HE Yajun (2019-2022)

MALEUBRE Sara (2019-2022)
NGUYEN Quoc Viet (2019-2022)
PAPADOPOULOS Georgios (2019-2022)
POHAN Azrul (2019-2022)
RODE Julie (2019-2022)
TRAINA Michelangelo (2019-2022)

Apprentis (2016-2019)

GROMB Louis (2013-2017)
SAMB Alassane (2016-2017)
BIERNACKI Kévin (2019-2020)
SYLLA Ibrahima (2018-2020)

Chercheur.euse.s CDD et post-doctorant.e.s (2016 - 2019)

CAROFF Sami (2018-2020)
CERRUTI Matteo (2015-2018)
DUJANY Giulio (2017-2018)
FRANCAVILLA Paolo (2013-2017)
GIL MARIN Hector (2015-2018)
LEGET Pierre-François (2018-2020)
LIU Kun (2017-2019)
LOPEZ FUNE Ernesto (2017-2019)
MIRZAEI Mohammad (2015-2017)
NOMIDIS Ioannis (2018-2020)
QUAGLIANI Renato (2017-2020)
VOM BRUCH Dorothea (2017-2020)
PEREZ-RAFOLS Ignasi (2019-2021)
PRIVITERA Paolo (2018-2021)
SAUNDERS Clare (2016-2019)
WANG Renjie (2016-2018)
WEBER Steffen Georg (2019-2021)

Ingénieur.e.s, technicien.ne.s, administratif.ve.s

Ingénieur.e.s de recherche

CORNAT Rémi
CRESCIOLI Francesco
DADOUN Olivier
DAUBARD Guillaume
GAIOR Romain
JURAMY-GILLES Claire
LAPORTE Didier
LE DORTZ Olivier
LEBBOLO Hervé
LEGRAND François
MENDOZA Victor
MEPHANE Evelyne
MEUNIER Jean-Luc
RUSSO Stefano
SEPULVEDA TAUJIS Eduardo
TOUSSENEL François
VINCENT Daniel
WARIN Patricia

Ingénieur.e.s d'études

CORONA Pascal
COSSIN Isabelle
MARTIN David
PHILIPPE Julien
REPAIN Philippe
TERRONT Diego Fernando
VALLEREAU Alain
VOISIN Vincent

Assistant.e.s ingénieur.e.s

BAILLY Philippe
CARLOSSE Magali
CARVALHAIS Carla
CRIART Véronique
DHELLOT Marc
GHISLAIN Patrick
ORAIN Yann
PARRAUD Jean-Marc
PIERRE Eric
ROYNEL Michael

Technicien.ne.s de recherche

BAALOUCHI Hager
CARACO Bernard
CORIDIAN Julien
DELAMOUR Brigitte
HO Tan Trung

Adjoint technique de recherche

GOULIAN Jean-François

Personnels techniques Sorbonne Université

BAILLY-REYRE Aurélien
MARQUET Laurence
ITA Autres
DE SÁ-VARANDA Vera

Ingénieur.e.s, technicien.ne.s, administratif.ve.s CDD (2016-2019)

HADDAD Yousser (2019-2021)
KAESEBERG Francis (2018)
ROMET Pierre (2018)

Instances du laboratoire

Conseil du laboratoire (2019)

Président ex-officio

ZITO Marcco

Membres nommés

BALLAND Christophe
VINCENT Daniel
LAVINA Luca Scotto

Représentant des étudiant.e.s

ZAHREDDINE Jad

Membres élu.e.s

ASTIER Pierre
BOMBEN Marco
DAUBARD Guillaume
JURAMY-GILLES Claire
HARDIN Delphine
LEGRAND Francois
LENAIN Jean-Philippe
MEUNIER Jean-Luc

Membres invité.e.s ex-officio

CORNAT Rémi
MEPHANE Évelyne
RIDEL Mélissa

Conseil scientifique (2019)

Membres extérieur.e.s nommé.e.s

CIRELLI Marco
HEINEMANN Beate

Membres nommé.e.s

JURAMY-GILLES Claire
LE GUILLOU Laurent (président)
POLCI Francesco

Membres élus

ASTIER Pierre
CHARLES Matthew
GIGANTI Claudio
OCARIZ José

Membres invité.e.s ex-officio

CORNAT Rémi
RIDEL Mélissa (secrétaire)
ZITO Marco

Comité local hygiène et sécurité et conditions de travail (2019)

Président

ZITO Marco

Directrice adjointe

RIDEL Mélissa

Directeur technique

CORNAT Rémi

Administratrice

MEPHANE Evelyne

Assistants de prévention

PARRAUD Jean-Marc
PHILIPPE Julien

Personne compétente en radioprotection

BOLMONT Julien

Référent Sécurité Laser

CRESCIOLI Francesco

Représentants du personnel

ASTIER Pierre

DAUBARD Guillaume

JURAMY-GILLES Claire

LENAIN Jean-Philippe

Responsable du service hygiène et sécurité

de Sorbonne Université

NEBBACHE Soraya

Responsable du service hygiène et sécurité

de l'Université de Paris

PÉROT Guillaume

Ingénieure régionale de prévention et de sécurité

du CNRS – Paris Centre

MAZÉ-CORADIN Frédérique

Responsable de la cellule sûreté nucléaire

et radioprotection de l'IN2P3

THIEFFRY Cyril

Médecin de prévention de Sorbonne Université

LIGONNIÈRE Brigitte

Médecin de prévention du CNRS

VASSEUR Arnaud

Commission des personnels du laboratoire (2019)

Membres nommé.e.s

CORNAT Rémi
MEPHANE Evelyne

Membres élus

CORIDIAN Julien
LAPORTE Didier
SEPULVEDA Eduardo

Chargé.e.s de mission

Bibliothèque

LE GUILLOU Laurent

Comité Biennale 2019

BOMBEN Marco
CAMACHO TORO Reina
CORNAT Rémi
COSSIN Isabelle
GAIOR Romain
GLIGOROV Vladimir
GUIGUE Mathieu
MARQUET Laurence

Formation

DERUE Frédéric

Partenariats et valorisation

CORNAT Rémi

Masters 2

BEN-HAIM Eii
HARDIN Delphine
VINCENT Pascal

Réunion du vendredi (2017-2019)

BOMBEN Marco
SCOTTO LAVINA Luca
CAMACHO TORO Reina
JURAMY-GILLES Claire

Sécurité

Assistants de Prévention

PARRAUD Jean-Marc

PHILIPPE Julien

Personne Compétente en Radioprotection

BOLMONT Julien

Référent protection laser

CRESCIOLI Francesco

Séminaires (2017-2019)

BONGARD Sébastien
OCARIZ José
GUIGUE Mathieu
POGGIOLI Luc

Stages, Thèses, Écoles Doctorales, Nouveaux/elles Entrant.e.s (2019)

Suivi des doctorant.e.s du laboratoire

BONGARD Sébastien

Stages

TRINCAZ-DUVOID Sophie

École Doctorale

BALLAND Christophe

NIKOLIC Irena

RIDEL Mélissa

Nouveaux/elles entrant.e.s

CARLOSSE Magali

Structures partenaires (Labex, DIM, Initiative, etc)

ILP

LAFORGE Bertrand

LETESSIER-SALVON Antoine

REGNAULT Nicolas

Initiative Sorbonne Université Physique des infinis

BALLAND Christophe

ACAV +

BOLMONT Julien

IDPASC

LAFORGE Bertrand

PNCG

REGNAULT Nicolas

LA-CoNGA-Physics

OCARIZ José

CAMACHO TORO Reina

BOMBEN Marco

Web

BOLMONT Julien

DE SÁ-VARANDA Vera

LEGRAND François

RIDEL Mélissa

TRINCAZ-DUVOID Sophie

Vie du laboratoire

- Partenariats scientifiques
- Animation scientifique
 - Les séminaires
 - Liste des séminaires
 - La réunion du vendredi : au cœur de la vie du laboratoire
 - Le journal club des doctorant.e.s de post-doctorant.e.s
 - La biennale
- Communication et partage des connaissances
 - La fête de la science au LPNHE
 - Les masterclasses
- Activités d'intérêt général CNRS
- La formation permanente

VIE DU LABORATOIRE

De nombreux partenariats en France et à travers le monde participent à construire la vie scientifique du LPNHE et s'ajoutent aux collaborations autour des projets qui ont été décrites dans la partie Activités scientifiques et techniques.

La vie collective du LPNHE s'organise également autour de plusieurs événements incontournables qui ponctuent la semaine : les séminaires du lundi qui permettent de recevoir un collègue d'un autre laboratoire et la réunion du vendredi qui est dédiée à la communication interne. La liste des séminaires reflète la diversité des thèmes abordés dans l'année et des discussions scientifiques. De plus, les doctorant.e.s et post-doctorant.e.s se retrouvent mensuellement pour approfondir un sujet qu'ils choisissent.

Des rendez-vous permettent les discussions sur l'avenir du LPNHE comme la biennale où le labora-

toire s'installe quelques jours en dehors du campus Pierre et Marie Curie et profite de ce changement d'ambiance pour échanger sur les projets futurs ou les conditions de travail. Elle a lieu tous les deux ans et demi.

La fête de la science et les masterclasses sont d'autres moments forts de l'année, qui permettent de toucher différents publics et de les sensibiliser à nos activités. Elles deviennent des institutions au fil des années comme le montre la participation en interne et du public !

Finalement, le laboratoire participe à des activités d'intérêt général pour former des collègues et animer des réseaux notamment et se forme constamment pour préserver et enrichir le niveau de compétences des personnels.

Partenariats scientifiques

Les équipes de recherche du laboratoire entretiennent de nombreuses collaborations scientifiques avec des équipes de recherche en France et à l'étranger. Le laboratoire est, par ailleurs, formellement partenaire de plusieurs accords de collaboration nationaux et internationaux.

Au niveau local, le laboratoire est membre de la Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales (FRIF), qui regroupe, sous la tutelle de Sorbonne Université, les chercheur.euse.s du LPNHE et les théoricien.ne.s du LPTHE, du LPTENS et de l'APC. L'affiliation à la fédération a permis de développer les interactions avec théoricien.ne.s et phénoménologues sur des thèmes prioritaires au laboratoire, principalement liés à la physique au LHC et à l'étude de la matière et de l'énergie noires.

Toujours sur la place parisienne, le laboratoire est membre du « Laboratoire d'excellence » (Labex) Institut Lagrange de Paris (ILP) et est partenaire du Paris Center for Cosmological Physics (PCCP) dirigé par G. Smoot. Le Labex ILP comprend le LPNHE,

l'IAP, le LPTHE, la FRIF, l'IHP ainsi que les équipes de recherche de Françoise Combes du LERMA et du Collège de France. L'ILP s'inscrit à l'interface entre la physique théorique, la physique des particules, l'astrophysique et la cosmologie. Jusqu'en 2016, le soutien de l'ILP a permis de financer chaque année des contrats doctoraux et post-doctoraux, de soutenir des programmes de visiteurs et des actions importantes de communication scientifique. L'ILP n'a pas été renouvelé mais Sorbonne Université a promu une structuration différente sous forme d'instituts et d'initiatives d'excellence à partir de 2020. Une initiative d'excellence « Physique des Infinis » a été lancée avec pour ambition de fédérer deux domaines phares : la physique des hautes énergies et la science des plasmas. Cette initiative regroupe une dizaine des laboratoires dont le LPNHE. Par ailleurs un des deux directeurs de cette initiative est issu du LPNHE.

Au niveau de la région Ile-de-France, le laboratoire est partenaire du groupement de recherche GRIF, « Grille au service de la Recherche en Ile de



France ». Ce groupement vise à doter les laboratoires d'Ile-de-France impliqués dans le LHC (CEA/Irfu, LAL, IPN, LLR) de moyens de calcul et de stockage de type « grille de calcul ». Sorbonne Université ayant participé fortement au financement de l'infrastructure locale de GRIF, un accès à ces ressources a été ouvert à des équipes du campus de Jussieu ayant besoin de calculs intensifs (LHC, CTA...).

Le laboratoire est également partenaire du groupe de recherche ACAV « Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie », labellisé « domaine d'intérêt majeur » (DIM) par le conseil régional d'Ile-de-France. Il regroupe les équipes de recherche et laboratoires franciliens internationalement reconnus dans ces domaines. Durant la période 2017-2019, le laboratoire a reçu de ce groupement un soutien pour l'achat de matériel d'instrumentation et des crédits d'animation scientifique (*tableau ci-dessous*).

Au-delà des frontières, le laboratoire est membre de plusieurs « Laboratoires Internationaux Associées » (LIA) comme le Laboratoire Européen pour l'Astronomie Gamma (ELGA), le Laboratoire Franco-Chinois de Physique des Particules (FCPPL) et ses équivalents Japonais et Coréen (FJPPL, FKPPL), et le Laboratoire International pour la Physique des

Particules et la Cosmologie (ILPPC), une collaboration entre le LPNHE et le département de Physique du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) aux Etats-Unis. Ces accords de collaboration permettent de financer principalement les séjours de scientifiques étrangers au laboratoire et réciproquement ceux de chercheurs du LPNHE dans les laboratoires partenaires. De nombreuses collaborations existent également par le biais d'accords de coopération spécifiques passés par l'IN2P3 ou le CNRS avec les pays concernés (Espagne, Pologne, Russie, ...).

Enfin, le laboratoire avait activement participé au programme EPLANET d'échanges scientifiques avec l'Amérique latine qui visait à favoriser les échanges entre le CERN, les pays d'Amérique latine et les pays dits « latinoeuropéens » sur une thématique scientifique, principalement liée au LHC. Pour poursuivre ce partenariat avec l'Amérique latine, trois membres du laboratoire dont l'un est le porteur de projet, ont été lauréats, en 2019, du programme ERASMUS+, porté par l'Université de Paris, pour le développement de masters en physique des hautes énergies en Amérique latine appelé Latin-American Alliance for Capacity building in Advanced Physics (LA-CoNGA Physics).

acronyme - contrat	source
AIDA-2020	H2020 / commission européenne
FTK	Commission européenne - 7 ^{ème} Marie Curie
DIMACAV	Région Ile de France
FastTrack	ANR
SATT	Région Ile de France INNOV
Revisal	ANR
PhotonPortal	ANR
eBoss	ANR
RECEPT	H2020 ERC / Commission européenne
Labex ILP	Sorbonne Université
DAMIC-M	H2020 ERC / Commission européenne
PROCOPE	Ambassade de France en Suisse
PROCOPE	Ambassade de France en Allemagne
JENNIFER2	H2020 / Commission européenne
SUNCORE	ANR
Emergences	Sorbonne Université

Liste des principaux contrats installés au LPNHE de juillet 2017 à décembre 2019.

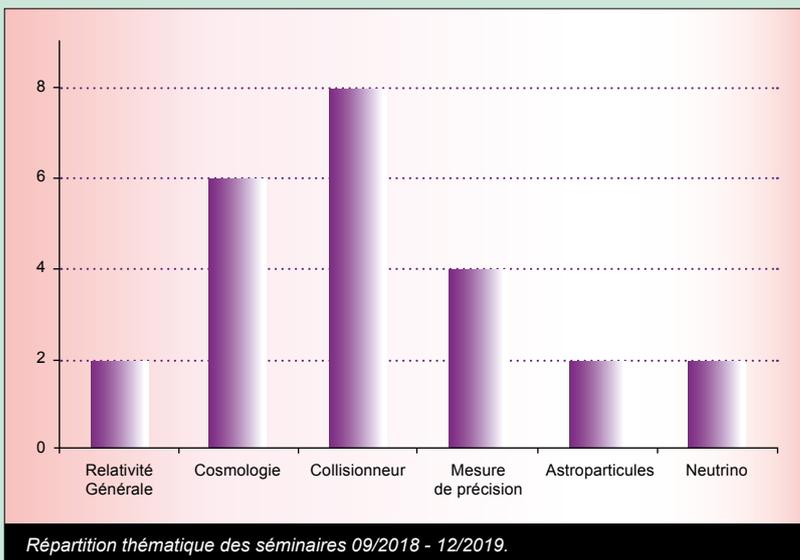
Les séminaires



Le LPNHE organise chaque lundi un séminaire ouvert à tous, principalement sur les thématiques du laboratoire, mais aussi sur des sujets connexes qui permettent de mieux connaître les recherches des laboratoires voisins sur le campus. Ces séminaires sont l'occasion, pour les chercheurs jeunes ou expérimentés,

de mieux comprendre les enjeux et les derniers résultats d'un domaine. Comme représenté sur la figure ci-dessous et la liste des séminaires page suivante, les thématiques des séminaires du laboratoire sont assez diverses, recouvrant à la fois les sujets forts du laboratoire et les thématiques de l'IN2P3. Une collation servie après le séminaire permet des discussions informelles afin d'approfondir le sujet.

Le budget accordé à l'organisation des séminaires permet de recevoir des scientifiques en dehors de Paris : sur la période de septembre 2018 à décembre 2019, 60 % des séminaristes venaient de l'extérieur de Paris et ne travaillaient pas dans un laboratoire de l'IN2P3. L'accueil de visiteurs extérieurs permet de participer au rayonnement du laboratoire et de créer ou renforcer des relations avec d'autres instituts sur des expériences.



Responsables :

Actuellement :

Mathieu Guigue,
Luc Poggioli

Précédemment :

Sébastien Bongard
José Ocariz

Logistique :

Laurence Marquet

Liste des séminaires

2019

16/12/2019 : Kenneth Long (Imperial College London), *The route to a multi-TeV muon collider*
09/12/2019 : Xavier Sarazin (LAL), *L'expérience DeLLight (Deflection of Light by Light) : Modification de l'indice optique du vide soumis à un champ électromagnétique intense*
02/12/2019 : Thibaut Louis (LAL), *Hunting for new physics with the Simons Observatory*
25/11/2019 : Pacôme Delva (Obs. Paris), *Fundamental physics and geodesy with atomic clocks*
04/11/2019 : Josquin Errard (APC), *The next generation CMB polarization satellite: LiteBIRD*
28/10/2019 : Isabelle Ripp-Baudot (IPHC), *First data and prospects of the Belle II experiment*
21/10/2019 : Tatjana Lenz (CERN), *HH Hunting with ATLAS*
14/10/2019 : Julien Billard (IPNL), *Probing new physics with Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering and the future Ricochet experiment*
07/10/2019 : Eluned Anne Smith (Aachen), *Searching for new physics with $b \rightarrow s\ell\ell$ transitions*
16/09/2019 : Loïc Valéry (DESY), *Top quark : a window to New Physics*
16/07/2019 : Akira Konaka (TRIUMF), *Precision studies of neutrino oscillations at Hyper-Kamiokande*
08/07/2019 : Rémi Adam (LLR), *The formation of galaxy clusters from radio to gamma-ray observations*
01/07/2019 : David Lunney (CSNSM), *L'expérience GBAR* au CERN*
24/06/2019 : Francesco Spano (CERN), *Top quark physics at the LHC. Selected highlights*
17/06/2019 : Jean Duprat (CSNSM), *Les micro-météorites ultra-carbonées, ce que ces particules nous apprennent sur l'origine de la matière organique cométaire*
11/06/2019 : Marco Ajello (Clemson University), *The Cosmic History of Light*
27/05/2019 : Karelle Siellez (Univ. Santa Cruz), *Implication des taux de mergers d'étoiles à neutrons sur le suivi multimessager et la cosmologie*
29/04/2019 : Guillaume Pignol (LPSC), *Search for the electric dipole of the neutron*
18/03/2019 : Pierre-François Léget (LPNHE), *Type Ia Supernova cosmology challenges and implications for constraining dark energy properties using LSST*
11/03/2019 : Daniel Flanagan (CEA), *Measuring the oldest light in the universe as quickly as possible with microwave kinetic inductance detectors*

04/03/2019 : Louis Henry (IFIC), *Flavour, where are we (going)?*
18/02/2019 : Johanna Pasquet (CPPM), *A deep learning approach to observational cosmology with Supernovae*
11/02/2019 : Guy Perrin (CNRS/INSU), *First explorations of Sgr A* at the event horizon scale and first tests of general relativity with GRAVITY*
07/01/2019 : Yoann Kermaidic (MPIK), *Current status of the ^{76}Ge neutrinoless double beta decay search and future prospects with LEGEND*

2018

10/12/2018 : Arely Cortés González (CERN), *Dark matter searches at the LHC*
12/11/2018 : Adrien Hourlier (MIT), *3D track finding for MicroBooNE's deep learning based event reconstruction chain*
15/10/2018 : Michele Ronco (Roma 1), *Quantum spacetime imprints in gamma-ray propagation*
25/06/2018 : Luis A. Núñez (UIS, Bucaramanga), *Astroparticles @EasternColombia*
18/06/2018 : Lester David (LESIA), *Picsat et micro-satellites*
11/06/2018 : Gilles Ramstein (LSCE), *Paleoclimatologie*
04/06/2018 : Anna Kaczmarska (IFJ, Cracovie), *The quest for charged Higgs boson at ATLAS*
28/05/2018 : Benoît Prieur (Société Philomathique de Paris), *Le chaînon manquant de la théorie du spin*
17/05/2018 : Johan Richard (CRAL), *4MOST*
27/04/2018 : Jonathan Biseau (IPNO), *Anisotropies at ultra-high energies : an indication and a discovery*
16/04/2018 : Ben Nachman (LBNL), *Machine Learning for Jet Physics at the Large Hadron Collider*
09/04/2018 : Rebeca Ribeiro (C2N Marcoussis), *On-demand band structure modification in graphene/BN heterostructures by active angle control*
26/03/2018 : Anais Möller (ANU), *Update from Australia's SkyMapper and the DES supernova cosmology analysis*
12/03/2018 : Florent Deleflie (IMCCE), *Orbitographies pour l'environnement terrestre*
05/03/2018 : Adrian Irls (LAL), *Introduction to the physics case of the ILC and R&D for a highly granular electromagnetic calorimeter*
19/02/2018 : Fukihiro Suekane (Tohoku Univ., Japan / APC laboratory, France), *Sterile Neutrino Experiment JSNS² : The direct test of the LSND anomaly*

12/02/2018 : François Forget (LMD), *Pluton révélée par la sonde New Horizons*
29/01/2018 : Alessandro Spallicci (LPC2E Orléans), *Photons in massive and non-linear theories*
22/01/2018 : Eric Guilyardi (OCEAN/IPSS), *Changement climatique : nouvelles du front d'un climatologue*
08/01/2018 : Serge Reynaud (LKB), *Premiers résultats de MICROSCOPE*

2017

18/12/2017 : Frédéric Magniette (LLR), *Pyrame 3*
11/12/2017 : Maxime Guimbaud (CMS-CERN), *How small a Quark-gluon plasma can be? — Toward a unified paradigm to describe high energy hadronic collisions*
04/12/2017 : Eric Buchlin (IAS), *Beware of the solar storm!*
27/11/2017 : Frédérique Marion (LAPP), *Gravitational waves : First results from the LIGO-Virgo O2 run*
20/11/2017 : Michele de Gruttola (CERN), *Evidence for $H \rightarrow b\bar{b}$ with CMS*
13/11/2017 : Kun Liu (LPNHE) *Evidence for $t\bar{t}$ production with the ATLAS detector*
06/11/2017 : Pierre Drossart (LESIA), *Cassini probe*
14/10/2017 : Alexandre Le Tiec (Obs. Paris Meudon), *Les ondes gravitationnelles, messagères d'Einstein*
14/10/2017 : Françoise Combes (Obs. Paris), *Euclid, à la recherche de l'Univers sombre*
14/10/2017 : Pierre Guillard (IAP), *JWST, un nouveau regard sur la formation des galaxies*
14/10/2017 : Aymeric Spiga (LMD), *L'atmosphère de Saturne vue par Cassini*
14/10/2017 : Jean-Michel Levy (LPNHE), *Voyages relativistes*
14/10/2017 : Fabien Cavalier (LAL), *Les ondes gravitationnelles ou les frémissements de l'espace-temps*
14/10/2017 : François Vannucci (LPNHE), *Un panorama historique des découvertes en physique des particules*
13/10/2017 : Hubert Krivine (LPNHE), *Peut-on définir le hasard?*
13/10/2017 : Pierre Antilogus (LPNHE), *Un géant pour arpenter l'Univers*
12/10/2017 : Bertrand Laforge (LPNHE), *Dernières nouvelles du boson de Higgs et de la recherche de matière noire au LHC*
12/10/2017 : François Vannucci (LPNHE), *Les deux côtés du temps : de Einstein à Proust*

La réunion du vendredi : au cœur de la vie du laboratoire



La réunion du vendredi est un forum hebdomadaire auquel l'ensemble du personnel du laboratoire est convié chaque vendredi matin, de 11 h à midi. Depuis 2014, elle se tient dans l'amphithéâtre G. Charpak du LPNHE. Cette réunion régulière permet une communication directe entre tous les personnels du laboratoire, les chercheur.euse.s et enseignant.e.s-chercheur.euse.s des différentes équipes, les ingénieur.e.s et technicien.ne.s, l'administration et la direction.

La réunion débute par une séance de questions diverses et de partage d'informations à caractère général : activités au laboratoire, écoles/workshops et conférences à venir, présentation des nouveaux.elles

arrivant.e.s arrivants. Un compte rendu de cette séance a été introduit en 2019 en français et anglais, afin qu'il soit accessible à tous les membres du laboratoire. Au cours de cette séance, la direction fait part à l'ensemble du personnel des décisions prises au CNRS, à l'IN2P3, dans les universités de tutelle ou dans les différents conseils du laboratoire. Elle se poursuit par un ou plusieurs exposés sur un thème de physique ou sur une réalisation technique, un compte-rendu de conférence ou le bilan d'activité d'un service. Il est d'usage que les doctorant.e.s de deuxième année et les post-doctorant.e.s y présentent leurs travaux devant un public extérieur à leur équipe. Depuis octobre 2019, l'équipe d'organisation de la réunion du vendredi est composée par un.e chercheur.euse et un.e ingénieur.e ou un.e technicien.ne, afin de reconnaître l'importance de la participation de toutes les équipes scientifiques et techniques. Les supports de toutes les présentations sont enregistrés sur le site internet du LPNHE depuis de nombreuses années, donnant accès à un panorama complet et détaillé des activités du laboratoire.

Organisation et animation :

Actuellement : Reina Camacho Toro,

Claire Juramy-Gilles

Précédemment : Marco Bomben,

Luca Scotto Lavina

Le journal club des doctorant.e.s de post-doctorant.e.s

Dans le but d'animer la vie professionnelle des doctorant.e.s et des post-doctorant.e.s du LPNHE, une rencontre mensuelle portant sur la discussion d'articles a été mise en place, le Journal Club.

Le Journal Club est une occasion de discussions et d'échanges entre les participant.e.s. Il se veut un moment de partage d'idées et de connaissances autour d'un sujet, décidé à l'avance, dont la nature peut être variée. La question de la publication de données en

libre accès par les expériences du CERN a été abordée. Sont aussi discutés des thèmes dont le lien avec l'activité du laboratoire est moins direct. Le genre en science, l'utilisation des *blockchains*, comment discuter d'un sujet consensuel avec d'autres scientifiques, sont autant d'exemples quant à la grande variété des débats ayant place lors du Journal Club.

Tel que susmentionné, le Journal Club est ouvert à tout.e doctorant.e ou tout.e post-doctorant.e travaillant au LPNHE. Cette restriction vis-à-vis des autres personnels du laboratoire est faite à dessein. Elle vise à permettre à chacun.e des participant.e.s une expres-

sion libre. En effet, la présence d'un.e supérieur.e hiérarchique ou de tout personnel permanent du laboratoire pourrait entraver une telle liberté, les jeunes chercheur.euse.s du laboratoire hésitant souvent à poser des questions qu'ils jugent trop élémentaires. Il apparaît cependant dommage de priver les membres permanents du laboratoire d'un tel événement et des solutions ont été proposées pour palier ceci. Le Journal Club pourrait par exemple se dérouler en deux sessions, une première avec tous les participant.e.s volontaires et une seconde à sa suite réservée aux post-doctorant.e.s et doctorant.e.s. Pourrait aussi être imaginée une boîte de discussion où chacun pourrait proposer ses questions ou idées anonymement. La personne chargée de l'organisation de la réunion présente pourrait alors lire ces messages. Ces propositions doivent encore être soumises à l'approbation de tous puis testées.

Enfin, pour garantir un déroulement pérenne du Journal Club, son organisation a quelque peu évolué. A présent, chacun est désigné à tour de rôle pour préparer une session. La personne désignée doit choisir le sujet qui animera l'édition prochaine du Journal Club. En plus de cette tâche, elle doit fournir des articles sur le thème abordé. Ces articles peuvent aussi bien être issus d'un journal scientifique à comité de revue par les pair.e.s que d'un journal plus classique. Les participant.e.s préparent le Journal Club en lisant les papiers par avance, ceux-ci servant de support à la réunion.

Le Journal Club est un événement du laboratoire très apprécié par ses participant.e.s. Les divers sujets abordés ainsi que son format ont su lui apporter une place dans la vie professionnelle des doctorant.e.s et des post-doctorant.e.s du LPNHE.

La biennale



La biennale 2019 du LPNHE s'est déroulée à Montpellier du 15 au 18 avril 2019, à peu près en même temps que la préparation de la mise à jour quinquennale de la stratégie européenne pour la

CHIFFRES CLEFS

4 groupes de travail et une **dizaine** de réunions préparatoires

70 participant.e.s

8 présentations thématiques des activités scientifiques

13 présentations d'étudiant.e.s



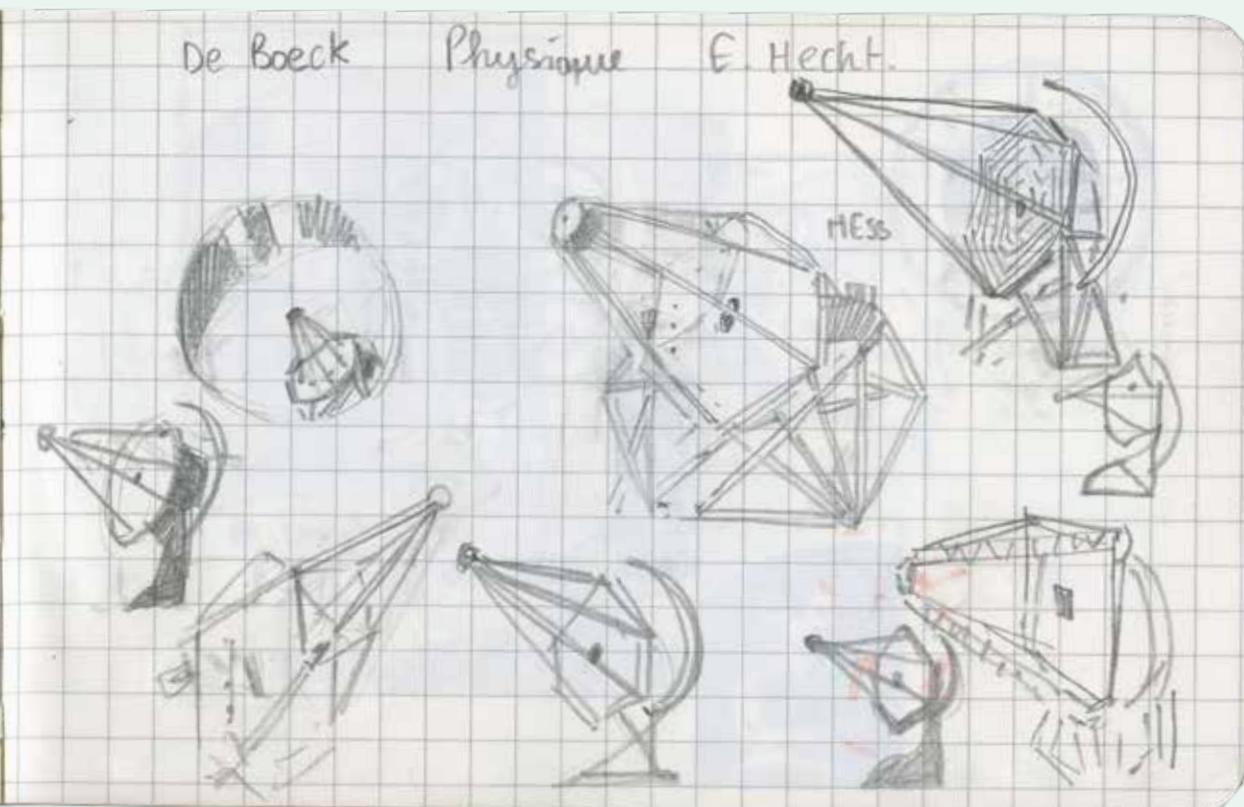
physique des particules. Par conséquent, une partie substantielle de nos efforts a été consacrée à des discussions en amont des perspectives expérimentales futures dans les domaines de recherche poursuivis au sein du laboratoire. L'objectif était de tracer une ligne cohérente entre le programme de recherche actuel du laboratoire et les défis futurs les plus intéressants ou les plus importants et de comprendre quels collègues étaient intéressés par les futures expériences ou installations proposées. Le résultat de ces discussions a été résumé dans un document qui a contribué aux propositions pour la définition de la stratégie européenne pour la discipline.

De plus, des groupes de travail ont été organisés pour discuter des relations avec le personnel technique, des relations avec l'université et pour discuter des moyens par lesquels le laboratoire pourrait aider les chercheurs à solliciter des ressources humaines et financières. Le groupe de travail sur

les relations avec l'université était particulièrement important car le LPNHE a une très forte proportion de personnel enseignant-chercheur par rapport aux autres laboratoires de l'IN2P3 et il a produit un livre blanc avec des recommandations concrètes à la nouvelle direction du LPNHE sur la manière d'améliorer leurs conditions de travail. Ces discussions préparatoires ont ensuite constitué la base de l'ordre du jour des discussions de la biennale. En plus du personnel de recherche, les étudiants ont été invités à donner leur avis et une discussion dédiée a été organisée lors de la biennale sur leurs conditions de travail.

Coordination :

Marco Bomben, Reina Camacho Toro, Rémi Cornat, Isabelle Cossin, Romain Gaior, Vladimir Gligorov, Mathieu Guigue, Laurence Marquet



La fête de la science au LPNHE



Communiquer en direction du grand public sur des avancées scientifiques dans le domaine de la physique des particules, des astroparticules et de la cosmologie est une prouesse acrobatique et périlleuse que relève chaque année le laboratoire, avec une équipe de plus de 30 personnes volontaires (physicien.ne.s et personnels techniques). C'est ainsi que le LPNHE répond à sa mission de diffusion scientifique, en participant chaque année à la « fête de la science ».

Pour faciliter la vulgarisation auprès des publics non-spécialistes, ces médiateur.trice.s sont mobilisé.e.s pour animer un large programme conçu et organisé par le pôle communication autour d'actualités ou de thèmes choisis. En 2017, au-delà du thème national choisi pour mettre l'accent sur « la science cachée dans notre quotidien », nous avons surtout fêté les 20 ans de participation du laboratoire à la fête de la science du 12 au 15 octobre. En 2018, le thème mettait en question « les idées reçues en science ... » et nous avons innové en incluant dans notre programme un *Escape Game*, « les Aventures de Léo Galli », conçu autour de la physique des particules. En 2019, nous avons traduit le thème national « Raconter la science » en une version adaptée aux instruments de nos disciplines, « Mesures et démesure en Physique des particules et astrophysique » : elle s'est déroulée du 10 au 13 octobre.

Le LPNHE a accueilli en 2017 1670 visiteurs dont 420 scolaires, en 2018 863 visiteurs dont 223 scolaires et en 2019 1109 visiteurs dont 368 scolaires.

Lors de ce rendez-vous récurrent, des visites guidées par un membre du laboratoire permettent aux visiteurs d'appréhender les thématiques de recherche ainsi que les outils et méthodes utilisées. Des ateliers pédagogiques abordent la physique ou l'instrumentation sous un aspect plus concret. Des conférences grand public présentent les recherches menées au laboratoire en permettant d'approfondir certains sujets. Des rencontres courtes, « *speed dating* », permettent des échanges directs avec les personnels du laboratoire autour des différents métiers de la recherche.

Pour atteindre un public plus jeune, des actions sont menées au cœur du Village des Sciences de Sorbonne Université, avec un stand sur des expériences contre-intuitives et depuis 2018, un atelier de tatouages temporaires permettant de transmettre quelques informations sur le travail effectué au laboratoire durant l'apposition du tatouage.

Nourri par la volonté de tisser des liens entre l'art et la science, le LPNHE a accueilli en 2019, le spectacle de danse contemporaine « *The Neutrino Passoire* ». L'objectif était de raconter la découverte du neutrino récompensée en 1995 par le prix Nobel de



Évolution du nombre de visiteurs lors de la fête de la science au LPNHE. En 2019, parmi les 1109 visiteurs au LPNHE, 368 étaient des scolaires ; lors du week-end de la fête de la science, le campus Pierre et Marie-Curie a accueilli plus de 10000 visiteurs. 2017 était l'année des 20 ans de la fête de la science.

physique et la présenter avec des images et des termes familiers, afin de la rendre accessible.

De plus, grâce à un partenariat avec l'Institut des Nano-Sciences de Paris et le Laboratoire Kastler Brossel, des visites de l'accélérateur SAFIR et de l'accélérateur SIMPA de Jussieu sont organisées chaque année.

Par ailleurs, le laboratoire s'associe avec l'Association Française d'Astronomie pour organiser le « Festival des 2 infinis » (voir *Organisation du laboratoire*). Depuis 2014 une nouvelle animation a vu le jour, principalement à destination des lycéen.ne.s, « 5 mn pour ma thèse », avec le triple objectif de faire découvrir aux lycéen.ne.s la recherche en astronomie et en physique des particules, faire se rencontrer jeunes physicien.ne.s et astrophysicien.ne.s et sensibiliser les doctorant.e.s à la médiation vers le grand public. A l'issue de cette rencontre, le jury et le public décernent un prix aux trois meilleures présentations.

Équipe :

Isabelle Cossin, Frédéric Derue,
Jacques Dumarchez, Laurence Marquet,
Vera de Sá-Varanda



Les masterclasses

Nous organisons chaque année des masterclasses dans le cadre de l'organisation « *International Masterclasses* », avec la participation de différentes écoles du Grand Paris. Les élèves sont accueilli.e.s toute une journée, avec une présentation de la physique des hautes énergies dans l'amphithéâtre Charpak le matin, la cafétéria du LPNHE à disposition pour le déjeuner, un exercice avec les vraies données de LHCb l'après-midi et finalement une visio-conférence avec les autres écoles dans le monde qui ont fait leurs masterclasses ce même jour en fin d'après-midi.

Le but de l'exercice est que les élèves aient la possibilité de trouver les particules dans les collisions enregistrées avec le détecteur LHCb et de mesurer leur temps de vie. Afin de mieux préparer la journée, nous organisons une visite de chaque école avant la journée dédiée à leur masterclass, avec une présentation générale du travail des chercheur.euse.s en physique, et une opportunité pour les élèves de nous poser des questions. Pendant la visio-conférence à la fin de la journée, les élèves présentent leurs résultats et peuvent échanger avec les scientifiques de LHCb basé.e.s au CERN sur leur travail et les questions scientifiques qui les intéressent.

Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Eli Ben Haïm, Emilie Bertholet, Pierre Billoir,
Matthew Charles, Giulio Dujany, Vladimir Gligorov,
Francesco Polci, Renato Quagliani,
Florian Reiss, Dorothea vom Bruch, Da Yu Tou,

Équipe Technique :

Bernand Canton, Alain Courriou (Sorbonne Université),
Vladimir Gligorov, Laurence Marquet,
Michael Roynel

CHIFFRES CLEFS

2017 : **3** écoles, environ **100** élèves

2018 : **3** écoles, environ **100** élèves

2019 : **1** école, environ **35** élèves

Activités d'intérêt général CNRS

Isabelle Cossin

- Responsable de l'animation du réseau des communicants de l'IN2P3, structure qui coordonne, au niveau de l'Institut du CNRS, les actions de communication nationales.
- Membre du groupe de travail pour la mise en place du réseau « Com'on » des Chargé.e.s de Communication du CNRS.
- Experte auprès de l'observatoire des métiers pour modifier la fiche emploi-type « Assistant.e-Ingénieur.e – Chargé.e de communication ».

- Formatrice dans le cadre des séminaires organisés par l'ARCES (Association des Responsables de Communication de l'Enseignement Supérieur).

Véronique Criart

- Formatrice dans le domaine réglementaire GBCP (Gestion Budgétaire et Comptable Publique).
- Formatrice dans le cadre du dispositif du traitement dématérialisé de la dépense (SCTD).

Didier Laporte

- Membre élu de la commission régionale d'actions sociales de la délégation Paris Centre du CNRS.

- Membre élu de la commission régionale de la formation permanente de la délégation Paris Centre du CNRS.

Evelyne Mephane

- Présidente fondatrice du CRE-DAU - Réseau des Administrateur.trice.s de la DR2 du CNRS.
- Responsable de l'animation du groupe de réflexion sur la fonction d'Administrateur.trice au sein du CREDAU.
- Experte auprès de l'Observatoire des Métiers pour la relecture des profils de concours.

La formation permanente

La formation permanente est fortement corrélée aux orientations scientifiques du laboratoire et aux évolutions liées aux collaborations existantes et à des projets nouveaux. Elle répond aussi à la nécessité de maintenir et développer le haut niveau de compétences du laboratoire. Elle couvre les champs scientifiques et techniques des métiers mais aussi les domaines liés à l'organisation des projets, à la gestion des ressources humaines, à la sécurité. Les actions du CNRS et de l'IN2P3 permettent d'assurer la cohérence de la mise en œuvre de celles-ci. Les réseaux métiers permettent en complément de favoriser le partage de connaissances et d'expériences. D'autres formations sont directement liées à l'acquisition de nouveau matériel ou à des formations spécifiques à certains postes de travail.

Le recensement des besoins en formation des services, liés aux évolutions des projets et des techniques, est formalisé chaque année dans le plan de formation de l'unité. Il permet également d'accompagner les agent.e.s tout au long de leur carrière.

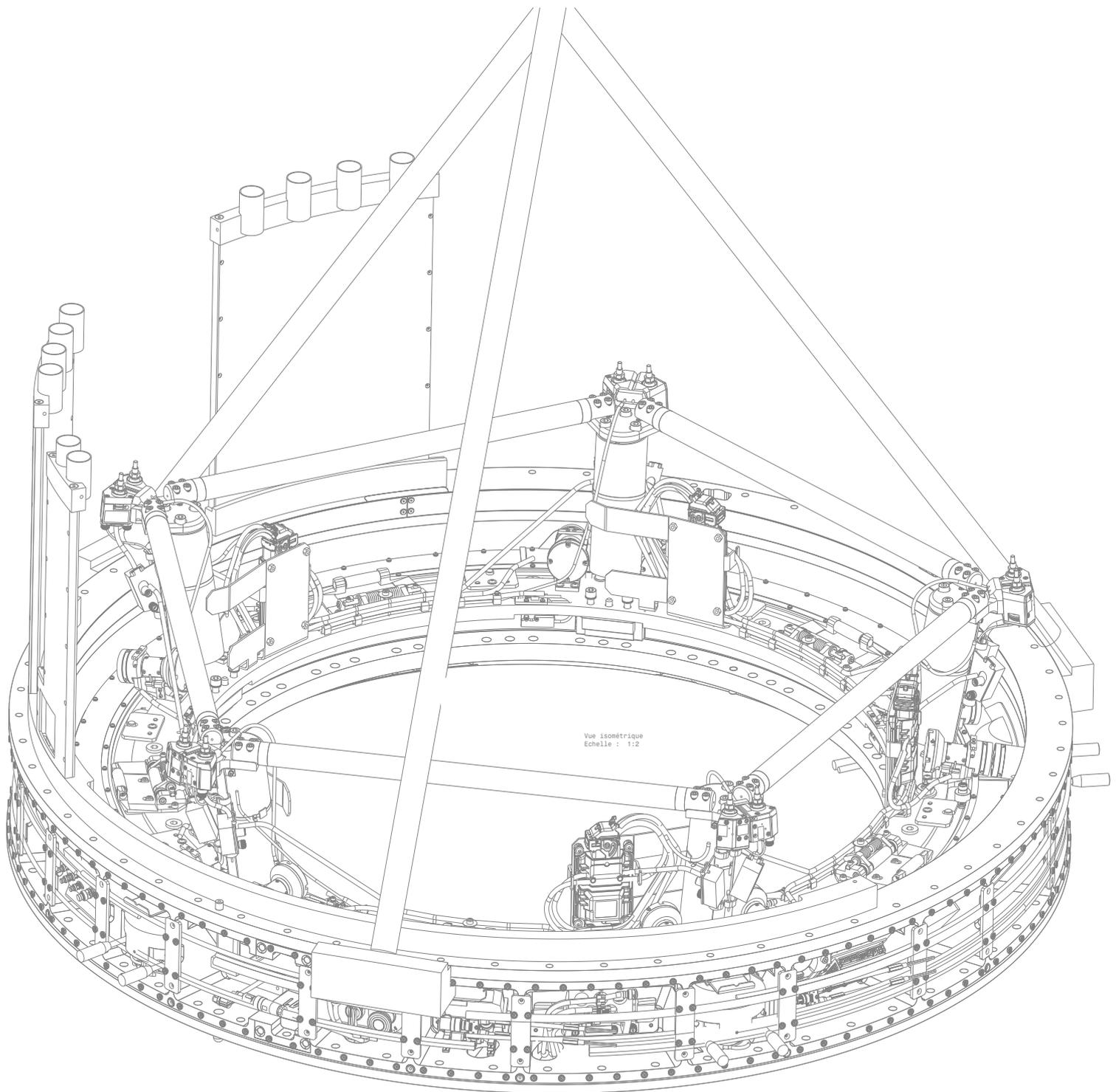
Entre juillet 2017 et juillet 2019, hors conférences et stages pour étudiant.e.s, 149 actions de formation ont été réalisées pour un total d'environ 400 jours. Une

quarantaine d'agent.e.s a suivi une formation chaque année, principalement des personnels ingénieurs, techniciens ou administratifs, mais aussi quelques chercheur.euse.s. Les formations dédiées à l'évolution des métiers sont prépondérantes. Celles concernant la sécurité sont obligatoires et prioritaires pour le laboratoire qui se doit de faire travailler son personnel dans des conditions de sécurité maximale. Dans un souci d'intégration, les personnels étrangers bénéficient d'un soutien à l'apprentissage de la langue française dès leur arrivée dans le laboratoire. L'autoformation des agent.e.s est importante, notamment grâce au *e-learning*. Enfin, les étudiant.e.s en thèse doivent suivre des formations dans le cadre de leurs écoles doctorales.

Certains membres du LPNHE sont par ailleurs intervenants dans des écoles thématiques ou organisateurs d'écoles ou de rencontres : les écoles IN2P3 « Du Détecteur à la Mesure » et « Rencontres de Moriond », l'école technologique « Fabrication Additive Métallique » et des formations en gestion financière pour les gestionnaires de la Direction Régionale Paris-Centre.

Correspondant formation :

Frédéric Derue



Vue isométrique
Echelle : 1:2

INDEX DES

A

ADC : *Analog Digital Converter*, convertisseur analogique numérique
AGILE : *Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero*, satellite italien pour l'astronomie X et gamma
AGN : *Active Galactic Nuclei*, noyaux actifs de galaxies
AIDA-2020 : *Advanced European Infrastructures for Detectors at Accelerators*, programme européen de soutien aux R&D détecteurs
ALP : *Axion Like Particle*
AMS : *Alpha Magnetic Spectrometer*, détecteur de rayons cosmiques installé sur la station spatiale internationale
ANR : Agence National de la Recherche
APC : Laboratoire Astroparticule et Cosmologie
ARIS : *Argon Response Ionization and Scintillation*
ASIC : *application-specific integrated circuit*, circuit intégré propre à une application
ATLAS : *A Toroidal LHC Apparatus*, un des 2 détecteurs généralistes du LHC
Auger : Observatoire Pierre Auger, installé en Argentine

B

BaBar : expérience dédiée à la physique des saveurs auprès de l'accélérateur électron-positron PEP-II à SLAC, aux États Unis
BAO : *Baryon Acoustic Oscillations*, oscillation acoustique des baryons. C'est l'empreinte des ondes de densité du plasma primordial encore visible aujourd'hui dans la distribution de la matière dans l'univers
Belle II : expérience auprès de l'accélérateur électron-positron SuperKEK au Japon, qui étudie les mésons B
BNL : *Brookhaven National Laboratory*, ou laboratoire national de Brookhaven aux États Unis

C

CALICE : *Calorimeter for Linear Collider Experiment*, calorimètre pour une expérience sur un collisionneur linéaire
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CCD : *Charge Coupled Device*, détecteur de lumière en silicium dont la surface de collection est divisée en pixels permettant de reconstruire des images
CCIN2P3 : Centre de Calcul de l'IN2P3
CEA/Irfu : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers
CERN : Conseil européen pour la recherche nucléaire à l'origine puis laboratoire européen pour la physique des particules, il s'agit de l'un des plus grands laboratoires scientifiques du monde
CFA : Centre de Formation d'Apprenti.e.s
Chip : circuit intégré
CKM : Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, du nom des trois physiciens qui ont décrit le mélange des quarks dans le modèle standard via la matrice qui porte désormais leurs noms
CMOS : *Complementary metal oxide semi-conductor*
CMS : *Compact Muon Solenoid*, un des 2 détecteurs généralistes du LHC
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CODEX-B : *Compact Detector for Exotics at LHCb*, expérience proposée pour rechercher des particules à longue durée de vie
COMET : *Coherent Muon to Electron Transition*, est une expérience au Japon qui a l'ambition d'observer la transition cohérente d'un muon en électron
CP : Charge-Parité
CTA : *Cherenkov Telescope Array*, futur observatoire pour l'astronomie gamma au Chili et aux Iles Canaries

D

DAMIC-M : *DARk Matter In CCD in Modane*
DAMIC : *DARk Matter In CCD*
DarkSide : expérience de recherche de matière noire avec un détecteur à argon liquide installé au Gran Sasso
DARWIN : *DARk matter WImp search with liquid xenoN*
DATI : appareils permettant la surveillance du personnel en situation isolée
DELPHI : *DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification*, une des expériences au LEP, le grand collisionneur d'électrons et positrons
DESC : *Dark Energy Science Collaboration*
DESI : *Dark Energy Spectroscopic Instrument*, instrument spectroscopique multi-objet de nouvelle génération, successeur de SDSS, qui conduira le futur grand relevé de la distribution de matière dans l'univers depuis le télescope Mayall de 4m en Arizona
DESY : *Deutsches Elektronen-Synchrotron*, centre de recherche allemand en physique des particules
DLA : *Damped Lyman alpha systems*
DR : Direction Régionale du CNRS

E

eBOSS/BOSS : *Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*, grand relevé spectroscopique des quasars et des galaxies dans l'univers conduit sur le télescope SDSS (et son extension)
EDM : *Electric Dipole Moment*, moment dipolaire électrique
ERC : *European Research Council*, Conseil Européen de la Recherche
ESPCI Paris : École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris
ETP : Equivalent Temps Plein

F

FCC : *Future Circular Collider*, futur collisionneur circulaire au CERN
FERMI : *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, satellite de la NASA pour l'astronomie gamma
FPGA : *Field Programmable Gate Array*, circuit logique programmable
FRIF : Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales

G

g-2/EDM : expérience en projet au J-PARC au Japon
GPU : *Graphics Processing Unit*, ou processeur graphique.
GRAND : *Giant Radio Array for Neutrino Detection*, réseau géant d'antennes radio pour la détection des neutrinos
GRB : *Gamma-Ray Burst*, sursaut gamma

H

H.E.S.S. : *The High Energy Stereoscopic System*, observatoire pour l'astronomie gamma installé en Namibie
HCD : *High Column Density*
HGTD : *High Granularity Timing Detector*, nouveau sous détecteur d'ATLAS
HK : Hyper-Kamiokande
HL-LHC : *High Luminosity-LHC*, phase de fonctionnement du LHC à haute luminosité
HLS : *Hidden Local Symmetry*, modèle de symétrie locale cachée
HPC : *High Performance Computing*, calcul haute performance

ACRONYMES

I

IA : Intelligence Artificielle
IAP : Institut d'Astrophysique de Paris
IceCube : *South Pole Neutrino Observatory*, observatoire neutrino au Pôle Sud
IHEP : *Institute of High Energy Physics*, un centre de recherche de la Chinese Academy of Sciences à Beijing (Chine)
IJCLab : Irène Joliot Curie Lab, ex LAL, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
ILC : *International Linear Collider*, projet international de collisionneur linéaire
ILD : *International Large Detector*, projet de détecteur pour le collisionneur linéaire
ILP : Institut Lagrange de Paris
INSPE : Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation
IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
IRAP : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie à Toulouse
ISCD : Institut des Sciences du Calcul et des Données
ITA : au CNRS personnels Ingénieurs Techniciens Administratifs
ITASS : à l'université personnels Ingénieurs Techniciens Administratifs Sociaux et de Santé
ITk : *Inner Tracker*, le nouveau trajectographe interne d'ATLAS

J

J-PARC : *Japan Proton Accelerator Research Complex*, complexe japonais d'accélérateurs de protons, à Tokai au Japon

L

Labex : Laboratoire d'excellence Institut Lagrange de Paris
LGAD : *Low Gain Avalanche Detector*, détecteur à avalanche de faible gain
LHC : *Large Hadron Collider*, il s'agit du plus puissant accélérateur au monde, il a démarré en 2008.
LHCb : *The Large Hadron Collider beauty*, un des 4 détecteurs du LHC, dédié à la physique du quark b.
LIGO : *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser aux États-Unis
LIP6 : Laboratoire de recherche en informatique de Sorbonne Université
LLR : Laboratoire Leprince Ringuet
LPNHE : Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies
LPTHE : Laboratoire de Physique Théorique des Hautes Énergies
LSM : Laboratoire Souterrain de Modane
LSST : *Large Synoptic Survey Telescope*, futur grand relevé photométrique qui sera conduit au Vera Rubin Observatory par un télescope de 8m en construction au Chili

M

MAGIC : *Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes*, observatoire d'astronomie gamma installé aux Canaries
MEG : *Muon to Electron plus Gamma*, expérience installée au Paul Scherrer Institut à Zurich

N

NA61/SHINE : expérience de hadroproduction au CERN
ND280 : c'est le détecteur proche (*Near Detector*) qui mesure le flux de neutrino dans T2K
NIST : *National Institute of Standards and Technology*, Institut des standards américain

O

OPC UA : *OPC Unified Architecture*, il s'agit d'un protocole de communication de machine à machine développé par la société *OPC Foundation (Object Linking and Embedding for Process Control Foundation)*

P

PCB : *Printed Circuit Board*
PMT : *Photo-Multiplier Tube*, photodétecteur
PUMA : avis de publicité pour les marches à procédure adaptée

R

R&D : Recherche et Développement
RAM : *Random Access Memory*, mémoire à accès aléatoire
RICH : *Ring-Imaging Cherenkov detector*, un détecteur qui identifie la nature des particules chargées sur la base de leur impulsion et des caractéristiques de la lumière Tchérénkov émise
RTA : *Real Time Analysis*, analyse en temps réel.

S

SciFi : *Scintillating Fibre Tracker*, trajectographe à fibres scintillantes
SDSS : *Sloan Digital Sky Survey*, premier grand relevé photométrique et spectroscopique du ciel de l'hémisphère nord conduit par le télescope de 2.5m SDDS à l'observatoire du mont Apache depuis les années 2000
SDSS-DR : *Sloan Digital Sky Survey-Data Release*
SK : Super-Kamiokande
SLAC : *Stanford Linear Accelerator Center*, Centre de l'Accélérateur Linéaire de Stanford
SNOLAB : *Sudbury Neutrino Observatory Lab*, observatoire neutrino souterrain installé à Sudbury au Canada
SSP : *Subaru Strategic Program*, c'est le grand relevé photométrique conduit avec l'instrument HSC sur le télescope Subaru de 8m de diamètre à Hawaii, et dont la composante profonde détecte des Supernovae à très grande distance
StarDICE : système de calibration photométrique pour LSST
SU : Sorbonne Université
Subaru : télescope japonais installé à Hawaii

T

T2K : le nom de cette expérience de neutrino au Japon, Tokai to Kamioka, rappelle le parcours de neutrinos entre leur lieu de production et leur point de détection.
T2K-II : phase II de l'expérience T2K
TGIR : Très Grandes Infrastructures de Recherche
TPC : *Time Projection Chamber*, ou chambre à projection temporelle.
TREND : *TianShan Radio Array for Neutrino Detection*

U

UP : Université de Paris

V

VERITAS : *Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System*, observatoire d'astronomie gamma installé aux États-Unis
VHDL : *VHSIC Hardware Description Language*
VIRGO : détecteur d'ondes gravitationnelles européen, installé en Italie

W

WEAVE : Instrument spectroscopique multi-objet installé sur le télescope William Herschel de 4.2m aux îles Canaries
WIMP : *Weakly Interactive Massive Particle*

X

XENON : *XENON Dark Matter Search Experiment*, expérience de recherche de matière noire à base de xénon liquide, installée au Gran Sasso

Λ

ΛCDM : Modèle standard de la cosmologie, qui décrit l'univers actuel dominé par une constante cosmologique (Λ) et la matière noire froide (CDM)

Directeur de la publication

Marco Zito

Coordination éditoriale

Mélissa Ridel

Comité de rédaction

*Tristan Beau, Marc Bétoule, Julien Bolmont, Isabelle Cossin,
Olivier Dadoun, Romain Gaior, Francesco Polci,
Mélissa Ridel, Marco Zito*

Remerciements à

*Julien Bolmont, Didier Lacour, Jacques Dumarchez,
Vera de Sá-Varanda*

Conception graphique

Jean-Jacques Daigremont

Crédits photos

*Couverture : Vera C. Rubin Observatory/NSF/AURA ; CERN ;
collaborations ATLAS, CALICE, CHAMP, CTA, DAMIC, DESI,
GRAND, H.E.S.S., LHCb, LSST, StarDICE, T2K, TREND,
XENON ; Florian Beaudette, Isabelle Cossin, Frédéric Derue,
Vera de Sá-Varanda, Pierre Kitmacher, Laurence Marquet,
Mélissa Ridel, Marco Zito ; photothèque des laboratoires de
l'IN2P3 : LPNHE (Vera de Sá-Varanda)*

Crédits dessins

*Kévin Biernacki
Eve Barlier
Didier Laporte*

Publié par

Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies.

Ce document est consultable sur le site du laboratoire :

<http://lpnhe.in2p3.fr>

Impression

COPYMÉDIA

Parc activité du Courmeau

33610 Canejan

2^{ème} trimestre 2019

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2017
2019

LPNHE PARIS

Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies
4, place Jussieu • 75252 Paris Cedex 05
Tél. : 33 (1) 44 27 63 13 • Fax : 33 (1) 44 27 46 38
<http://lpnhe.in2p3.fr>

