

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2020•2021

LPNHE

PARIS

1971•2021

50
ans

2020•2021

RAPPORT D'ACTIVITÉ



1971-2021 : cette année le LPNHE a fêté son 50^{ème} anniversaire ! Ces cinq décennies ont été jalonnées d'avancées majeures dans notre discipline, avec une contribution significative des équipes du laboratoire. A l'occasion des célébrations, nous avons pu faire le point avec nos tutelles universitaires et avec l'IN2P3, qui fêtait aussi ses 50 ans avec nous, sur ces recherches de pointe dans la physique des deux infinis, de l'infiniment grand (cosmologie, astroparticules) à l'infiniment petit (physique des particules élémentaires, symétries fondamentales). Fidèle à cette mission d'exploration des frontières de la connaissance, faite de recherches et d'exploits techniques, le LPNHE est fier de son bilan de ce demi-siècle, mais aussi en particulier de son bilan de ces deux années que nous présentons dans ce document.

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 récemment découvert 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 puissante 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.

Le laboratoire compte environ 50 chercheurs et enseignants-chercheurs, et une quarantaine de doctorants, post-doctorants, chercheurs émérites et bénévoles. L'équipe technique est forte d'une quarantaine de personnes et est structurée en services techniques et administratifs. Le laboratoire 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 l'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 à l'Initiative Physique des deux Infinis de Sorbonne Université et à la Fédération de Recherche sur les Interactions Fondamentales. Cela a permis des collaborations fructueuses avec en particulier, le LPTHE et l'IAP mais aussi le LIP6.

Les deux années 2020-2021 ont été, bien sûr, celles de l'épidémie de la COVID-19. Heureusement le personnel du laboratoire n'a quasiment pas été impacté par le virus. En revanche les activités ont été ralenties, notamment à cause des périodes de confinement, ainsi que des longs mois où l'accès au laboratoire était très restreint. Le personnel a su s'adapter de façon remarquable à cette situation. Tout le monde s'est mis au télétravail, certains bancs de test ont été déplacés pour les rendre plus accessibles, un système de visioconférences avec des réunions des services, des projets, des groupes de recherche, a été mis en place. Signalons en particulier la réunion du vendredi, réunion qui a pour vocation de rassembler tous les personnels, qui a dépassé régulièrement les 90 participants connectés. Un suivi régulier avec les étudiants en thèse a permis de les aider dans leurs parcours de formation par la recherche.

Sans doute la réalisation la plus marquante de ces trois dernières années est 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 utilise la plus grande caméra CCD jamais réalisée (3,2 milliards de pixels). La conception et construction du changeur des filtres 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 (Etats-Unis) avant son exploitation au Chili. Ces exploits techniques ont été récompensés par l'attribution de deux prix Cristal du CNRS, en 2020 et en 2021 : l'un pour Claire Juramy-Gilles, l'autre pour l'équipe LSST-France de l'IN2P3, dont quatre personnes du laboratoire. 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 à celui de LSST. DESI a été mis en fonctionnement au début de 2020 et a déjà effectué sa première campagne de prise de données de très grande qualité. Le laboratoire a aussi démarré une participation à l'observatoire ZTF-II qui pourra donner des contraintes fortes sur la cosmologie par l'observation de l'Univers proche. Grâce à ces 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 réseau de télescopes 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 deux sites dans les deux hémisphères. Ce programme explore la production 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 prospective, sur la base d'une proposition émanant d'un des membres du laboratoire, le laboratoire accélère dans 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. Ce projet peut désormais bénéficier du soutien de IPI et de l'ANR et a fait l'objet d'une recommandation positive du Conseil Scientifique du laboratoire.

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 (LSM). L'équipe s'apprête à déployer en 2022 un premier détecteur prototype appelé Low Background Chamber (chambre à bas bruit de fond) au LSM. 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 attendre plusieurs tonnes de masse fiducielle. XENON-nT a démarré sa prise de données en 2021. En parallèle, le laboratoire démarre une activité de R&T fortement soutenue par l'IN2P3, avec un système cryogénique Xelab situé dans nos locaux. 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 est active dans une jouvence du détecteur qui permettra d'en améliorer les performances. Elle a notamment pris la direction du projet Real Time Analysis, 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 en temps réel 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. 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 signerait 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'à 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 phase finale de construction, vont être déployés au Japon en 2022 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'horloges 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 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 de 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 micro-câblage. C'est un projet majeur pour le laboratoire en terme de mise en œuvre des connaissances scientifiques et techniques et d'implication des ressources humaines. Un deuxième projet, HGTD, vise à l'amélioration des performances du calorimètre, notamment en permettant de rejeter les particules provenant d'interactions parasites. La réussite de ces deux projets permettra aux étudiants, aux postdoctorants et aux jeunes chercheurs de se former aux techniques 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 détecteurs de haute technologie est désormais accompagnée par des études sur le potentiel de physique du 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 à explorer le domaine des hautes énergies, un ordre de grandeur au-delà de l'énergie de LHC.

Toute recherche expérimentale est basée sur la conception puis la construction de dispositifs de détection à la pointe de la technologie. Les équipes techniques du laboratoire, dont l'expertise est reconnue, pourront bénéficier d'infrastructures renouvelées et performantes : une nouvelle imprimante 3D, un réseau informatique à haut débit, une nouvelle salle blanche et bien d'autres. Grâce au soutien de la région Ile-de-France par un contrat Sesame nous serons équipés d'une nouvelle machine de test sous pointes pour la filière des détecteurs semi-conducteurs, qui sera aussi disponible, au sein d'une nouvelle plateforme CLAP, aux autres laboratoires du périmètre.

Dans un contexte de la recherche française qui est en forte évolution, le laboratoire a su garder une forte attractivité. En sont les preuves le grand nombre de stagiaires, d'étudiants et de visiteurs accueillis chaque année, le nombre, la diversité et l'excellence des projets scientifiques et techniques, les résultats obtenus, mais aussi la forte implication des enseignants-chercheurs dans le tissu universitaire à tous les niveaux, des licences aux masters et à l'école doctorale.

Je remercie sincèrement l'ensemble du personnel du laboratoire pour ces succès, et en particulier tous ceux qui ont participé à la rédaction de ce rapport d'activité. Une mention spéciale est à décerner à Mélissa Ridet 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 10

Cosmologie observationnelle 12

Rayonnements cosmiques
et matière noire 24

Asymétrie matière-antimatière 40

Masses et interactions fondamentales .. 54

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS
ET RESPONSABILITÉS 72

CHRONOLOGIE DES 50 ANS DU LPNHE
PREMIÈRE PARTIE 77

ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
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 89

Les stages au LPNHE 90

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

CHRONOLOGIE DES 50 ANS DU LPNHE
DEUXIÈME PARTIE 93

ORGANISATION DU LABORATOIRE 96

Services techniques 98

Plateaux techniques 103

Supports 107

Feuille de route sur l'intelligence
artificielle 118

Organigramme 119

Personnels au laboratoire
au 31/12/2021 120

VIE DU LABORATOIRE 122

2021 : le LPNHE fête ses 50 ans ! 124

Le LPNHE au temps de la pandémie
de COVID-19 126

Partenariats scientifiques 130

Vers un bilan des gaz à effet de serre
du LPNHE avec les outils de
Labos1point5 131

Animation scientifique 132

La formation permanente 135

CHRONOLOGIE DES 50 ANS DU LPNHE
TROISIÈME PARTIE 136

INDEX DES ACRONYMES 138

2020

JANVIER

LSST - Le changeur de filtres de la caméra LSST a été assemblé et testé par des équipes françaises, après un voyage du LPNHE à SLAC en Californie.

FÉVRIER

H.E.S.S. - La cinquième caméra de l'expérience H.E.S.S. d'astronomie gamma au sol construite au LPNHE a été désinstallée après 7 ans de fonctionnement.



16 MARS

LPNHE - Sorbonne Université déclenche un plan de continuité d'activités (PCA) à la veille du premier confinement dû à l'épidémie de COVID-19.

17 MARS

Début du premier confinement qui durera jusqu'au 11 mai 2020.

AVRIL

T2K - Nature publie une contrainte à 3 sigmas sur la phase de violation de la symétrie CP dans les oscillations de neutrinos par la collaboration T2K.

HK - Lancement de la construction de l'expérience Hyper-Kamiokande au Japon.

7 MAI

LPNHE - Sorbonne Université déclenche un deuxième PCA.

8 MAI

DESI - Observatoire au sol DESI, la 1^{ère} expérience de quatrième génération pour la mesure de l'énergie noire a achevé sa construction.

JUIN

Publication du compte-rendu de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules.

LHCb - La collaboration LHCb utilisera le premier système complet de déclenchement à haut débit, basé sur GPU dans le Run 3 du LHC; les premières prises de données avec ce nouveau déclenchement, pour lequel le LPNHE est très impliqué, ont eu lieu en octobre 2021.

XENON - La collaboration XENON a annoncé que les données de XENON1T montrent un excès d'événements dont la signature est similaire à ce qui pourrait résulter d'une petite quantité résiduelle de tritium.

LSST - Claire Juramy-Gilles est lauréate de la médaille de cristal du CNRS.



LPNHE - Sorbonne Université déclenche un troisième PCA; il n'y aura plus de nouveau PCA uniquement des évolutions du PCA 3 (en décembre 2020 et mai 2021).

JUILLET

ATLAS - ATLAS publie la limite la plus contraignante sur la recherche de matière noire d'une expérience sur collisionneur.

LPNHE - Publication du rapport d'activité 2017-2019 du LPNHE.

3 AOÛT

ATLAS - ATLAS et CMS annoncent les premières indications de l'observation de la désintégration du boson de Higgs en paire de muons, un processus très rare.

SEPTEMBRE

LSST - Des images d'une résolution de 3,2 milliards de pixels ont été prises grâce à un plan focal géant équipé de 189 capteurs photographiques CCD; ce plan focal sera au cœur de la caméra de l'Observatoire Vera C. Rubin (LSST), la plus grande au monde.

17 SEPTEMBRE

ATLAS - Le projet de détecteur de temps hautement granulaire, HGTD, pour le détecteur ATLAS a été approuvé par le CERN Research Board.



30 OCTOBRE

Début du deuxième confinement qui durera jusqu'au 15 décembre 2020.

NOVEMBRE

LPNHE - Le conseil scientifique du LPNHE, dont le président est dorénavant élu, approuve la participation du laboratoire à 2 nouvelles expériences, ZTF, un télescope pour des mesures cosmologiques de grande précision, et FCC, le projet d'un collisionneur circulaire au CERN.

T2K - Approbation du projet T2K-II, une prise de données de 4 mois par an entre 2022 et 2027 est attendue.

DÉCEMBRE

DAMIC - Record mondial par DAMIC @ SNOLAB de la mesure de la contamination radioactive au cœur des détecteurs en silicium; la publication du résultat sera pour le mois d'octobre suivant.



DAMIC - Publication de limites sur la recherche de particules WIMPS légères.

2021

FÉVRIER

AUGER - L'observatoire international Pierre Auger a publié les données de plus de 20 000 rayons cosmiques de haute énergie dans le cadre de sa politique de science ouverte soit 10% de ses données.

MARS

LHCb - La collaboration LHCb publie des résultats laissant entrevoir une possible déviation d'une prédiction du Modèle Standard: l'universalité de la saveur leptonique.

LPNHE - Les membres du programme européen AIDAInnova reçoivent dix millions d'euros, dont 850 k€ pour l'IN2P3 dans le cadre du programme européen AIDAInnova.

XENONnT - Première prise de données de XENONnT.

3 AVRIL

Début du troisième confinement qui durera jusqu'au 3 mai 2021.

7 AVRIL

Premier résultat de l'expérience « Muon g-2 » de Fermilab, qui mesure le moment magnétique du muon.

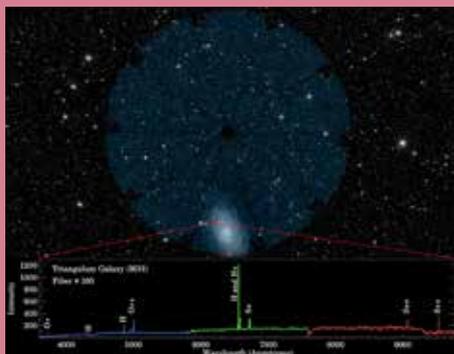
12 AU 15 AVRIL

Université de Paris* - Les élections des représentant.e.s aux conseils centraux et facultaires ainsi qu'aux conseils de gestion de composantes internes ont lieu à l'Université de Paris*; un nouveau directeur de UFR de physique, Atef Asnacios, prend ses fonctions au 1^{er} juin.

MARQUANTS

17 MAI

DESI - La collaboration DESI commence un relevé spectroscopique de 5 ans avec l'observation de plus de 30 millions de spectres de galaxies et de quasars.



20 MAI

Sorbonne Université - Inauguration de l'Initiative Physique des Infinis de Sorbonne Université.

MAI

COMET - La collaboration COMET a achevé un test d'accélération et d'extraction de faisceau à 8 GeV.



JUIN

LSST - 4 membres du LPNHE lauréats d'un cristal collectif du CNRS de 12 personnes: Véronique Criart, Guillaume Daubard, Claire Juramy-Gilles et Didier Laporte.

22 JUIN

LPNHE - Journée anniversaire des 50 ans de l'IN2P3 et du LPNHE.



JUIN

H.E.S.S. - La revue Science publie l'analyse par la collaboration H.E.S.S. de l'enregistrement d'une explosion cosmique parmi les plus brillantes jamais observées dans l'Univers en date du 29 août 2019.

JUILLET

XENON - Les collaborations XENON/DARWIN et LUX-ZEPLIN se fédèrent pour travailler ensemble à la construction du détecteur de matière noire de prochaine génération.

ATLAS - Le LPNHE officiellement qualifié pour la production des modules d'ITK.

LHCb - LHCb découvre le premier tetraquark doublement charmé, le Tcc+

AOUT

CTA - Approbation de la 1^{ère} phase de construction de l'observatoire CTA; le modèle de qualification de la caméra NectarCAM est intégralement équipé.



SEPTEMBRE

Rentrée universitaire avec masques et gestes barrières mais en présence; fin du télétravail dit « COVID-19 », le télétravail se fait uniquement dans le cadre fixé par un protocole national.

LHCb - La moitié du nouveau trajectographe à fibres scintillantes (SciFi) pour la jouvence du détecteur LHCb est installée.

16 SEPTEMBRE

LPNHE - Journée de fête pour l'anniversaire des 50 ans du LPNHE.

7 AU 9 OCTOBRE

LPNHE - La fête de la science a lieu au LPNHE et sur le campus après l'annulation de l'édition 2020.



19 OCTOBRE

LHC - Les premiers faisceaux pilotes ont circulé dans le LHC; un retard dans le redémarrage du LHC pour le Run 3 est annoncé; un secteur de l'accélérateur doit être réchauffé pour réparation.

16 ET 17 NOVEMBRE

Sorbonne Université - Les élections universitaires et facultaires ont lieu à Sorbonne Université; les directions des UFR ont été renouvelées dès octobre 2019 et les élections aux conseils de gestion de composantes internes se dérouleront en mars 2022.

NOVEMBRE

DarkSide - Le feu vert est donné pour la production de masse des photomultiplicateurs silicium devant équiper le détecteur DarkSide-20k.

GRAND - Le déploiement des premières antennes de GRANDProto300 commence; le 30 novembre, la participation du LPNHE à GRAND est approuvée par le conseil scientifique du LPNHE.



10 DÉCEMBRE

Retour de la possibilité de télétravailler jusqu'à 3 jours par semaine en raison de la situation épidémique.

14 DÉCEMBRE

Sorbonne Université - Élection de la nouvelle présidente de Sorbonne Université, Mme Nathalie Drach-Temam.

16 DÉCEMBRE

Sorbonne Université - Élection du doyen de la Faculté des Sciences et Ingénierie de Sorbonne Université, M. Stéphane Régnier.

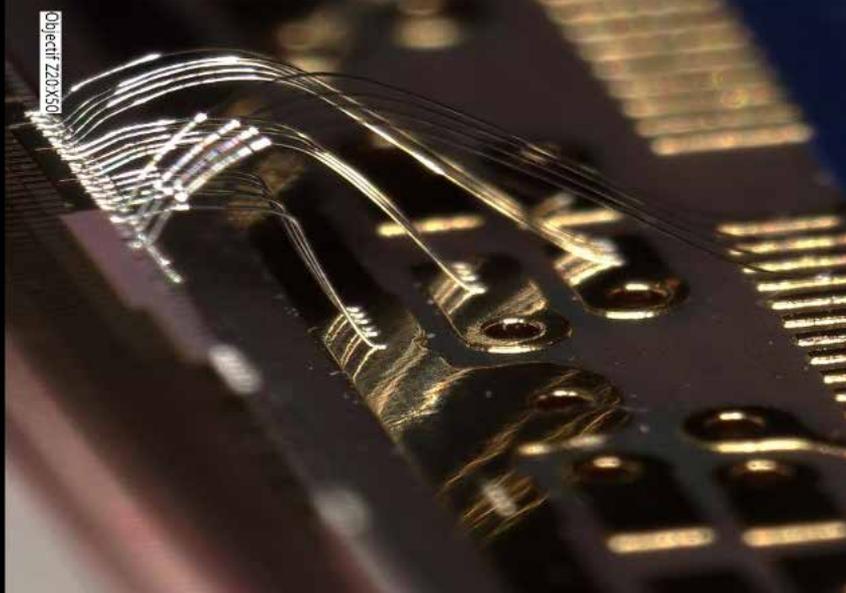


29 DÉCEMBRE

Université de Paris* - Le conseil d'état annule le décret de création de l'Université de Paris en raison du nom retenu pour l'établissement.

* Suite à la décision du conseil d'état du 29 décembre 2021, annulant la dénomination Université de Paris, toutes les mentions Université de Paris de ce rapport d'activité se réfèrent à la nouvelle dénomination Université Paris Cité – Décret N°2022-327 du 4 mars 2022.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES



ET TECHNIQUES

Cosmologie observationnelle	12	Asymétrie matière-antimatière	40
■ Théorie de la formation des structures cosmologiques	14	■ LHCb : Physique des saveurs lourdes au LHC	42
■ Mesure des oscillations acoustiques de baryons dans la fonction de structure de la matière	14	• L'expérience LHCb et sa jouvence	42
• eBOSS	15	• Analyse de physique et fonctionnement de l'expérience	42
• DESI	16	• Le trajectographe à fibres scintillantes (SciFi) pour la jouvence de LHCb	44
■ Extension du diagramme de Hubble avec Subaru, <i>Hubble</i> et ZTF	17	• Le projet d'analyse en temps réel (RTA) pour la jouvence de LHCb	45
• SNe distantes avec Subaru et HST	18	■ Une nouvelle ère de précision en physique des neutrinos : de T2K à HK	46
• SNe proches avec la <i>Zwicky Transient Facility</i>	19	■ Recherche d'un signal de physique au-delà du Modèle Standard avec COMET	50
• Modélisation empirique des SNe Ia	20	■ Phénoménologie et Modélisation en Physique des Particules	52
■ Préparation des futurs grands relevés énergie noire	20	• Le moment magnétique anormal du muon a_μ	52
• Étalonage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP	20	• Physique hadronique	53
• Mesure du cisaillement gravitationnel	20	Masses et interactions fondamentales	54
• Réalisations techniques :	21	■ Physique du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du Modèle Standard	57
- Le système de changeur de filtres de LSST	21	• Mieux connaître le boson de Higgs: mesures de ses propriétés	57
- Mise en service du plan focal de LSST	22	• Recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard	59
- Banc d'étalonnage détecteurs de StarDICE	22	■ Physique du quark top dans l'expérience ATLAS	60
- Développement et étalonnage de l'étoile artificielle StarDICE	23	■ Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans l'expérience ATLAS	61
- Télescope StarDICE	23	■ Jouvence du détecteur ATLAS	62
■ Mise en place de la construction à grande échelle du futur observatoire gamma de très hautes énergies CTA	26	• R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération (ITk)	62
■ Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec l'expérience H.E.S.S.	29	- Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk	64
• Instrumentation, développement des logiciels d'analyse et simulation	29	- Une solution innovante pour le système de refroidissement : les micro-canaux	64
• Études astrophysiques des sources extragalactiques	30	- Les puces électroniques frontales pour l'ITk	66
• Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux sources	31	• HGTD : un détecteur hautement granulaire de mesure du temps de vol des particules	67
• Impact limité de la situation sanitaire	32	■ Perspectives en physique des particules	69
■ En attendant GRANDProto300	32	• FCC - Groupe d'étude sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs	69
■ Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON	34	• Conception des détecteurs pour les futurs accélérateurs e^+e^- : le programme de R&D Calice	70
• Détecteur	34		
• Calcul et traitement des données	35		
• Analyse	35		
• Futurs projets	35		
■ Du secteur sombre au WIMP léger, recherche de matière noire avec le détecteur DAMIC-M et la chambre bas bruit (LBC)	36		
• Organisation	36		
• Les projets	36		
• Développements techniques	38		
■ A la recherche de WIMPs avec l'expérience DarkSide	39		

Cosmologie observationnelle

- Théorie de la formation des structures cosmologiques
- Mesure des oscillations acoustiques de baryons dans la fonction de structure de la matière
 - eBOSS
 - DESI
- Extension du diagramme de Hubble avec Subaru, *Hubble* et ZTF
 - SNe distantes avec Subaru et HST
 - SNe proches avec la *Zwicky Transient Facility*
 - Modélisation empirique des SNe Ia
- Préparation des futurs grands relevés énergie noire
 - Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP
 - Mesure du cisaillement gravitationnel
 - Réalisations techniques :
 - Le système de changeur de filtres de LSST
 - Mise en service du plan focal de LSST
 - Banc d'étalonnage détecteurs de StarDICE
 - Développement et étalonnage de l'étoile artificielle StarDICE
 - Télescope StarDICE

Cosmologie observationnelle



Le groupe de cosmologie du laboratoire (photo ci-dessus) est impliqué dans la production de contraintes sur les paramètres cosmologiques de notre univers, 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 une mystérieuse composante, l'énergie noire, dont on sait maintenant, grâce à une contribution significative de l'équipe, que sa densité d'énergie évolue ou lentement ou pas du tout avec le temps cosmique.

L'attribution de l'accélération à la présence d'énergie noire suppose que la relativité générale s'applique 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 tout-à-fait concevables. La relativité générale a récemment passé brillamment un test expérimental quand il a été possible de 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 d'utiliser des simulations numériques, dont les approximations et la validation sont un sujet d'étude à part entière, mené 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 les relevés SSP (supernovae distantes sur le puissant télescope Subaru) et ZTF (supernovae proches sur un instrument très grand champ), ainsi qu'à travers l'expérience StarDICE qui ambitionne d'améliorer l'étalonnage du flux des instruments photométriques et donc la précision de la mesure des distances de luminosité. L'implication dans la seconde prend place dans les relevés spectroscopiques eBOSS et DESI. Ces relevés permettent d'une part de contraindre l'histoire de l'expansion de l'univers en exploitant une distance caractéristique entre deux galaxies liée à la physique du plasma de l'univers primordial (les oscillations acoustiques de baryons) et d'autre part de contraindre la formation des structures en exploitant les "distorsions de *redshift*", 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

CHIFFRES CLEFS

4096³ corps dans des simulations de modèles *scale-free* tournées sur Summit, superordinateur le plus rapide du monde en 2020 pour la publication des limites de précision sur la distribution de la matière noire prédite dans des simulations à N corps

Mesure des oscillations acoustiques de baryons dans la fonction de structure de la matière

L'équipe BAO (pour *Baryon Acoustic Oscillations*) 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, figure ci-contre). Le signal que l'on cherche à mesurer est l'empreinte laissée par le gel d'ondes acoustiques de plasma primordiales. Cette empreinte est aujourd'hui observable à différents décalages spectraux (*redshifts*) dans la distribution des traceurs de la matière que sont les galaxies, les quasars ou encore les forêts Lyman-alpha des quasars. Elle 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).

Depuis octobre 2020, avec l'arrivée d'une nouvelle chargée de recherche dans l'équipe, le groupe poursuit et enrichit une activité amorcée, dans les données de eBOSS, par l'un de ses membres lors de la période précédente : la mesure de la croissance des structures sous l'action de la gravité pour contraindre les modèles de gravité et mieux comprendre la structuration de la matière dans l'Univers à l'échelle des galaxies.

Les activités de l'équipe sur la période 2020-2021 s'articulent selon deux axes principaux :

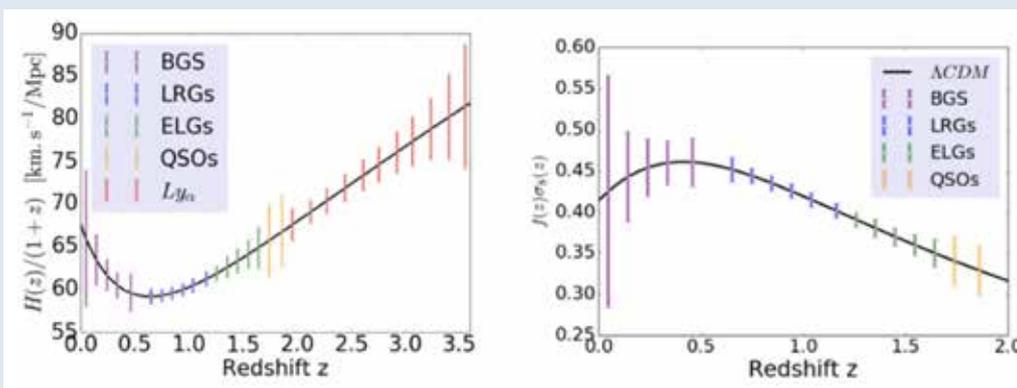
- Une activité d'analyse dans l'expérience eBOSS, centrée sur la mesure de la position du pic BAO dans la fonction d'auto-corrélation des forêts Lyman-alpha des quasars. L'équipe a participé à l'analyse finale des données de eBOSS de la release SDSS-DR16, ayant conduit à la mesure la plus précise à ce jour du taux d'expansion à un *redshift* effectif $z=2,33$.
- Une participation à la préparation des analyses de données de DESI, avec d'une part, l'adaptation et l'amélioration du code d'analyse Lyman-alpha développé dans le cadre d'eBOSS, et l'analyse de *mocks* permettant de mieux comprendre et de limiter les systématiques, et d'autre part, une contribution active au *Bright Galaxy Survey* (BGS), un

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 dans les données Lyman-alpha du SDSS en 2013, permet de sonder l'histoire de l'expansion à des *redshifts* de l'ordre de 2-2,5. La mesure effectuée en 2019 par le groupe à partir d'environ 200 000 spectres de quasars des données SDSS-DR14 a permis d'améliorer la précision sur la mesure des distances de Hubble et angulaire. Pour cette dernière, la précision est améliorée de 25 % par rapport à la précédente mesure datant de 2017. Sur la période 2021-2021, l'équipe a activement participé à l'analyse Lyman-alpha finale de l'expérience eBOSS publiée à l'été 2020, notamment à travers la compréhension et la réduction des erreurs systématiques associées à cette mesure, comme 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, la contamination par les métaux, la présence sur la ligne de visée des quasars de systèmes à haute densité de colonne (HCD) et de systèmes Lyman-alpha amortis (DLA).

Les mesures des distances de Hubble et angulaire comobile publiées sont à ce jour les plus précises à un *redshift* effectif $z=2,33$.

L'ensemble des analyses finales de l'expérience eBOSS ont été publiées à l'été 2020, et les membres de l'équipe du LPNHE en sont signataires. Les mesures SDSS-BAO couvrent une période de 11 Gyr de l'histoire de l'expansion cosmique et permettent de mesurer la courbure de l'Univers, l'énergie noire, la masse des neutrinos et le taux d'expansion local de Hubble, alors que les mesures des distorsions observées dans l'espace des *redshifts* (RSD) permettent d'explorer l'impact de la croissance des structures sur les modèles cosmologiques. Lorsqu'on combine les résultats des analyses BAO et RSD du SDSS (eBOSS et les expériences qui l'ont précédé) avec les contraintes sur le rayonnement de fond cosmologique (CMB) apportées par Planck, les supernovae de type Ia et les mesures du lentillage faible et de la structuration des galaxies de l'expérience DES, les modèles cosmologiques restent compatibles avec le modèle Λ CDM standard, et, quel que soit le modèle envisagé, la précision sur les paramètres cosmologiques W_L (paramètre de densité de constante cosmologique) et H_0 (paramètre de Hubble aujourd'hui) est de l'ordre de 1%. Un résultat important est que la valeur de H_0 extrapolée à partir des mesures de distances à grand *redshift* reste en tension avec les mesures obtenues par différentes déterminations directes.



Les prévisions sur la précision attendue avec les données de DESI collectées au bout de 5 ans d'observation pour le taux d'expansion de l'univers $H(z)$ à gauche et le taux de croissance des structures $f(z)$ à droite en fonction du *redshift* z pour les différents échantillons de galaxies et de quasars de DESI.

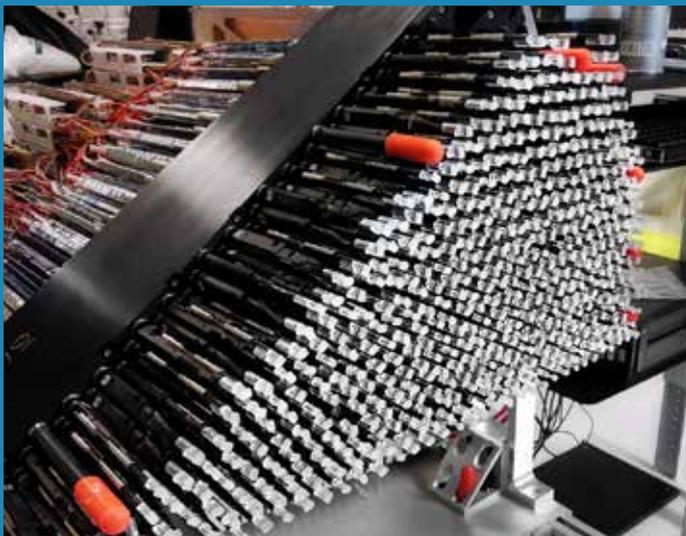
échantillon de galaxies proches qui permettra de mesurer le taux de croissance des structures dans le régime non-linéaire et ainsi de mieux contraindre la relativité générale et les modèles de gravité alternatifs.

Le groupe a par ailleurs activement participé à la phase de validation du relevé DESI au printemps 2021 en contribuant à l'analyse visuelle des spectres de galaxies et de

quasars acquis durant cette phase de quelques mois. Il participe également aux observations de DESI lors de « shifts » à distance depuis le laboratoire. Enfin, si l'activité R&D est achevée depuis 2019, l'équipe fournit l'équipement nécessaire à la maintenance du système de calibration spectroscopique au télescope pour la durée de l'expérience.

DESI

Le projet DESI au télescope Mayall (3,8 m de diamètre) à Kitt Peak en Arizona est un spectrographe multi-objet constitué d'un correcteur grand champ, un plan focal instrumenté de 5000 positionneurs automatiques de fibres (photo ci-dessous) et 10 spectrographes. Chacun d'eux réceptionne 500 fibres, dont la lumière est envoyée 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 micron. 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 eu lieu en octobre 2019 et la stratégie d'observation, la chaîne de réduction des données spectrales et les mesures de *redshift* ont été testées et leur mise au point raffinées lors de la phase de validation du relevé qui s'est déroulée au printemps 2021. Les premières données de science ont été obtenues mi-mai 2021, avec un retard d'environ 8 mois sur le planning prévu, du fait de la crise sanitaire COVID-19.



Un pétale durant l'assemblage du plan focal de DESI. Le plan focal de l'instrument DESI est constitué de 10 « pétalles » comprenant chacun 500 fibres connectées à des positionneurs permettant de viser avec précision les cibles sur le ciel.

L'équipe du LPNHE participe aux analyses DESI, d'une part par une contribution substantielle à l'élaboration du logiciel utilisé pour les analyses Lyman-alpha, d'autre part en pré-

parant les analyses Lyman-alpha et de structuration des galaxies de la première année de données. La contribution au logiciel se fait autour de deux éléments clefs : le premier est l'identification des quasars. Les cibles de quasars doivent être confirmées après le premier passage afin d'augmenter la pureté dans les passes suivantes. Cette identification se fera automatiquement en combinant les résultats de trois codes différents, RedRock, SQUEzE et QuasarNet, avec différentes approches. Les membres de l'équipe du LPNHE ont contribué à RedRock, ont développé QuasarNet,

ont adapté le code SQUEzE pour pouvoir fonctionner avec des données DESI, et travaillent à établir la combinaison optimale de ces codes. Le deuxième élément est le code d'analyse principal pour les mesures BAO utilisant les forêts Lyman-alpha. La collaboration eBOSS a développé le code PICCA comme outil principal pour cette analyse. PICCA sera également utilisé dans DESI, mais des changements substantiels sont nécessaires pour l'adapter à DESI. Ces changements sont coordonnés par le groupe de travail PICCA, animé par des membres de l'équipe. D'autre part, l'équipe du LPNHE poursuit son activité dans les analyses des forêts Lyman-alpha avec DESI afin de mesurer le BAO. Des catalogues fictifs, appelés « *mocks* », ont été développés par nos collaborateurs du CEA/Irfu qui génèrent des spectres de quasars avec continuum, bruit, présence de métaux et de systèmes à haute densité de colonne, afin d'imiter les données le plus précisément possible. L'équipe du LPNHE est impliqué dans le test et l'analyse de ces « *mocks* » pour identifier et diminuer les erreurs systématiques qui affectent la mesure du BAO dans le signal. Ces études ont par exemple permis de valider et d'améliorer l'utilisation d'une « matrice de distorsion » pour modéliser les distorsions des fonctions de corrélation introduites par la procédure d'extraction de l'information dans les données.

L'équipe du LPNHE, sous l'impulsion d'une nouvelle chargée de recherche qui a rejoint l'équipe à l'automne 2020, participe également à l'étude de la structuration des galaxies, avec une contribution significative au *Bright Galaxy Survey* (BGS) de DESI. Cette contribution inclut en particulier la caractérisation des propriétés de structuration des cibles BGS. D'autre part, la corrélation croisée avec des ensembles de données spectroscopiques externes est également étudiée afin d'extraire des informations sur la distribution des *redshifts* des cibles BGS. A terme, le LPNHE contribuera également aux analyses standards BAO et RSD avec cet échantillon de galaxies à bas *redshift* afin d'extraire des informations du régime non-linéaire où l'effet RSD est dominant. Cela permettra d'améliorer la mesure de la croissance des structures et donc les contraintes sur la relativité générale et les modèles alternatifs de gravité. Deux projets menés par l'équipe du LPNHE utilisant les données à un an du BGS de DESI ont déjà été annoncés : le développement d'une technique multi-traceurs permettant de réduire la variance cosmique dans l'échantillon BGS, et l'exploration de la structuration à petite échelle des galaxies à l'aide des RSD. De plus, l'équipe est impliquée dans la coordination des analyses de forme complète du spectre de toutes les cibles (des galaxies BGS aux quasars) de la première année de données de DESI, en vue de contraindre les paramètres cosmologiques.

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

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Guy Augarde,
Christophe Balland, Marc Betoule,
Sébastien Bongard, Delphine Hardin,
Leander Lacroix, Laurent Le Guillou,
Jérémy Neveu, Ignasi Pérez Ràfols,
Nicolas Regnault, Clare Saunders,
Julianna Stermer, Pierre-François Léget,
Thierry Souverin, Enya Van den Abeele,
Pauline Zarrouk, Ting Tan

Équipe technique :

Julien Coridian, Patrick Ghislain, Philippe Repain

CHIFFRES CLEFS

1^{ère} lumière le 22 octobre 2019 et début du relevé principal le 14 mai 2021

135 000 *redshifts* en une nuit le 4/11/2021 avec 5000 fibres optiques au foyer primaire du télescope Mayall équipées de robots positionneurs, **35** millions de cibles spectrées sur 5 ans et une mesure à **1%** du taux d'expansion jusqu'à $z=3,7$

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 comme indicateurs de distance qui a permis, au tournant du 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 *redshift* $0.05 < z < 1$ permet de contraindre l'équation d'état de l'énergie noire, tout particulièrement, les variations de cette équation d'état avec le *redshift*. 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 *redshift*) 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 *redshift* ($z < 0.1$), il est possible d'extraire de la corrélation spatiale des vitesses particulières des SNe Ia individuelles une mesure du taux de croissance des structures dans l'Univers proche. À plus haut *redshift*, 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.

Extension du diagramme de Hubble avec Subaru, Hubble et ZTF

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 SNe dans la gamme de *redshift* $0.05 < z < 1$. Pour améliorer les contraintes actuelles, la stratégie

la plus efficace consiste à étendre significativement la gamme en *redshift*. L'équipe a choisi de se concentrer sur deux zones actuellement sous-contraintes du diagramme de Hubble : à haut-*redshift* ($0.8 < z < 1.5$) la zone de transition entre expansion décélérée et accélérée, lorsque l'énergie noire a pris le pas sur la matière ; à très bas-*redshift* ($z < 0.1$), le régime d'expansion accélérée. Notre but est de contraindre ces deux régions avec des SN bénéficiant d'une qualité de suivi analogue à ce que nous avons réalisé avec SNLS.

SNe distantes avec Subaru et HST

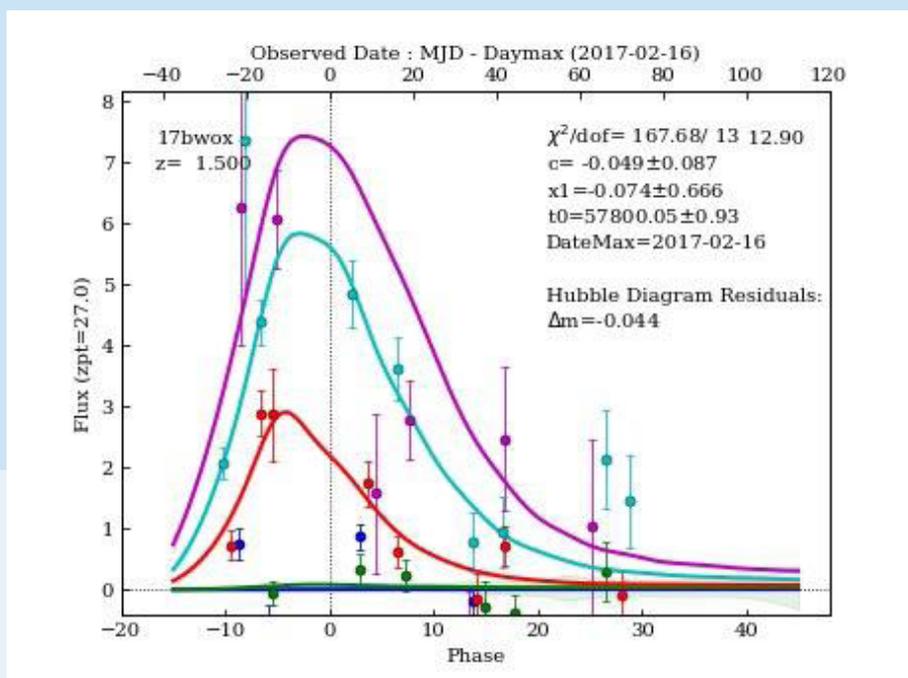
La clef de ce programme est l'imageur *HyperSuprimeCam* (HSC), installé depuis 2014 au foyer primaire du télescope Subaru de 8,2 m de diamètre. Le plan focal de HSC est équipé de CCD haute résistivité de 200 micromètres d'épaisseur, avec une efficacité supérieure à 95% au-delà de 600 nm. La combinaison Subaru/HSC dispose d'un pouvoir de collection dans le rouge et l'infrarouge proche près de dix fois supérieur à celui de *MegaCam*, l'imageur utilisé pour SNLS. Nous avons proposé, en collaboration avec N. Suzuki et N. Yasuda 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 SN dans le visible n'est détectable que dans l'infrarouge. Nous avons proposé, en collaboration avec N. Suzuki, N. Yasuda (Tokyo), D. Rubin (STScI and University of Hawaii) et S. Perlmutter (Berkeley), une stratégie consistant à adjoindre au suivi HSC, une visite unique réalisée avec l'instrument WFC3 monté sur le télescope spatial Hubble (HST). 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 économiques jamais réalisés. Une proposition a été soumise au HST en 2016, et acceptée.

La prise de données a démarré en 2016 et s'est achevée en 2020. Elle a permis de collecter, en deux saisons d'observation, de l'ordre de 500 SNe. La qualité des courbes de lumière est remarquable, en dépit de conditions météorologiques souvent défavorables, confirmant le pouvoir de collection inégalé de l'instrument HSC. 50 supernovae très distantes ($z > 1.1$) ont été observées avec le télescope spatial HST, ouvrant la voie à une extension à très haut *redshift* ($1.1 < z < 1.4$) du diagramme de Hubble (figure ci-dessous).

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 *redshifts* d'un sous-ensemble des cibles, via du temps sur VLT/FORS2 obtenu en 2016, 2018 et 2019. Pour la mesure des distances, les trois ingrédients critiques sont (1) un pipeline 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 et (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, un pipeline de photométrie dérivé de celui qui avait été développé pour SNLS. Ce code est quasi-optimal statistiquement et il a été montré, sur les données *MegaCam*, qu'il présente des biais inférieurs à 0.1%. Concernant la calibration photométrique, 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 appuyons à terme sur la comparaison entre calibration HST et calibration instrumentale réalisée par l'expérience dédiée StarDICE.



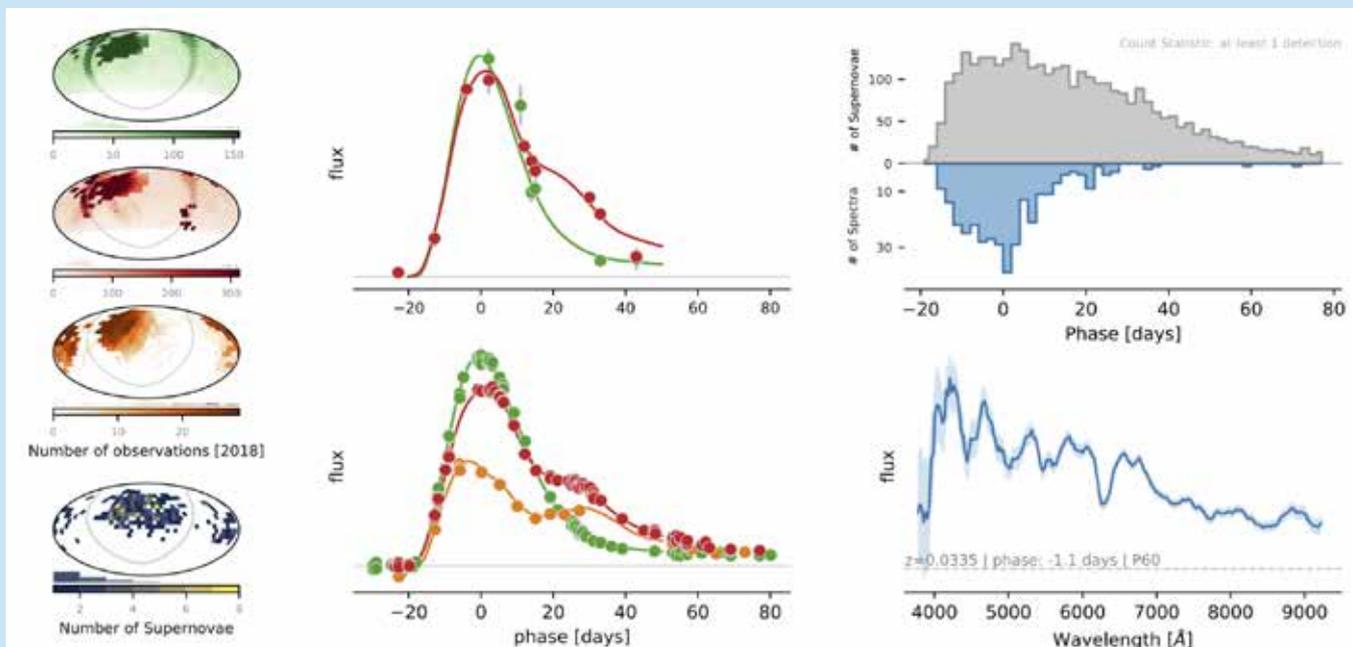
Courbe de lumière de la supernova la plus distante détectée et identifiée par le survey Subaru/SSP.

SNe proches avec la Zwicky Transient Facility

La constitution d'un lot de supernovae de qualité cosmologique dans la gamme $z < 0.1$ est paradoxalement plus difficile. Pour couvrir un volume d'univers proche suffisant, il faut être en mesure d'observer plusieurs milliers de degrés carrés avec une cadence de l'ordre de quelques jours. Il est préférable d'implémenter un relevé cadencé et de réaliser la détection des SN et leur suivi avec le même télescope afin d'obtenir un échantillon exempt de biais : toutes les détections bénéficient d'un suivi de qualité identique. A ce jour, une seule collaboration au monde est en mesure de réaliser ceci : la *Zwicky Transient Facility* (ZTF) qui réalise un relevé de l'intégralité de l'hémisphère nord, avec une cadence de 3 jours environ. Pour réaliser cet exploit, ZTF met en œuvre un télescope robotique de 1,2 m de diamètre, équipé d'une caméra CCD couvrant un champ de 47 deg². La phase 1 de ZTF (2018-2020) a permis d'obtenir plus de 1000 SNe de qualité cosmologique (figure ci-dessous). La seconde phase (2020-2024) permettra de multiplier ce chiffre par 5. En revanche, la précision de la calibration du *survey* ZTF ne permet pas de mesurer des distances de luminosité avec la précision requise pour des études de cosmologie.

En 2021, nous avons rejoint la collaboration ZTF, avec plusieurs groupes de l'IN2P3 (IP2I-Lyon, LPC-Clermont, CPPM-Marseille) en tant que *Major Partners*. Le groupe de participation ainsi constitué a bénéficié d'un soutien fort de l'ANR. En contrepartie de l'accès aux données SN, nous nous sommes engagés (1) à déployer un pipeline de photométrie des supernovae et l'ouvrir à la collaboration ZTF pour d'autres *transients*, (2) à caractériser les bandes du télescope ZTF à l'aide des outils instrumentaux développés pour notre projet StarDICE et (3) à gagner un facteur 5 à 10 (*best effort*) sur la calibration du *survey*, afin que les distances aux supernovae ZTF puissent être utilisées dans un diagramme de Hubble.

Notre projet est de publier nos courbes de lumière, en trois *Data Releases* annuelles. Chaque *Data Release* inclura de nouvelles données et bénéficiera des progrès incrémentaux de notre *pipeline*. L'objectif principal du groupe est le diagramme de Hubble combiné ZTF+JLA+Subaru. Le lot de données ZTF permettra de réaliser en outre deux mesures clefs de cosmologie : une nouvelle mesure indépendante de la constante de Hubble, ainsi qu'une mesure précise du taux de croissance des structures dans l'Univers proche.



Colonne de gauche : la répartition des observations ZTF durant la première année du *survey* dans les bandes g(vert), r(rouge) et i(orange) ; localisation des supernovae identifiées. Colonne centrale : deux courbes de lumière typiques : cadence nominale et cadence rapide. Colonne de droite : qualité du suivi photométrique et spectroscopique des SNe ZTF et exemple de spectre d'identification pour une supernova à $z \sim 0.033$.

Modélisation empirique des SNe Ia

Enfin, la modélisation de l'évolution spectrophotométrique des SNe Ia est essentielle pour inférer à partir des mesures de flux (réalisées dans notre référentiel) le flux émis par chaque SN, dans son référentiel, dans une bande de référence. Le modèle qui est devenu le standard au sein de la communauté (SALT2) 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 SN une fois connue la bande passante du *survey*. 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 inféré à partir des données). Depuis quelques années, la croissance soutenue de l'échantillon de supernovae bien mesurées a porté l'éclosion de modèles alternatifs. Nous travaillons sur une implémentation moderne plus rapide de SALT2, qui nous permettra d'explorer des paramétrisations alternatives de la diversité des SNe Ia, dans le but d'améliorer la standardisation des SNe et donc la précision des distances de luminosité.

Préparation des futurs grands relevés énergie noire

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 à mesurer... L'éta- lonnage 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, deux expériences visant à transférer aux objets astrophysiques l'éta- lonnage des flux lumineux définis par le radiomètre cryo- génique du NIST, le groupe investit un important effort instrumental dans ce prérequis indispensable au succès des futurs relevés de supernovae.

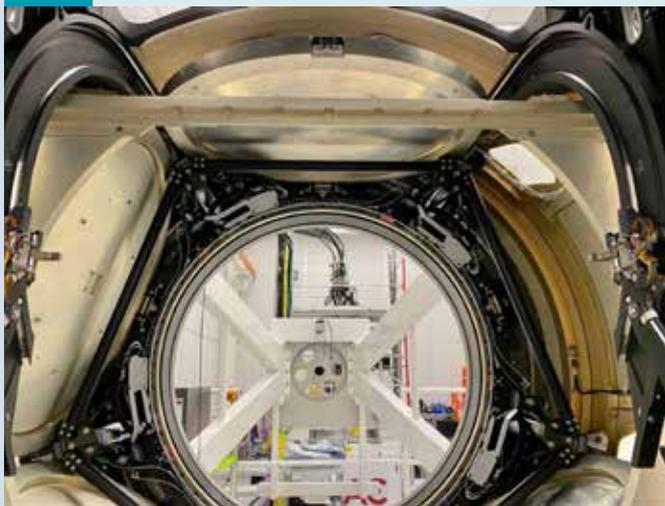
Mesure du cisaillement gravitationnel

Les corrélations du cisaillement gravitationnel sont l'unique sonde connue de la distribution de matière aux grandes échelles spatiales. L'étude, par exemple, de la distribution des galaxies ne peut être traduite en distribution de la matière qu'au prix d'hypothèses sur la fidélité de la densité des galaxies comme traceur de matière. Le signal de cisaillement est entièrement contenu dans l'ellipticité apparente des galaxies induite par la distribution de masses entre celles-ci et nous. Du fait de l'ellipticité naturelle des galaxies, il faut moyenner les formes de nombreuses galaxies sur une zone du ciel pour voir le faible signal émerger. L'instrument LSST et son pro-

gramme d'observation ont été conçus pour observer ce signal sur l'ensemble du ciel austral extra-galactique. Du fait de l'énorme statistique envisagée, cette entreprise fait face à des défis redoutables, en particulier au sujet de la mesure des formes. En effet, l'estimation d'un indicateur d'ellipticité est un problème difficile sans solution naturelle, et l'ellipticité mesurée doit être affranchie des distorsions induites par le système optique, atmosphère, télescope et senseurs. Nous travaillons plus particulièrement sur l'estimateur d'ellipticité, les distorsions induites par l'atmosphère (particulièrement importantes pour LSST avec ses poses de 30 s), et les distorsions électrostatiques dues aux senseurs.

Le système changeur de filtres de LSST

Pour quantifier les couleurs des objets astronomiques, information clef dans l'estimation de leur distance, les imageurs collectent la lumière à travers des filtres qui sélectionnent une bande du spectre. LSST observera le ciel successivement dans 6 bandes couvrant la fenêtre visible, de 330 à 1045 nm. Le dispositif changeur de filtres permet de déplacer ces filtres (~70 cm de diamètre pour un poids entre 25 et 38 kg chacun) d'une position d'attente à la position dans le faisceau et réciproquement. Ces mouvements doivent être rapides (< 90 secondes) afin de minimiser les temps morts, précis, les filtres devant être position-



Le changeur de filtres de LSST lors de sa phase de Commissioning dans la salle blanche de SLAC.

nés de façon reproductible à 100 microns près et fiables : près de 100 000 changements de filtres sont prévus pendant la durée du projet.

La France est responsable de la fourniture du système changeur de filtres de LSST et le LPNHE fournit le "carrousel" (photo ci-avant), qui tient les filtres en attente et présente le filtre à positionner dans le plan focal. Le carrousel, sans filtre, pèse ~250 kg et est un système extrêmement robuste, capable de maintenir de façon sûre ~155kg de filtres en intégrant les risques sismiques importants du Chili. Une quarantaine de personnes sont intervenues sur la construction du changeur de filtres dans 5 laboratoires de l'IN2P3 : CPPM, LPC, LPSC, APC et LPNHE. Près d'une quinzaine de personnes des services techniques du LPNHE ont ainsi participé à ce projet depuis 2007. A l'automne 2019, le changeur de filtres a été livré à SLAC en Californie pour son intégration dans la caméra de LSST. Durant ces deux dernières années, l'équipe du laboratoire a activement contribué à la mise en service du système sur deux fronts afin d'atténuer l'impact de la pandémie :

- En 2020 le prototype a été mis à niveau et réactivé dans le hall du LPNHE. A l'aide de ce modèle, les problèmes rencontrés par les équipes aux Etats-Unis ou identifiés par l'équipe au début de la mise en service ont pu être abordés et résolus à distance.
- En plus des deux mois de la mise en service à SLAC fin 2019 - début 2020, deux mois de mission en 2021 à SLAC de l'équipe changeur de filtres ont permis de finaliser le niveau de performance et d'optimisation attendu (ex : changement de filtre en 83 s, soit une réduction de 50% par rapport au temps atteint en 2020).

L'effort de mise en service et de prise en main de ce système complexe va se poursuivre encore pendant deux ans.



Mise en service du plan focal de LSST

L'équipe du LPNHE contribue depuis 2007 à la conception, construction et mise en œuvre du plan focal de LSST qui depuis mi-2020 est complet. L'expertise de l'équipe est mise à contribution lors de la mise en service en cours sur les diagnostics du plan focal, l'optimisation du fonctionnement et de la lecture des CCD. Depuis le début de la production des CCD, un banc de référence pour LSST opéré au LPNHE est régulièrement sollicité, il contribue encore aujourd'hui à résoudre des problèmes rencontrés lors de la mise en service du plan focal.

CHIFFRES CLEFS

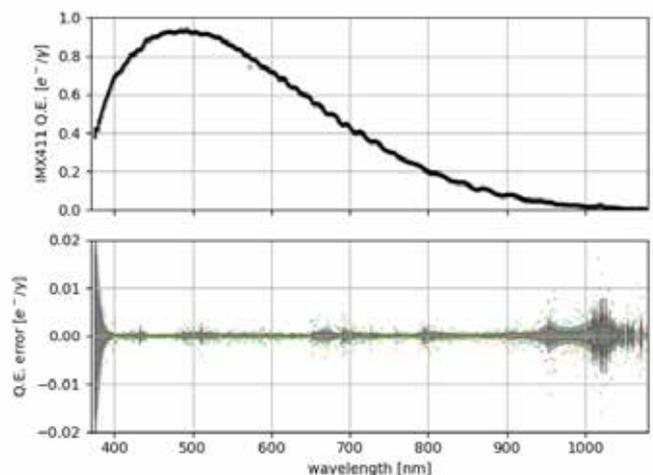
Changeur de filtres : changement des filtres (**70 cm** de diamètre pour **~30 kg**) en **83s**, avec une reproductibilité de positionnement **100 microns** (100 000 changement de filtres sont prévus).

Nombre d'objets suivis pendant **10 ans** : **~3710⁹** (**20 10⁹** galaxies / **17 10⁹** étoiles)

Mesure de l'efficacité quantique d'un détecteur CMOS de 150 Mégapixels produite par le banc d'étalonnage de détecteurs StarDICE. En haut : la courbe est obtenue par la superposition de trois mesures indépendantes du même détecteur. En bas : dispersion entre les trois mesures (points colorés). La zone grisée correspond à l'incertitude prédite sur les mesures.

Banc d'étalonnage détecteurs de 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. La première étape de la chaîne établie par l'expérience StarDICE consiste à transférer la définition instrumentale disséminée par le NIST sous la forme de photodiode étalonnée vers des détecteurs CMOS et CCD refroidis sensibles à des flux lumineux beaucoup plus faibles (de l'ordre de 10^{-15} W/cm²). À cette fin, l'équipe a démarré en 2020 le développement d'un banc spectrophotométrique dédié à la mesure précise de l'efficacité quantique de ce type de détecteurs. En septembre 2021, l'équipe a produit une première démonstration de mesure de l'efficacité quantique d'une caméra CMOS de 150 millions de pixels dont la précision a atteint la cible de 0.1% sur la gamme de longueur d'onde 400-800 nm (figure ci-dessous). Les développements en cours se concentrent désormais sur l'extension de ces résultats à la gamme 350-1100 nm. L'infrastructure développée est également valorisable pour un usage plus large que celui de l'expérience StarDICE. Elle a été utilisée pour effectuer les tests de recette de la caméra CCD destinée à équiper le nouveau spectrographe (SED-machine II) de l'expérience ZTF-II.



Développement et étalonnage de l'étoile artificielle StarDICE

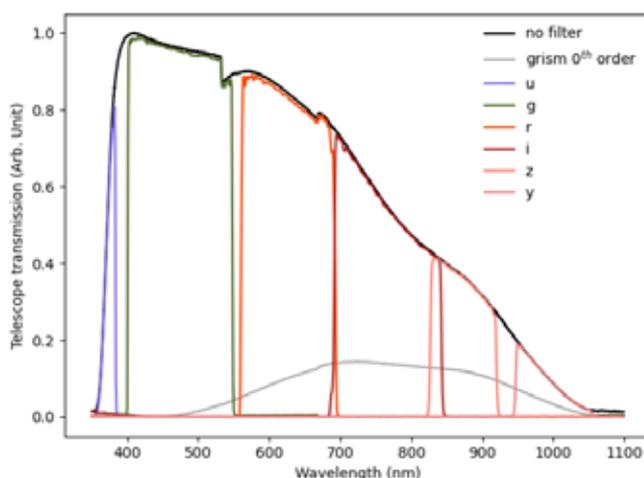
La seconde partie de la chaîne consiste à transporter la calibration de laboratoire établie ci-dessus sur le site d'un observatoire astronomique. Pour ce faire, le LPNHE développe une étoile artificielle stable, nommée StarDICE, d'une brillance comparable aux étoiles standard. Après une démonstration de principe en 2019 montrant qu'une stabilité de 0.1% dans des conditions rudes (changement de température de 20°C sur 15 minutes) était atteignable, nous développons depuis 2020 un second prototype couvrant la totalité du domaine de longueur d'onde visé est en cours, ainsi que son infrastructure d'étalonnage photométrique basée sur les détecteurs calibrés précédemment.

Télescope StarDICE

Cette source de lumière artificielle est destinée à être placée en regard d'un télescope robotique sur le site de l'observatoire de Haute Provence (OHP). L'assemblage de l'instrument photométrique dédié a été achevé au LPNHE en mars 2021 et une première mesure précise des bandes photométriques de l'instrument a été produite en mars (figure ci-dessous), puis une seconde en juin en collaboration avec l'équipe de Christopher

Stubbs à Harvard qui développe l'instrument de mesure de bande passante le *Collimated Beam Projector* (CBP). L'étalonnage en longueur d'onde de la première mesure atteint la précision de 0,1 nm requise et constitue la première démonstration pratique d'un CBP atteignant le niveau de précision requis pour LSST. En parallèle, l'équipe a achevé la robotisation de la table équatoriale de l'OHP en novembre 2021. Celle-ci est désormais prête à accueillir l'instrumentation, dont l'installation est prévue au début de l'année 2022.

Mesure relative de la transmission de l'instrument photométrique StarDICE produite par le second prototype du CBP. Cette mesure est la première à permettre une détermination du front des filtres de l'instrument avec une précision en longueur d'onde meilleure que 0,1 nm, précision suffisante non seulement pour StarDICE mais également pour LSST. Une nouvelle mesure est en cours avec un nouveau prototype pour améliorer la précision sur la mesure de l'amplitude.



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

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Guy Augarde, Christophe Balland, Marc Betoule, Sébastien Bongard, Delphine Hardin, Leander Lacroix, Laurent Le Guillou, Jérémy Neveu, Ignasi Pérez Ràfols, Nicolas Regnault, Clare Saunders, Julianna Stermer, Pierre-François Léget, Thierry Souverin, Enya Van den Abeele, Pauline Zarrouk, Ting Tan

Équipe technique :

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

CHIFFRES CLEFS

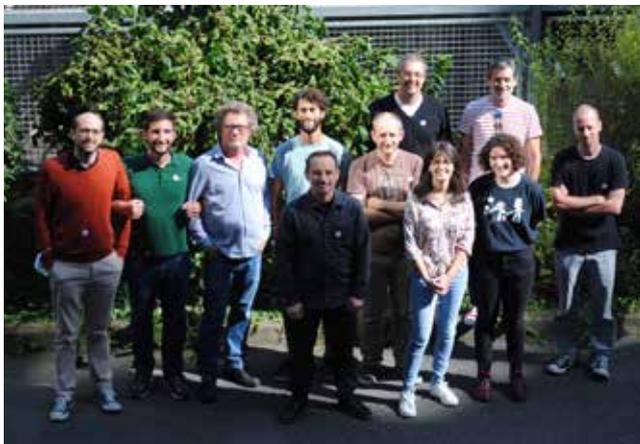
La valeur médiane de l'incertitude statistique sur une mesure d'efficacité quantique obtenue sur le banc de calibration du détecteur de StarDICE est de **0.000302** électrons/photons

Rayonnements Cosmiques et Matière Noire

- Mise en place de la construction à grande échelle du futur observatoire gamma de très hautes énergies CTA
- Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec l'expérience H.E.S.S.
 - Instrumentation, développement des logiciels d'analyses et de simulations
 - Études astrophysiques des sources extragalactiques
 - Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux sources
 - Impact limité de la situation sanitaire
- En attendant GRANDProto300
- Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON
 - Détecteur
 - Calcul et traitement des données
 - Analyse
 - Futurs projets
- Du secteur sombre au WIMP léger, recherche de matière noire avec le détecteur DAMIC-M et la chambre bas bruit (LBC)
 - Organisation
 - Les projets
 - Développements techniques
- A la recherche de WIMPs avec l'expérience DarkSide



Rayonnement Cosmique et Matière Noire



Ce pôle regroupe des expériences diverses par leur objet, leurs implications sur les théories et modèles qui décrivent l'Univers et son évolution, et les techniques mises en œuvre. Elles cherchent à déterminer la localisation et la nature des phénomènes d'énergie et/ou d'intensité extrême (via la détection de photons gamma pour H.E.S.S. et CTA, de neutrinos pour GRAND), ou de la matière noire, dans l'hypothèse où elle serait constituée de particules élémentaires d'un type nouveau, qui interagissent faiblement avec la matière ordinaire (DAMIC, DarkSide, XENON). Incidemment, elles testent aussi la validité des lois physiques fondamentales comme l'invariance de Lorentz pour des propagations sur une très grande distance. Dans tous les cas, il s'agit d'observer des phénomènes induits sur Terre (dans l'atmosphère, en surface ou en site souterrain), en les distinguant d'un bruit de fond abondant.

Toutes ces expériences sont conçues, mises au point et exploitées par des collaborations internationales auxquelles le LPNHE apporte une contribution majeure, par des perfectionnements et des innovations techniques et par des développements de logiciels d'analyse et de simulation.

Le LPNHE a une longue histoire dans l'observation des gerbes atmosphériques induites par le rayonnement cosmique (noyaux ou photons gamma) de très haute énergie, et a rejoint très tôt l'expérience H.E.S.S. qui arrive maintenant en fin d'exploitation. L'équipe du Laboratoire s'est recentrée en 2020-21

sur les sources extragalactiques, notamment les AGN (noyaux actifs de galaxie) ; elle a mis en évidence une caractéristique nouvelle pour un sursaut gamma à travers la détection de leur émission rémanente au TeV.

Tout naturellement elle a rejoint le projet CTA, la continuation à une plus grande échelle des observatoires actuels de gerbes gamma, avec un seuil en énergie à 20 GeV. Ses contributions logicielles sont la simulation des observations d'AGN, la reconstruction de leurs éruptions. Techniquement, le laboratoire développe l'électronique frontale des caméras NectarCAM, dont deux prototypes ont déjà été produits dans leur dernière version, 2600 étant en commande. La programmation à distance des composants des futures caméras a permis de minimiser les restrictions dues à la pandémie.

Le laboratoire a initié, et conduit en ce moment en collaboration avec l'IAP, le projet GRAND de réseau géant d'antennes sur 200 000 km², pour la détection des rayons cosmiques de très haute énergie ($> 10^{17}$ eV) en incidence rasante, principalement des neutrinos, non encore observés. Le but est d'obtenir une détection sélective et une reconstruction à partir de la seule émission radio, dans la gamme 50-200 MHz. Un prototype de 300 antennes est prévu dans le désert de Gobi ; la pandémie a retardé son déploiement, qui devrait commencer fin 2021. Des études de simulation indiquent qu'un front d'onde sphérique pourrait déterminer la nature de la part primaire d'après la position du centre, et fournirait une précision angulaire de 0.1 degré, donc une bonne corrélation avec de possibles sources cosmiques.

Une voie explorée depuis longtemps pour détecter la matière noire consiste en un grand volume de matériau sensible en site souterrain profond, pour limiter les signaux parasites. Le laboratoire participe à deux expériences utilisant des gaz rares liquéfiés, au Laboratoire Souterrain du Gran Sasso, pour la détection de particules du type WIMP (massives, interagissant faiblement), mais aussi d'autres types

hypothétiques, par exemple leptophilique (interagissant avec les électrons), bosonique (par exemple des « photons noirs »), axionique, etc. Pour les deux expériences, le détecteur est biphasique (liquide+gaz) pour optimiser l'amplification du signal, et contient :

- l'argon pour DarkSide, qui utilise actuellement une cible de 50 kg, et prépare pour 2024 un détecteur de 20 tonnes. L'équipe du laboratoire travaille notamment sur la reconstruction de la position de l'interaction, et la distinction des signaux de recul électronique et nucléaire.

- le xénon pour XENON-1T (1 tonne) qui a vu en 2020 un excès d'événements par rapport au bruit de fond attendu. L'étape suivante, XENON-nT (> 8 tonnes, en préparation), devrait infirmer ou confirmer l'observation possible de nouvelle physique, et dans ce cas clarifier la nature des objets détectés. L'équipe du laboratoire travaille sur les différents modèles, notamment la matière noire leptophilique. Elle construit un système de distribution et de traitement des données. Elle développe sur place un laboratoire cryogénique appelé Xelab. Elle s'est engagée dans le projet DARWIN (50 t).

Avec un dispositif beaucoup moins lourd, la collaboration DAMIC (impulsée au départ par le LPNHE et l'Université de Chicago) utilise comme détecteurs des CCD pour la recherche de matière noire, qui sont sensibles à des projectiles dans une large gamme de masse. Le principe est analogue à celui des émulsions photographiques : accumuler les traces produites par des interactions et les restituer comme un appareil photographique numérique. Le but est d'améliorer le prototype qui fonctionne à SNOLAB et d'installer au Laboratoire souterrain de Modane le dispositif DAMIC-M d'une masse sensible de 1 kg. Outre des études de faisabilité, la principale contribution du laboratoire est la mise au point d'une électronique à ultra bas bruit, basée sur les CCD « *skipper* », dont la charge est lue sans destruction de manière répétitive, de façon à minimiser l'effet du bruit de lecture. On arrive ainsi à une précision de l'ordre de 0,2 électron, donc un seuil de détection très bas.

En résumé, le laboratoire, grâce à ses compétences multiples et à sa longue expérience passée, est engagé dans des approches variées pour aborder des questions ouvertes où beaucoup d'hypothèses restent à explorer.

Mise en place de la construction à grande échelle du futur observatoire gamma de très hautes énergies CTA

Le *Cherenkov Telescope Array* (CTA) va constituer le premier observatoire astronomique ouvert sondant l'Univers violent aux plus hautes énergies. Il détectera des rayons gamma au-dessus de ~20 GeV, avec pour but d'explorer l'origine des particules cosmiques, les environnements astrophysiques extrêmes ainsi que les nouvelles frontières de la physique. CTA permettra de couvrir l'ensemble du ciel nocturne avec deux réseaux de télescopes, un dans chaque hémisphère. Chaque réseau sera constitué de deux à trois types de télescopes à imagerie Cherenkov de taille différente afin d'optimiser la sensibilité, la résolution angulaire et la couverture en énergie de CTA : les petits (SST), moyens (MST) et grands télescopes (LST).

CTA est organisé en deux entités, le Consortium (CTAC), constitué de la communauté scientifique et technique, et l'Observatoire, qui opérera les réseaux de télescopes. L'Observatoire CTA (CTAO) est actuellement constitué sous forme de GmbH et devra évoluer à terme en ERIC (*European Research Infrastructure Consortium*) pour l'acceptation des différents composants de CTA fournis par les contributeurs *in-kind* de CTAC, leur installation et leur opération. La mise en place de cette entité légale de droit européen, dont le processus a été initié en 2018, s'est vue ralentie par la pandémie de COVID-19, et devrait être finalisée début 2023. Toutefois, le comité des représentants gouvernementaux des pays contributeurs à CTA a approuvé l'estimation comptable finale ainsi que la description scientifique et technique du projet en juin 2021. Ceci fige le nombre de télescopes dans la première phase de construction de CTA, dans sa configuration dite « Alpha », avec 4 LST et 9 MST au nord, et 14 MST et 37 SST au sud, avant l'achèvement à terme de la construction des réseaux dans leur configuration finale, dite « Omega ».

Le Consortium s'affaire actuellement sur l'optimisation de l'arrangement des télescopes sur les deux sites nord et sud (l'espacement entre télescopes) afin de maximiser le retour scientifique de CTA pour les différents *Key Science Projects* définis. De plus,

les simulations Monte Carlo à grande échelle permettant d'estimer les performances de CTA ont été raffinées (production dite « Prod5 »)² pour inclure les comportements les plus réalistes possibles des caméras équipant les différents télescopes, suite à des mesures en laboratoire et des campagnes d'observation ces dernières années, telle la campagne de test NectarCAM sur une structure MST à Adlershof au printemps 2019.

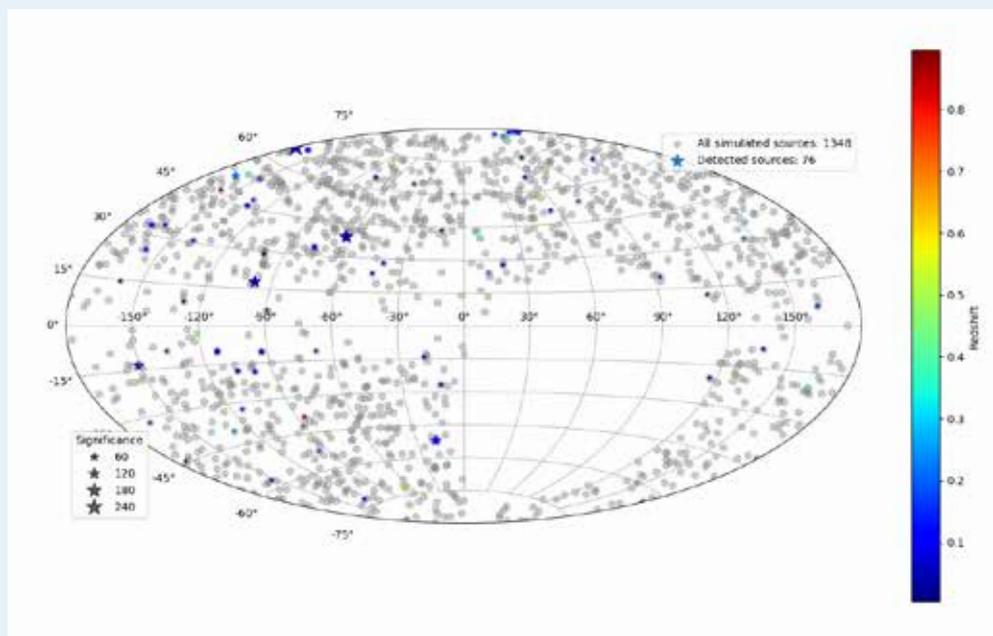
En 2020 et 2021, sur les activités scientifiques, le groupe du LPNHE s'est particulièrement attaché à la simulation d'observations avec CTA d'une population de noyaux actifs de galaxie (AGN) telle qu'issue des derniers catalogues Fermi-LAT, en construisant un *pipeline* basé sur *gammapy*, récemment sélectionné par CTAO comme suite logicielle d'analyse officielle de CTA³. Le catalogue 4LAC de *Fermi-LAT*, dont les *redshifts* ont été révisés en prenant en compte toute la littérature disponible⁴, est utilisé en entrée de cette étude. Les spectres des AGN détectés par *Fermi-LAT* sont ensuite extrapolés aux très hautes énergies, en prenant en compte l'absorption gamma par le fonds diffus extragalactique, afin de déterminer le nombre de sources qui seraient détectables avec les deux réseaux de CTA, selon différentes hypothèses d'observation. La figure ci-dessous présente un exemple de carte du ciel de telles détections pour 5h d'observation par sources, vues depuis le site nord, dans sa configuration Alpha, en prenant un seuil en énergie à l'analyse de 100 GeV. Le résultat de ces premières simulations a été présenté à la conférence ICRC 2021 (Brown et al., 2021).

Dans ce contexte, on peut aussi noter la publication récente de l'article Goldoni et al. (2021) retraçant la détermination de *redshifts* d'AGN candidats à une détection avec CTA à partir de diverses observations en optique menées avec les télescopes Keck II, SALT, et NTT de l'ESO.

Le groupe s'investit également depuis peu dans l'étude des capacités de reconstruction de CTA face à des observations d'éruptions d'AGN. Une première étape consiste en la comparaison de simulations d'analyses à 1D (en énergie) avec des analyses dites 3D (spectro-morphologique) de tels phénomènes temporels.

En terme de réalisation technique, le LPNHE est fortement impliqué dans la réalisation de la camera NectarCAM, destinée à équiper les neuf télescopes de taille intermédiaire du site nord (La Palma, Espagne) de CTA, et dont la première caméra devrait être installée sur site d'ici fin 2022. Le laboratoire coordonne l'activité « électronique frontale » pour NectarCAM qui comprend la carte de lecture et acquisition dite *Front End Board* (FEB) et la réalisation de circuits intégrés spécifiques (Irfu, ICC-UB). L'équipe du LPNHE a la responsabilité de fournir les 2 520 cartes FEB pour les 9 NectarCAM du site nord. Cela inclut la conception, la production et les tests de la carte, mais aussi le développement du micrologiciel embarqué, du logiciel de contrôle et d'interface et des bancs de test automatisés pour la production en série.

Un module individuel de détection de NectarCAM est constitué de 7 photomultiplicateurs, connectés à une



Carte du ciel de noyaux actifs de galaxies (AGN) détectés avec Fermi-LAT (gris) et simulés tels que vus avec le réseau nord de CTA au-dessus de 100 GeV en 5h d'observation par source. La taille des étoiles représente la significativité, en déviations standard, de la détection avec CTA, et le redshift de ces AGN est donné par le code couleur.

Interface Board (IB), développée par l'IRAP et qui gère les hautes tensions appliquées aux photomultiplicateurs, constituant ainsi le *Focal Plane Module* (FPM). Vient ensuite la FEB, puis le *Digital Trigger Back Plane* (DTBP), développé par DESY-Zeuthen, qui assure la réalisation du déclenchement et sa distribution à toutes les FEBs de la caméra après validation au niveau de la caméra.

La FEB est le système central du module. Elle lit, mémorise et formate les données provenant du FPM et les transfère via le DTBP au caméra serveur après validation par le système de déclenchement de premier niveau. Elle permet aussi de configurer et contrôler tous les paramètres du module grâce au micrologiciel embarqué dans le FPGA et au *Nectar Module Controller* (NMC) qui est un serveur OPC-UA permettant de contrôler tous les paramètres du module depuis l'extérieur.

En 2019, afin de pallier à l'obsolescence du boîtier utilisé pour les ASIC Nectar (*Application Specific Integrated Circuit*), un re-routage complet de la carte s'est imposé, autorisant de fait la suppression d'éléments devenus inutilisés suite au choix de la collaboration d'utiliser le déclenchement digital.

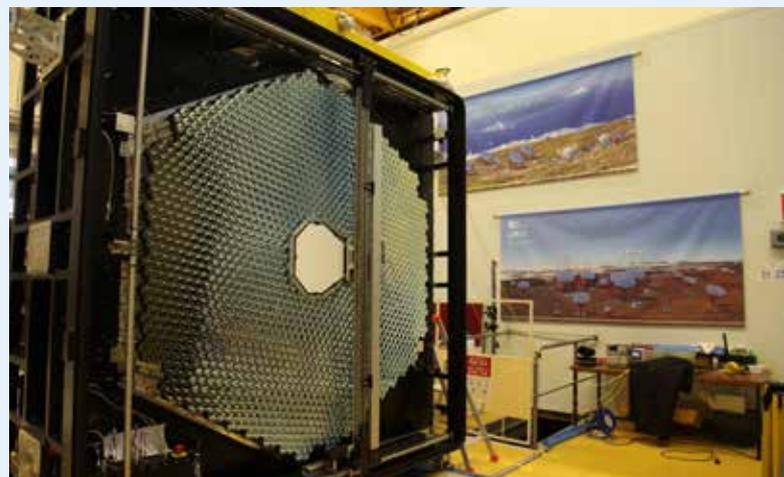
Au cours de la période 2020-2021, nous avons produit 2 prototypes de la FEB, dans sa version 6, qui intègre le nouvel ASIC Nectar, une nouvelle distribution d'horloge et une nouvelle mémoire de configuration FPGA. Nous avons donc adapté, au niveau du *firmware*, le système d'acquisition de données en série et de commande de l'ASIC Nectar afin de prendre en compte son nouveau système de synchronisation et son nouveau mode de gestion de 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. En effet, cette nouvelle version de l'ASIC Nectar a vu sa mémoire séparée en deux blocs, permettant simultanément la lecture d'un bloc et l'écriture dans l'autre, afin de réduire le temps mort du système. La profondeur mémoire ainsi réduite reste compatible avec la latence attendue du déclenchement selon les spécifications de CTA. Les premiers essais dans la caméra ont montré que le temps mort a été réduit de 7,2 μ s à 400 ns pour l'acquisition de 60 échantillons.

De plus, en termes de reprogrammation à distance des composants programmables du module, nous avons intégré dans le NMC et le *firmware* un nouveau système de contrôleur pour la programmation de l'EEPROM via le FPGA de la FEB. Nous avons également intégré au NMC un système de programmation via le SPI du micro-

contrôleur de la IB développé par l'IRAP. De ce fait, les composants programmables du module de détection de la future caméra NectarCAM seront tous programmable à distance via la FEB.

Enfin, du point de vue des tests, deux bancs de test avaient été produits pour la vérification fonctionnelle lors de la production des FEBs version 5 en 2018. Ces bancs ont été mis en rack afin de faciliter leur déploiement sur le site de production et améliorer leur fiabilité. Nous avons également mis à jour leur interface logiciel vers python 3, adapté les tests à la carte FEB version 6 et porté le système sous forme de conteneur Docker. Pour finir, une base de données a été déployée, laquelle est associée à une interface web permettant d'effectuer des analyses de performance et de suivi des FEBs tout au long de son cycle de production.

Pour rappel, en 2018-2019, nous avons produit 316 FEBs dans sa version 5 afin de réaliser le modèle de qualification de la caméra. En août 2021, les cartes ont été entièrement intégrées dans la structure de la caméra chez notre partenaire CEA/Irfu comme on peut le voir sur la photo ci-dessous. La caméra est en cours de test en chambre noire et sera prête pour une intégration sur site en 2022.



Caméra NectarCAM complète, au CEA/Irfu.

Après une *critical design review* du modèle de qualification en février 2021 et dans l'attente de sa validation par CTAO, nous avons lancé un appel d'offre pour la production de la FEB dans sa version 6 afin de réaliser les neuf caméras. Le marché a été attribué à Ouestronic et a débuté en septembre 2021 par une présérie de 25 cartes, qui devrait se poursuivre par la production de 1400 cartes en 2022-23 et une seconde production de 1200 cartes en 2023-24.

1 <https://www.cta-observatory.org/bgr-approves-ctao-costbook-stdescription/>

2 <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.5499840>

3 <https://www.cta-observatory.org/ctao-adopts-the-gammapy-software-package-for-science-analysis/>

4 <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.4721386>

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

Julien Bolmont, Sami Caroff, Floriane Cangemi,
Gabriel Emery, Guillaume Grolleron,
Jean-Philippe Lenain, Christelle Levy

Équipe technique :

Claire Juramy-Gilles, Jean-Luc Meunier,
Eric Pierre, François Toussenet, Vincent Voisin

CHIFFRES CLEFS

315 FEB v5 produites et testées pour le modèle de qualification (265 utiles + pièces de rechange)

Temps mort de **7 μ s** réduit à **0.4 μ s** pour la **FEB v6**

1551 noyaux actifs de galaxie simulés

Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec l'expérience H.E.S.S.

Instrumentation, développement des logiciels d'analyse et de simulation

En septembre 2020, la collaboration H.E.S.S. a fêté les 20 ans du début de la construction de son premier télescope. Depuis la première lumière en 2002, les télescopes de H.E.S.S. ont permis de sonder le ciel gamma en profondeur avec la détection d'une centaine de nouvelles sources astrophysiques. En 2015-2016, une nouvelle électronique (baptisée HESS-1U) pour les caméras des quatre télescopes de 12 m a permis la réduction du temps mort et l'abaissement du seuil en énergie. Plus récemment, en 2019, la caméra du grand télescope de 30 m (CT5) a été remplacée par une nouvelle caméra « FlashCAM » dont l'électronique est largement basée sur une technologie numérique. Depuis cette période de transition, H.E.S.S. collecte des données de manière stable avec des performances améliorées. 2019 a donc vu la fin de l'exploitation de la caméra française équipant le télescope CT5 et la conclusion des activités techniques du LPNHE sur le projet H.E.S.S. aurait dû intervenir en 2020. Toutefois, la pandémie due au COVID-19 a empêché la dernière mission sur le site. L'objectif principal de cette mission était de remplacer les éléments mécaniques des tiroirs de la caméra française de CT5 pour permettre leur utilisation sur

les caméras des télescopes de 12 m. L'opération, financée par l'IN2P3 et menée en collaboration avec le LLR, rendra possible l'utilisation des quelque 2500 photomultiplicateurs de la caméra de CT5 (incluant les pièces de rechange) dans les télescopes de 12 m. La mission est prévue pour le premier semestre 2022 si la situation sanitaire le permet.

Les mises à niveau techniques des caméras ont nécessité des adaptations importantes des logiciels de calibrage, de simulation et d'analyse. Le groupe du LPNHE a joué un rôle majeur dans l'adaptation de la simulation française pour implémenter les caméras HESS1U et plus récemment FlashCAM. Concernant FlashCAM, le travail a plus particulièrement porté sur l'implémentation logicielle du système de déclenchement de la caméra dans la simulation. La génération de lots de données simulées est une des responsabilités du groupe et est effectuée au Centre de Calcul de l'IN2P3, mais de plus en plus également sur la Grille à travers l'infrastructure EGI. Concernant le logiciel de reconstruction et d'analyse, le groupe participe activement aux correctifs et améliorations pour la chaîne d'analyse française. Ces travaux de fond réalisés depuis plusieurs années donnent au groupe du LPNHE une visibilité importante au sein de la collaboration H.E.S.S.

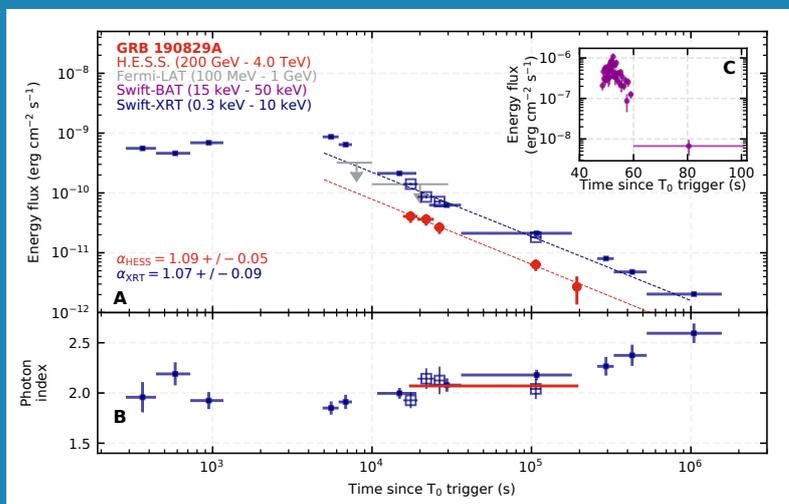
Études astrophysiques des sources extragalactiques

Depuis son origine, le groupe du LPNHE a eu une activité reconnue sur les sources galactiques et l'étude des fonds diffus. Au cours des deux dernières années, le départ d'un chercheur permanent vers un autre groupe, puis celui d'un post-doctorant recruté au CNRS, ont fait que ces activités ont cessé. Le groupe s'est donc recentré sur l'étude des sources extragalactiques : noyaux actifs de galaxies et sursauts gamma.

Concernant les noyaux actifs de galaxies (AGN pour *Active Galactic Nuclei*), le groupe participe à une étude systématique de tous les objets détectés par H.E.S.S. en état d'éruption (*flare* en anglais). Cette étude, menée en collaboration avec d'autres groupes (LUTh, CEA/Irfu,...), vise à dégager des propriétés communes entre toutes les sources détectées par H.E.S.S. en étudiant leur variabilité. Cette étude de population nécessite une ré-analyse de toutes les données pertinentes et le groupe du LPNHE participe à cet effort commun. La publication prévue sur le sujet fera état de l'ensemble des *flares* détectés par H.E.S.S. et de leurs propriétés avant la mise en service progressive de CTA.

Afin d'observer le plus grand nombre possible d'éruptions d'AGN, une réaction rapide aux alertes émises par d'autres détecteurs, en particulier spatiaux, est primordiale. Ces « cibles d'opportunité » occupent une place importante dans le programme d'observation de H.E.S.S. et le groupe du LPNHE est fortement impliqué dans le suivi quotidien de ces observations. La collaboration exploite en particulier un outil automatique d'analyse des données *Fermi-LAT* développé par un chercheur du LPNHE. Cet outil permet de détecter une augmentation de flux afin de déclencher des observations H.E.S.S.

Actuellement, quatre sursauts gamma ont été détectés au TeV (avec une significativité statistique supérieure à 5σ) par les expériences MAGIC et H.E.S.S. La détection de ces objets a assurément ouvert une nouvelle ère de l'astronomie gamma au TeV, alors qu'ils ont longtemps été traqués sans succès à ces énergies. Si l'objectif des détecteurs au sol est de pouvoir capturer l'émission prompte des sursauts, cet objectif n'a pas encore été atteint. Toutefois, la détection de l'émission retardée (ou *afterglow*) au TeV a constitué une percée significative : jusque-là, on pensait les très hautes énergies cantonnées à l'émission prompte. Les observations ont montré au contraire que l'émission de très haute énergie pouvait continuer très longtemps après. Ainsi, pour le GRB 190829A, H.E.S.S. a pu observer un signal significatif jusqu'à 56h après la détection de l'émission prompte. Cette analyse, à laquelle le LPNHE a participé, a été publiée dans la revue *Nature* (2019), et a fait l'objet d'un deuxième article dans *Science* en 2021. Parmi les résultats marquants de cette dernière étude, on peut citer la mesure précise de la décroissance en loi de puissance du signal au cours de l'*afterglow* avec une corrélation remarquable entre les données X et gamma (figure ci-dessous).



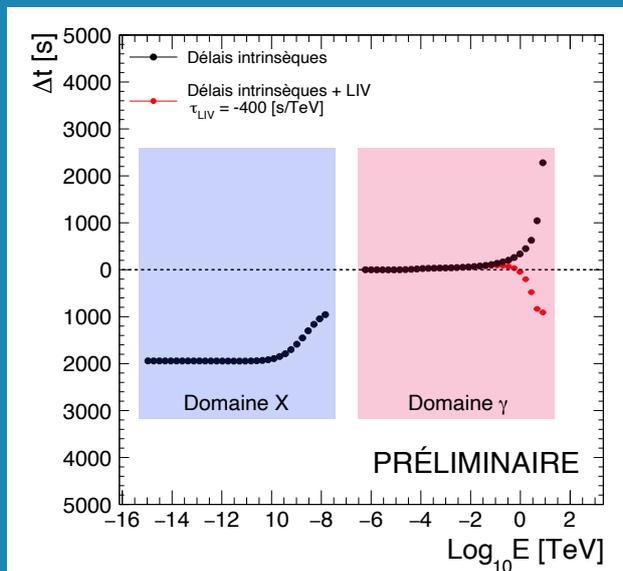
Flux en fonction du temps pour l'émission retardée du GRB 190829A. Le graphique permet de comparer les données collectées par H.E.S.S. (points rouges) et celles de Swift et Fermi (points bleus). Le flux diminue selon une loi de puissance dont la constante de décroissance est remarquablement similaire entre les données X et gamma.

Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux sources

Le groupe du LPNHE est impliqué depuis de nombreuses années dans l'étude temporelle des sources variables comme les noyaux actifs de galaxies (AGN), les sursauts gamma (GRB) et les pulsars. En plus des études de variabilité citées plus haut, les recherches concernent en particulier les « décalages spectraux », c'est-à-dire les écarts temporels pouvant exister entre des photons émis avec des énergies différentes. Ces décalages peuvent avoir deux origines : ils peuvent être dus à un effet de propagation comme celui dû à une éventuelle violation de la symétrie de Lorentz (VSL), ou bien aux mécanismes d'émission et d'accélération mis en jeu au sein des sources. La discrimination entre les deux effets passe par la réalisation d'études de populations et par une meilleure connaissance des objets émetteurs.

Prédite par certains modèles de gravitation quantique, la VSL pourrait se manifester par le fait que des photons d'énergies différentes auraient une vitesse de propagation dans le vide différente. Les décalages spectraux prédits par les modèles varient avec l'énergie et surtout augmentent avec la distance de la source. Un groupe de travail commun constitué par les collaborations H.E.S.S., MAGIC et VERITAS a pour but de rassembler le plus grand échantillon de sources possible pour les études de VSL. Coordonné depuis 2016 par le LPNHE, ce groupe de travail a franchi une étape majeure en 2021 avec la publication d'un premier article technique décrivant en détail la méthode de combinaison de plusieurs lots de données hétérogènes (faisant intervenir AGN, GRB et pulsars) en tenant compte des différentes réponses instrumentales. Pour la première fois, ce travail compare deux formalismes différents permettant de relier les décalages spectraux avec la distance des sources. Le groupe de travail s'attache maintenant à l'étude de population proprement dite avec toutes les données disponibles, qui sera l'objet d'un second article.

Les décalages spectraux qui pourraient être générés par les mécanismes de production et d'accélération des particules à la source sont appelés « effets intrinsèques ». Initiée en 2015, une collaboration sur ce thème avec le groupe Hautes Énergies du LUTH de l'Observatoire de Paris a mené à la codirection de deux thèses. La première thèse avait permis de montrer qu'il est possible de générer des décalages intrinsèques à partir d'un modèle leptonique simple de jet d'AGN. La seconde thèse, soutenue fin novembre 2021, a permis une avancée supplémentaire importante en montrant qu'il doit être possible de distinguer les effets de VSL des effets intrinsèques avec les blazars en comparant les données X et gamma collectées simultanément pour un même *flare*. En effet, les décalages intrinsèques sont trouvés systématiquement corrélés entre les domaines X et gamma, alors que l'effet de VSL n'est significatif que pour le domaine gamma et peut inverser cette corrélation (figure ci-dessous). Ce travail qui mènera à une publication en 2022 devra ensuite être généralisé à d'autres types de modèles d'émission et d'accélération.



Décalages temporels prédits en fonction de l'énergie par le modèle simple développé en collaboration entre le LUTH et le LPNHE. Les points noirs montrent une corrélation claire des décalages entre les domaines X et gamma. Lorsqu'un décalage dû à la VSL est introduit (points rouges), il affecte seulement les données gamma, et rompt la corrélation. Observer ce type de comportement dans des données multi-longueurs d'ondes acquises simultanément permettront en principe de séparer effets intrinsèques et effets de VSL.

Impact limité de la situation sanitaire

Les différentes mises à niveaux de l'électronique de H.E.S.S. évoquées plus haut, ainsi que celle du système d'acquisition, ont toutes eu lieu peu de temps avant la survenue de la pandémie mondiale. Cela a permis un fonctionnement optimal de l'expérience au moment où les missions vers le site sont devenues totalement impossibles. De fait, les prises de données ont continué de façon normale et aucun problème technique majeur n'est venu les perturber. L'impossibilité de se rendre sur le site a tout de même nécessité une adaptation majeure. Depuis le printemps 2020, toutes les prises de données ont été réalisées

par des collègues Namibiens. Deux personnes ont été embauchées pour pallier le manque de *shifters*. L'amélioration du réseau internet entre la Namibie et l'Europe, en plus de rendre possible le transfert rapide de données, a également permis de piloter l'expérience à partir d'une salle de contrôle entièrement déportée. Un premier test fructueux a été réalisé à l'été 2021, pendant lequel l'expérience a été dirigée depuis DESY Zeuthen (près de Berlin). Que la pandémie perdure ou que la situation revienne à la normale, cette salle de contrôle pourra être utilisée pour réduire le nombre de missions sur le site.

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

Julien Bolmont, Sami Caroff, Floriane Cangemi,
Gabriel Emery, Guillaume Grolleron,
Jean-Philippe Lenain, Christelle Levy

----- Équipe technique :

François Toussenet

CHIFFRES CLEFS

Il y a **21 ans** la construction du premier télescope de H.E.S.S. débutait

1180 heures de données cumulées en **2020**

121 sources découvertes en primeur par H.E.S.S.

En attendant GRANDProto300

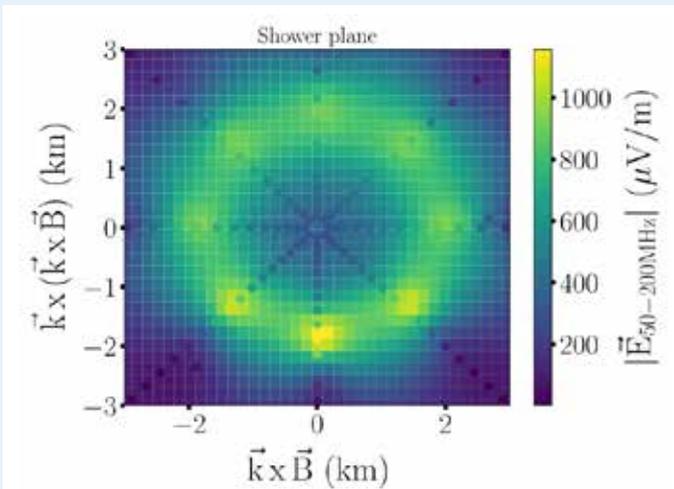
Le projet GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection) vise à construire un réseau de 20 radio-détecteurs composés de ~10 000 antennes chacun sur une surface de 10 000 km². Lorsqu'il sera finalisé au début de la décennie 2030, ce réseau, d'une surface équivalente à celle de l'Angleterre, constituera un outil formidable pour l'étude des particules cosmiques d'ultra haute énergie, et en premier lieu, les neutrinos d'énergie supérieure à 10¹⁷ eV. Leur détection encore jamais réalisée, serait un puissant moyen d'investigation des phénomènes violents dans l'Univers en combinaison avec d'autres sondes (X, gamma, neutrinos de plus basse énergie ou ondes gravitationnelles par exemple).

La mise en œuvre d'un réseau radio autonome (capable de détecter les cascades de particules induites dans l'atmosphère par les particules cosmiques à partir des seules impulsions radio associées) reste un gigantesque défi expérimental, surtout aux dimensions de GRAND. La collaboration GRAND, initiée au LPNHE en 2015, a donc choisi une approche progressive, dont une étape importante est l'expérience GRANDProto300 (GP300), un réseau de 200 km² et 300 antennes fonctionnant dans la gamme 50-200 MHz. GP300 visera en priorité à démontrer qu'il est possible d'identifier avec une pureté et une efficacité suffisantes les cascades de particules à partir des seuls signaux radio, et ensuite de reconstruire les caractéristiques (géométrie, énergie, nature) des particules cosmiques les ayant initiées.

La situation sanitaire a significativement retardé le déploiement de GP300, mais le feu vert a été donné en novembre



Tests en vue du déploiement de l'expérience GP300 à l'été 2019. Dans la version finale du montage, l'antenne est installée au sommet d'un mat de 3,5m.

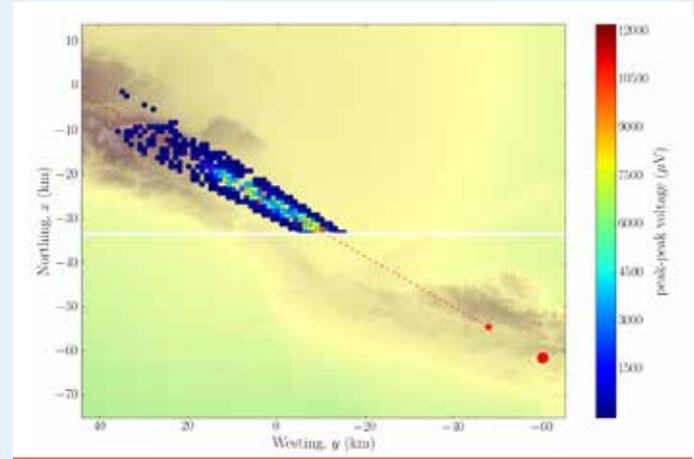


Empreinte du signal radio induit par une gerbe atmosphérique simulée dans la gamme 50-200 MHz, dans un plan perpendiculaire à l'axe de propagation de la gerbe. L'anneau, dont l'amplitude relative croît avec la fréquence, est lié à la compression du signal radio le long de l'angle Cherenkov et constitue une signature claire des gerbes atmosphériques. Sa position a pu être modélisée avec une très grande précision, permettant de reconstruire la direction d'origine du signal avec une précision de l'ordre de 0.1° .

2021 pour l'installation des 100 premières unités dans le désert de Gobi (photo ci-dessus). L'équipe du LPNHE attend avec impatience de pouvoir observer les premiers signaux du projet GRAND.

La période 2020-2021 a été mise à profit au LPNHE pour développer des méthodes d'analyse et de reconstruction des données, en particulier à travers les travaux de thèse de V. Decoene et S. Chiche, menés en co-tutelle avec l'IAP. V. Decoene a montré à l'aide de simulations que dans le cas de gerbes très inclinées comme celles ciblées par GRAND (figure ci-dessus), les temps d'arrivée de l'émission radio sur les antennes pouvaient être décrits avec un excellent accord par un front d'onde sphérique, dont la position du point source était fortement corrélée à la nature de la particule primaire. En associant cette information à un modèle décrivant la carte d'amplitude de la radiation radio au sol (figure ci-contre), V. Decoene a pu obtenir à

partir de simulations intégrant des incertitudes réalistes sur les performances du détecteur, une précision de 0.1° sur la direction d'origine de la particule cosmique. S. Chiche a pour sa part optimisé un outil de simulation initié au LPNHE et baptisé *Radio Morphing*, qui permettra de calculer la réponse des antennes dans un temps ~ 1000 fois plus court que pour les simulations Monte Carlo, avec une précision sur l'amplitude de l'ordre de 10%.



Empreinte au sol du signal radio d'une gerbe induite par un neutrino de 10^{19} eV, d'après simulation. Chaque point représente l'amplitude du signal attendu en sortie d'une antenne fonctionnant dans la gamme de fréquence 50-200 MHz. La trajectoire du neutrino est indiquée par une ligne pointillée rouge.

Enfin, un nouvel axe de travail, centré sur la discrimination par des méthodes innovantes (*Machine Learning*) entre impulsions induites par les gerbes atmosphériques et sources de bruit de fond, vient de débiter au sein du groupe avec l'arrivée de S. Le Coz. Cet axe sera renforcé au printemps prochain avec le démarrage d'une collaboration avec le Karlsruhe *Institute of Technology* soutenue par l'ANR.

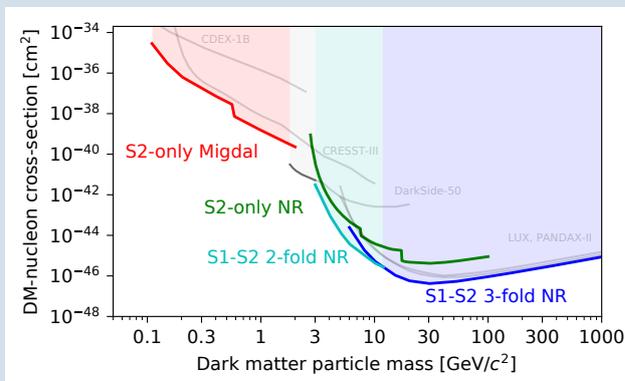
- Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :**
 Julien Bolmont, Simon Chiche (doctorant co-tutelle IAP),
 Valentin Decoene (doctorant co-tutelle IAP), Sandra Le Coz,
 Jean-Philippe Lenain, Olivier Martineau
- Équipe technique :**
 Jean-Marc Colley, Vincent Voisin

CHIFFRES CLEFS

300 antennes sur **200 km²**
10⁶ rayons cosmiques attendus
 une résolution angulaire de **0.1°**
 sur la direction d'origine des particules cosmiques

Recherche directe de matière noire avec le détecteur XENON

Développé par la collaboration XENON pour la recherche directe de matière noire, notamment les WIMPs, XENON1T, dont la prise de données s'est achevée fin 2018, visait 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. XENON1T a atteint une sensibilité record sur la gamme $100 \text{ MeV}/c^2 - \text{TeV}/c^2$ (figure ci-dessous). Si aucun signal n'a été trouvé, un excès de signal de reculs électroniques, susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle physique (axions produits dans le soleil, moment magnétique du neutrino, ...), a été annoncé en octobre 2020.



A gauche, limite (90% CL) de la section efficace SI (spin-independent) WIMP-nucléon en fonction de la masse du WIMP obtenue par XENON1T en tenant compte du bruit de fond des neutrinos. Le point noir indique une matière noire qui a un spectre de recul et un taux identique aux neutrinos du ^8B . À droite, état de l'art de la limite (90% CL) de la section efficace SI WIMP-nucléon en fonction de la masse du WIMP obtenue par XENON1T.

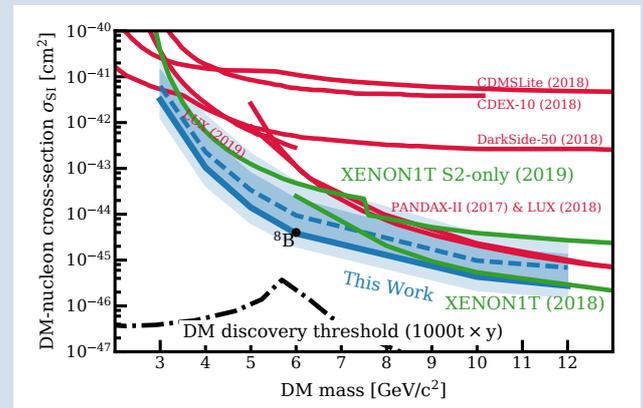
L'étude de cet excès vient ainsi enrichir les objectifs initiaux, communs à XENON1T et XENONnT, son successeur, d'exploration de modèles de matière noire : *Axion-Like Particles*, axions solaires, *dark photons*

et autres modèles de matière noire leptophilique, sans et avec dépendance au spin, avec médiateur lourd ou léger.

XENONnT, qui a démarré sa prise de données en 2022, permettra de valider les mesures de XENON1T telles que l'excès de signal de reculs électroniques et le très rare phénomène de la double capture électronique avec émission de deux neutrinos dans le ^{124}Xe , présentant la plus longue demi-vie jamais mesurée directement.

Il sera le premier détecteur de matière noire sensible aux neutrinos solaires, constituant, pour ce type de détecteur, un bruit de fond irréductible (les premiers résultats de XENON1T sont visibles sur la figure ci-dessous).

Impliquée dans le projet depuis des années, l'équipe XENON du LPNHE y contribue sur quatre axes complémentaires tout en coordonnant les groupes de travail sur le traitement du xénon liquide et du *computing*.



Détecteur

ReStoX2, le nouveau système de stockage et récupération de XENONnT (figure ci-après), permet de recueillir jusqu'à 10 tonnes de xénon, en phase liquide, solide ou gazeuse. En fonction depuis 2018, la procédure de récupération et dépressurisation automatique a depuis encore été optimisée.



Le système de stockage xénon ReStoX2 dans les sous-sols du LNGS.

Calcul et traitement des données

Responsable du développement du système de distribution et traitement des données, l'équipe y a fortement contribué. Les ressources de la grille de calcul du CC-IN2P3 mobilisées représentent annuellement 1,2 Po de stockage de données brutes et traitées de XENONnT et 12 millions d'heures de CPU de calcul (HS06.h) intégrées.

Assuré par un logiciel développé et maintenu par le LPNHE, le système de distribution des données interface le système d'acquisition et les outils de management de données (cf. Rucio, développé par le CERN) sur la grille.

L'équipe a également développé un système de suivi de qualité des données et contribue à l'amélioration des logiciels de traitement.

Analyse

L'équipe travaille surtout sur la recherche de matière noire leptophilique sub-GeV, où le signal d'ionisation attendu est de l'ordre de quelques électrons. Le bruit de fond dominant vient des électrons solitaires dont l'origine est encore sujet d'analyse et de débat. Il nous permet toutefois d'améliorer la caractérisation du détecteur aux faibles énergies. Un riche papier d'analyse est en préparation qui montrera les limites d'exclusion pour la diffusion de matière noire sur les électrons, le dipôle électrique, magnétique, les interactions anapôles, modèles de matière noire bosoniques (*dark photons*, *dark photons* solaires, ALPs).

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

Sid El Moctar Ahmed Maouloud, Bernard Andrieu, Erwann Masson, Luca Scotti Lavina, Jean-Philippe Zopounidis

Équipe technique :

Olivier Dadoun, Romain Gaior, Olivier Spiga, Patricia Warin-Charpentier

CHIFFRES CLEFS

Sensibilité aux WIMPs à partir de **100 MeV**

Le plus important des détecteurs en activité avec **8 tonnes** de xénon liquide

Futurs projets

DARWIN, avec 50 tonnes de xénon liquide, 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 décroissance beta sans neutrino et double capture électronique.

Impliquée dans le projet depuis des années, l'équipe coordonne le groupe de travail sur le traitement du xénon liquide.

Pour XENON et DARWIN, 2021 a été une année riche en termes de développements de relations internationales :

- en Juillet, le LPNHE a signé, avec des membres des Collaborations XENON, DARWIN et LZ un mé-

morandum d'accord pour s'engager à construire ensemble le détecteur de matière noire de prochaine génération ;

- en Octobre, l'équipe XENON est devenue membre du Laboratoire International ILANCE, une coopération entre le CNRS et l'Université de Tokyo ;
- enfin, DARWIN est inclus dans le programme scientifique du IRL DMLab, un partenariat entre le CNRS et la fondation Helmholtz.

Enfin l'équipe débute une activité instrumentale au sein du laboratoire avec XeLab, un laboratoire cryogénique muni d'une TPC double phase de quelques kilos de xénon qui permettra d'étudier les problématiques des détecteurs de nouvelle génération (mécanismes de production des électrons solitaires, électrodes...).

Du secteur sombre au WIMP léger, recherche de matière noire avec le détecteur DAMIC-M et la chambre bas bruit (LBC)

Organisation

L'équipe DAMIC du laboratoire est impliquée dans un ensemble de projets visant à observer les interactions d'un éventuel secteur sombre avec la matière ordinaire ou celle de WIMP léger de masses comprises entre 1 et 10 GeV. Issu d'une collaboration très étroite entre le LPNHE et l'Université de Chicago ces projets utilisent 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.

Financées en France par l'*European Research Council* (ERC) et aux USA par la *National Science Foundation* (NSF), pour un montant total d'environ

10 MUSD nos recherches s'articulent sur une amélioration du détecteur DAMIC@SNOLAB situé à SNOLAB au Canada, l'installation d'un prototype bas bruit du détecteur DAMIC-M (*Low Background Chamber* ou LBC) dans le laboratoire souterrain de Modane et le développement de l'électronique et du système de contrôle de l'expérience finale DAMIC-M qui sera elle aussi installée à Modane en 2023.

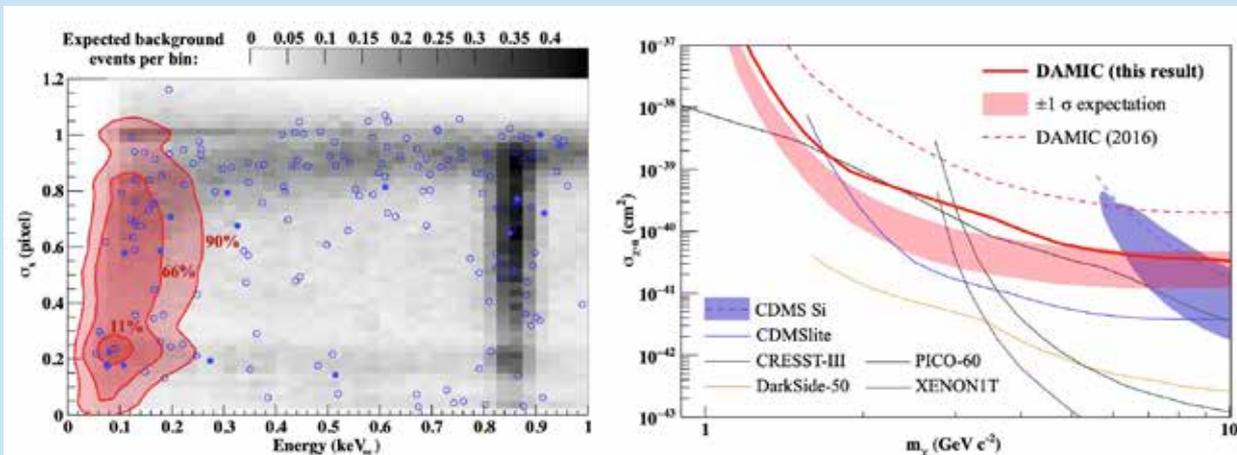
Outre trois permanents, l'équipe comprend 3 étudiants en thèse, un post-doc et une solide équipe technique en électronique. Les points forts de nos contributions techniques concernent le développement d'une électronique de lecture ultra-bas bruit à même de tirer le meilleur parti des CCD innovantes que nous utilisons.

Les projets

Notre objectif scientifique est la détection d'interactions de particules de matière noire (ou du secteur sombre en général) avec la matière ordinaire qui compose nos détecteurs (électrons et noyaux de silicium). 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. La communauté s'intéresse aujourd'hui à des modèles de matière noire dont le mode de production initial n'est pas 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 cinquième force. Dans ce cadre théorique élargi, l'échelle de masse de la matière noire couvre 80 ordres de grandeur et le mode d'in-

teraction n'est plus majoritairement lié à la matière baryonique mais inclut également les photons et les leptons.

Devant un champ expérimental aussi vaste de nombreux projets de recherches distincts des détecteurs super massifs à liquide noble centrés sur la recherche de WIMPS ont vu le jour. Parmi eux les détecteurs des projets DAMIC sont constitués de dispositifs à couplage de charge (CCD) dont l'épaisseur, habituellement de quelques dizaines de microns, est de près d'un millimètre. Dotés d'une excellente résolution spatiale (inférieure à 10 microns), d'un seuil en énergie de 40 eV (pour les CCD initiaux de DAMIC@SNOLAB) à quelques eV (pour la nouvelle génération de CCD dits *skipper*, voir encadré) et d'une grande pureté, les CCD offrent des performances de recherches inégalées dans le domaine de 1 à 10 GeV pour les WIMPS, d'un eV au keV pour les photons du secteur sombre ou du MeV au GeV pour la matière noire leptophilique.



A gauche, distribution des dépôts d'énergie observés par DAMIC@SNOLAB entre 0 et 1 keV. Les points bleus (vides et pleins) sont les dépôts mesurés, le fond gris représente les prédictions du modèle de bruit de fond. La zone rouge montre l'excès observé à basse masse par rapport aux prédictions du modèle de bruit de fond. Cet excès est en cours d'étude à SNOLAB. A droite, limites en masse des WIMPs versus section efficace obtenues par l'expérience DAMIC@SNOLAB avec d'autres résultats expérimentaux.

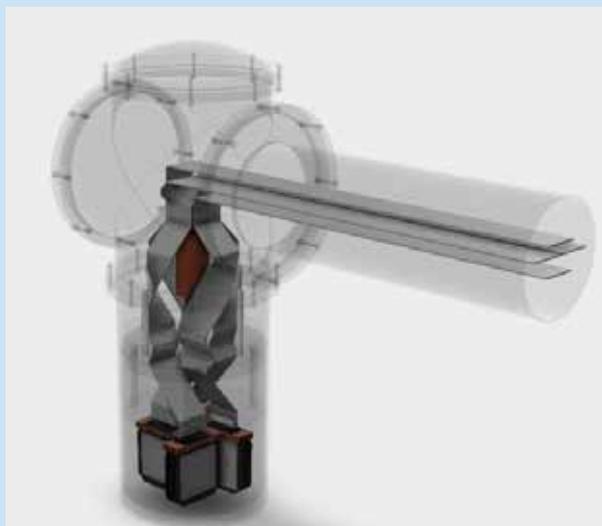
Nos travaux s'articulent autour de 3 projets distincts :

1 - La jouvence du détecteur installé à SNOLAB. Nous remplaçons les CCD de première génération que nous avons utilisés entre 2016 et 2019 par des prototypes de CCD "skipper" comme ceux que nous utiliserons pour les expériences à Modane. L'objectif, en abaissant le seuil de détection en énergie, est d'étudier l'excès d'événements à basse énergie que nous avons observé (et publié) dans notre campagne de 2017-2019 (figure ci-dessus).

2 - L'installation d'une chambre bas bruit (LBC) dans le laboratoire souterrain de Modane pour tester les choix de conception que nous faisons pour l'expérience finale (DAMIC-M). L'objectif est de réduire le bruit de fond de l'expérience qui était de 10 DRU (Differential Rate Unit) à SNOLAB à 1 DRU. Le DRU est une unité de comptage qui correspond à un événement par jour, par intervalle d'un keV et par kilogramme de détecteur. L'objectif pour DAMIC-M étant de 0,1 DRU.

3 - La mise au point, les tests des CCD skipper de DAMIC-M, le développement d'un système de contrôle et d'acquisition ultra bas bruit pour tirer parti

de la résolution en énergie et abaisser le seuil de détection en énergie de DAMIC-M à quelques eV, la préparation de l'installation du détecteur final en 2023. Le détecteur DAMIC-M sera composé de 50 CCD skipper pour une masse totale d'environ 1 kg (figure ci-dessous).



Modèle informatique permettant l'étude des performances et du niveau de bruit de fond pour la future expérience DAMIC-M.

Développements Techniques

Pour abaisser le seuil de détection de l'expérience à quelques eV, il est nécessaire de pouvoir compter avec précision le nombre de paires électron-trou (électrons) créées lors d'une interaction dans le cœur des CCD. La résolution en énergie de la chaîne de lecture des CCD de DAMIC@SNOLAB correspond à un peu moins de 2 électrons soit 7 eV ce qui place le seuil de détection à environ 50 eV (7σ pour garantir l'absence de bruit de fond lié à la lecture d'environ 10^{12} pixels). Pour abaisser ce seuil à 5 eV, il est nécessaire de résoudre l'énergie déposée lors d'une interaction avec une précision de 0,7 eV soit 0,2 électron. C'est ce que permet la technologie *skipper* CCD (voir encadré).

Nous avons poursuivi les développements en micro-électronique. Sur le *front-end*, le *chip* CROC (CCD Read Out Chip) a évolué vers une version 2 puis 3 encore en développement. La technologie purement différentielle envisagée se heurte à des problèmes de stabilité de la référence et les deux premières versions n'ont pas atteint les performances attendues. En parallèle une version simplifiée DCA (*Differential CCD Amplifier*) a été développée et entre en phase de tests après retour de la fonderie. La carte de séquençage du CCD (contrôle et production des biais

et des horloges permettant le fonctionnement et la lecture des CCD) basée sur les puces CABAC développées au LPNHE est en phase finale de conception et en tests de performances.

Nous avons conçu et installé 3 bancs de test cryogéniques au LPNHE à l'intérieur d'une salle blanche dédiée. L'un de ces bancs est alimenté par une ligne à azote liquide. Ils permettent les tests d'électronique et la mesure des performances des systèmes de lecture et de leurs paramètres grâce à une suite logicielle développée par nos soins. Pour la LBC nous avons développé et assemblé (en collaboration avec l'ETH Zurich) un système de *monitoring* et de *slow control*. L'installation dans le laboratoire de Modane a requis la création d'une nouvelle salle blanche dont nous avons supervisé la construction. Nous sommes actuellement fortement engagés dans le montage de la LBC (blindage, cryostat, électronique). Cette expérience devrait prendre ses premières données en décembre 2021. Nous en attendons une confirmation de nos choix de conception pour DAMIC-M (entre autre mesures des courants de fuite et du fond radioactif) et une première moisson de résultats scientifiques (limites en WIMPS, *dark photon* et DM leptophilique) avec deux CCD prototypes de DAMIC-M.

Les CCD *skipper*

Gravés sur la galette de silicium en même temps que la structure du CCD, des amplis de lecture sont situés aux quatre coins du réseau de pixels. Les électrons déplacés vers puis diffusés sur la grille de ces amplis sont convertis en tension puis déchargés hors du détecteur. Cette lecture unique est limitée par le bruit thermique et le bruit en $1/f$ du système qui impose un temps de lecture optimal en deçà duquel le bruit thermique domine et au delà duquel le bruit en $1/f$ est prépondérant. La technologie des CCD *skipper* utilise des amplis à grille flottante qui mesurent la charge des électrons par effet capacitif. On peut donc déplacer ceux-ci sous la grille et les reprendre autant de fois que l'on veut. Ainsi une lecture individuelle courte limitant fortement le bruit en $1/f$ peut être répétée un nombre arbitraire de fois pour être moyennée et réduire le bruit thermique. L'équipe du LPNHE a obtenu une résolution de 0,07 électron grâce à cette technique.

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

Latifa Khalil, Antoine Letessier Selvon, Ariel Matalon, Giorgos Papadopoulos, Paolo Privitera, Joao Da Rocha, Michelangelo Traina, Jean-Philippe Zopounidis

Équipe technique :

Philippe Bailly, Julien Coridian, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, Romain Gaior, Hervé Lebbolo, David Martin, Philippe Repairin

CHIFFRES CLEFS

Masse finale du détecteur :

1 kg de CCD

Objectif de bruit de contamination :

< 0,1 événement par jour par kilo et par keV

Objectif de résolution en énergie :

< 0,1 électron

A la recherche de WIMPs avec l'expérience DarkSide

DarkSide est une expérience de recherche de WIMP utilisant un chambre à projection temporelle (TPC) à double phase qui utilise de l'argon (liquide et gazeux).

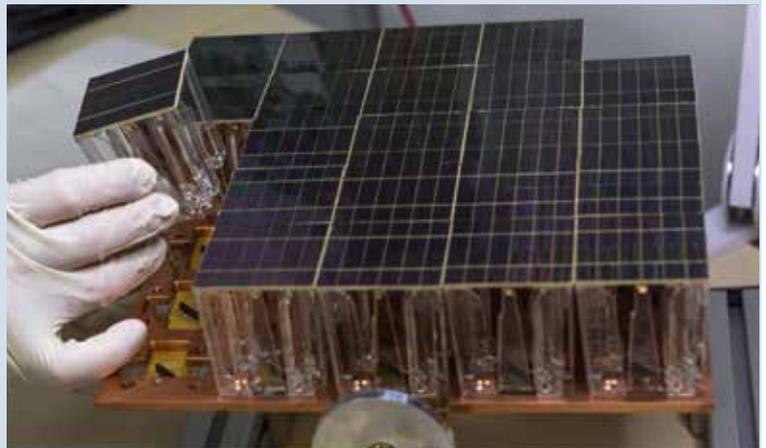
Elle se déroule actuellement au laboratoire du Gran Sasso avec un détecteur de 50 kg, tandis qu'une TPC beaucoup plus grande, de 20 tonnes, est en cours de construction et devrait recueillir des données à partir de 2024.

Après avoir contribué fortement à l'analyse de DarkSide-50 de basse masse, qui utilise le seul signal d'ionisation, le groupe du LPNHE travaille maintenant à une nouvelle analyse de ces données qui inclut une meilleure calibration de la réponse de l'argon aux reculs électroniques et nucléaires, basée sur les données de l'expérience ARIS à l'IPNO, sur une meilleure estimation des bruits de fond et sur une évaluation plus complète des possibles signaux qui donneront un excès d'événements dans cette région.

En parallèle, le groupe est impliqué sur la définition de la contribution française à DarkSide-20k (figure ci-dessous), une TPC à argon liquide avec une masse fiducielle de 20 tonnes qui est construite par une collaboration internationale incluant tous les groupes travaillant sur la recherche de matière noire avec l'argon liquide. Une des principales différences entre DarkSide-50 et DarkSide-20k

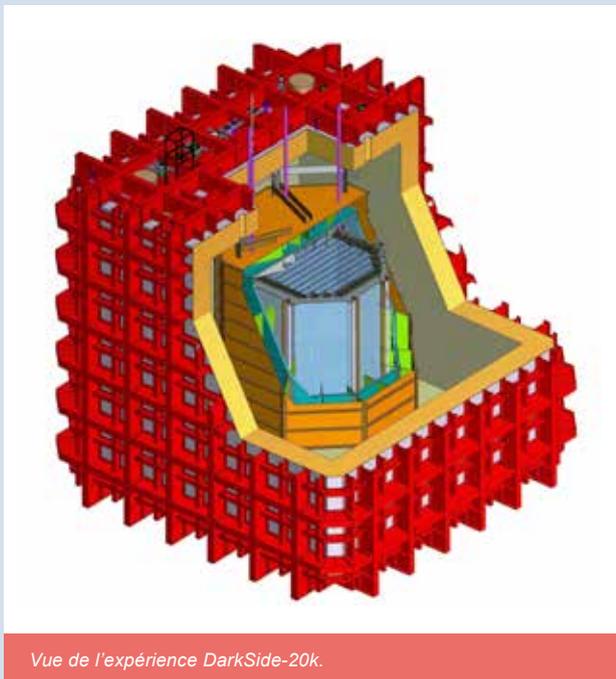
sera l'utilisation des matrices des *Silicon Photomultiplier*, SiPM (figure ci-dessous), à la place des PMTs pour la détection des photons émis par des reculs électroniques ou nucléaires dans l'argon Liquide.

Les groupes de l'APC, du CPPM et du LPNHE travaillent sur le développement du système de calibration pour DarkSide-20k et sont responsables de la reconstruction. Notamment au LPNHE, le travail se concentre sur la reconstruction de la position pour un signal d'ionisation ou de scintillation et sur l'opti-



Matrice de 25 modules de photo-détecteur (PDM) avec chacun 24 photomultiplicateurs silicium (SiPM).

mise des algorithmes pour distinguer les reculs nucléaires des reculs électroniques, basée sur l'étalement en temps des signaux de scintillation.



Vue de l'expérience DarkSide-20k.

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

Claudio Giganti, Julie Rode

Équipe technique :

Olivier Dadoun

CHIFFRES CLEFS

50 tonnes
d'argon appauvri en ^{39}Ar

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
- Une nouvelle ère de précision en physique des neutrinos : de T2K à HK
- Recherche d'un signal de physique au-delà du Modèle Standard avec COMET
- Phénoménologie et Modélisation en Physique des Particules
 - Le moment magnétique anormal du muon a_μ
 - Physique hadronique



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. Pour essayer de les cerner, plusieurs lignes de recherches 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, 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, à l'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, à l'électron, qui entre dans la constitution des atomes, correspondent deux autres particules plus lourdes, le muon et le tau, chacun avec sa saveur.

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 (photo ci-contre) étudie entre autre 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 approfondies. L'expérience prépare une jouvence majeure du détecteur pour faire face à une forte augmentation de l'intensité des faisceaux, et donc du taux des événements: le laboratoire est très impliqué dans le développement de l'électronique de lecture pour un nouveau trajectographe qui sera déployée et opérationnelle en 2022.

En parallèle, grâce à un financement ERC *Starting Grant*, un projet très innovant a été lancé : *Real Time Analysis* (RTA, analyse en temps réel). Il s'agit d'une ferme de calcul basée sur une architecture hybride, en particulier avec des 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 pour un volume de données de 32 Tb/s 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 a été noué, qui est appelé à se développer dans les années prochaines. Après l'approbation par la collaboration LHCb de RTA avec l'option GPU, ce projet rentre dans sa phase de mise en service en 2022, avec l'appui des ressources techniques du laboratoire.

Un autre axe de recherche 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 neutrino lors de sa propagation), démontre que ceux-ci ont une masse non nulle. L'origine de cette masse, par ailleurs inférieure par plusieurs ordres de grandeur à celle 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 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 et réalisation des cartes électroniques pour de nouvelles chambres à projection temporelle. La production de ces cartes est terminée, la prochaine phase est l'installation des nouveaux détecteurs au Japon en 2022, sous le *leadership* d'un membre du LPNHE.

L'annonce récente de l'approbation de l'expérience Hyper-Kamiokande, avec une masse cinq 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 (photo ci-avant) prépare sa participation à cette expérience dans le domaine de la synchronisation précise de la référence de temps pour l'électronique frontale, en synergie avec les autres laboratoires français impliqués.

Un dernier volet de ces recherches concerne l'expérience COMET, située dans le laboratoire JPARC 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 avec 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.

LHCb : Physique des saveurs lourdes au LHC

L'expérience LHCb et sa jouvence

L'expérience LHCb est conçue essentiellement afin d'étudier la physique des saveurs. La structure du détecteur LHCb, un spectromètre à bras unique situé vers l'avant, est due au fait qu'au LHC les paires de hadrons beaux et charmés 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 élé-

Analyse de physique et fonctionnement de l'expérience

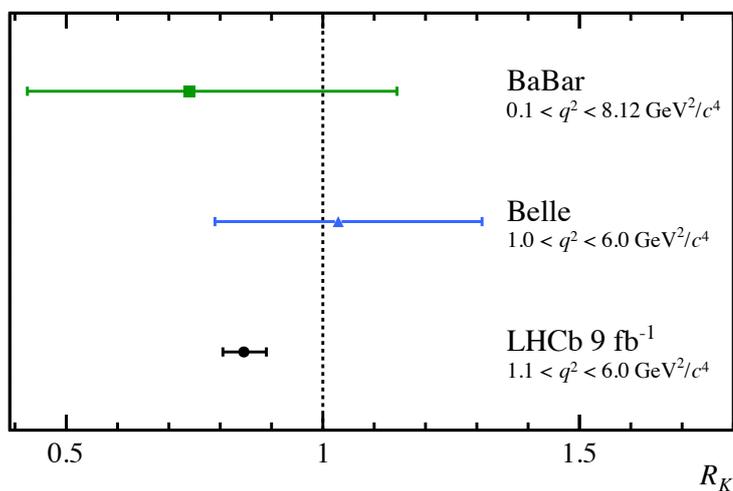
Les analyses de physique effectuées dans le groupe portent essentiellement sur deux axes : l'étude de l'universalité et de la violation de la saveur leptonique, utilisant essentiellement des désintégrations semi-leptoniques du type $b \rightarrow s\ell + \ell^{(\prime)}$ ($\ell^{(\prime)}$ = lepton chargé) et $b \rightarrow c\ell + \nu$, et l'étude des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. L'étude des canaux de type $b \rightarrow s\ell + \ell^{(\prime)}$ est l'un des sujets phares de l'expérience LHCb. Dans le Modèle Standard, lorsque ℓ et ℓ' ont la même saveur leptonique, le processus fait intervenir uniquement les diagrammes dits pingouins 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

ment, le détecteur de lumière Cherenkov 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 dérives 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 de terminer son évolution 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 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.



Le dernier résultat obtenu par LHCb pour le rapport R_K , montré aux Rencontres de Moriond 2021 [arXiv:2103.11769] confirme les tensions observées auparavant avec les prédictions du Modèle Standard, où une universalité leptonique est attendue. Le résultat de LHCb est à 3,1 déviations standards de l'unité. La figure montre une comparaison avec les résultats obtenus par les expériences BaBar et Belle. 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 mesures. Les tests d'universalité leptoniques et les tensions correspondant avec le Modèle Standard motivent les recherches directes de violation de la saveur leptonique avec des leptons chargés. Le groupe du LPNHE a entrepris plusieurs analyses de ce type.

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. Le dernier résultat obtenu par LHCb pour le rapport R_K est présenté sur la figure ci-contre. 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 : $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$ 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 groupe effectue également un test de la violation de l'universalité leptonique dans les ca-

●●●

naux 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 $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$. Finalement, nous effectuons des tests de la violation de l'universalité leptonique aussi dans d'autres secteurs que celui du quark beau : la mesure du rapport entre les taux des désintégrations $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$ et $D^0 \rightarrow h^+ h^- e^+ e^-$ ($h = K, \pi$), et celui entre $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ et $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$.

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 $B_{d,s} \rightarrow K^0_S h^+ h^-$, ($h^{(\prime)} = K, \pi$) 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 en 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. Nous effectuons également des études phénoménologiques sur l'extraction de l'angle γ utilisant les désintégrations de B en trois particules non-charmées.

Des membres du groupe ont assuré en 2020 et 2021 de nombreux rôles de responsabilité dans la collaboration LHCb. Nous rappelons ici en particulier les rôles de coordinateur de la physique, coordinateur du bureau *Early Career, Gender & Diversity*, adjoint au coordinateur des opérations 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. 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 un financement ERC *Consolidator Grant* (en cours) et un autre auprès de l'ANR (terminé).

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

Le premier trajectographe de LHCb n'est pas adapté à la prise de données qui aura lieu à partir de 2022, 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 système, appelé SciFi, basé sur trois stations composées de fibres scintillantes lues à leurs deux extrémités par des photomultiplicateurs en silicium (SiPM). La photographie ci-contre montre des stations du SciFi qui sont en train d'être intégrées. 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*.

Nous avons une activité autour de l'électronique de *Back End*. Le LPNHE est impliqué dans le dévelop-

pement et l'implémentation du microcode des cartes PCIe40, spécifique au système SciFi, ainsi que du test des logiciels d'acquisition dédiés. Nous développons le système de *monitoring* du SciFi. Un ingénieur du groupe est le coordinateur de l'électronique *Back End* du SciFi dans la collaboration LHCb.

Les modules du détecteur SciFi, sont actuellement en fin de phase de montage et d'intégration dans le détecteur.



Les modules du détecteur SciFi, en phase de montage dans la cave de l'expérience LHCb. Elle montre six éléments dits « C-Frames » (en 12 couches), et la ligne de tube à vide du LHC.

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.

La conception d'un système de déclenchement entièrement logiciel pouvant assurer, avec le flux de données envisagé, les performances physiques requises présente un réel défi. Une contribution du LPNHE afin de relever ce défi est le projet Allen, qui permet 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. En juin 2020, la collaboration LHCb a fait le choix de cette technologie pour le système de déclenchement pour la jouvence du détecteur. Un schéma de ce système de déclenchement, incluant la partie Allen, est montré sur la figure ci-dessous.



Les physiciens du LPNHE (à présent ou précédemment) travaillant sur le système de déclenchement pour la jouvence de LHCb, lors de la première prise de données avec ce système, le 30 octobre 2021, pendant la campagne des faisceaux tests. Le premier niveau du système de déclenchement (HLT1) est basé sur le projet « Allen » dont l'équipe du LPNHE a été protagoniste. Il s'agit du premier système complet de déclenchement à haut débit, entièrement basé sur GPU, pour une expérience de physique de hautes énergies.

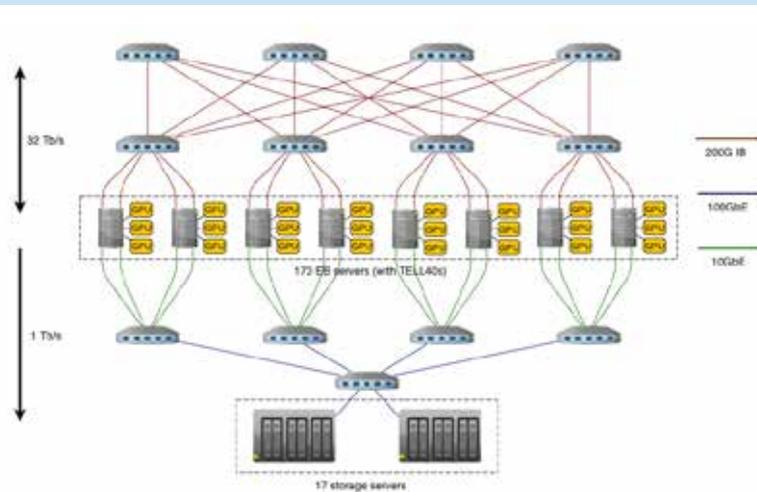
Le groupe du LPNHE a effectué plusieurs autres contributions techniques au projet RTA, parmi lesquelles nous comptons le travail autour de la reconstruction des traces sur GPU, entre autres, à l'aide d'un algorithme à base de calcul parallèle. Ces développements, utilisant des méthodes sophistiquées, 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. D'autres contributions du groupe consistent en développement d'outils de simulation d'Allen, en tests des cartes GPU, leur installation, la vérification de leur performance, et l'assurance de la qualité des données. La photographie ci-dessus montre l'équipe lors de la première prise de données des faisceaux tests, avec le nouveau système de déclenchement.

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

Christina Agapopoulou, Renaud Amalric, Eli Ben-Haïm, Emilie Bertholet, Pierre Billoir, Lucas Calefice, Matthew Charles, Luigi Del Buono, Marianna Fontana, Tommaso Fulghesu, Vladimir Gligorov, Thomas Grammatico, Francesco Polci, Renato Quagliani, Florian Reiss, Arnaud Robert, Alexandre Scarabotto, Da-Yu Tou, Dorothea vom Bruch, Steffen Weber

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reyre, Nabil Garroum, Olivier Le Dortz, Jean-Luc Meunier, Diego Terront



La partie haute du schéma illustre le débit de 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.

CHIFFRES CLEFS

Le premier niveau du déclenchement (HLT1) pour la jouvence de l'expérience LHCb est conçu pour traiter un flux de données de **32 Tb/s**, comparable à **10%** du flux de données sur internet dans le monde entier en 2018.

Une nouvelle ère de précision en physique des neutrinos : de

Le groupe LPNHE-neutrino (photo ci-dessous) poursuit sa participation active à l'expérience T2K en contribuant à l'exploitation du détecteur proche (ND280), au développement des algorithmes de reconstruction et à l'analyse des données ainsi qu'à la préparation de publications scientifiques. Le groupe joue en particulier un rôle de premier plan dans la mise à niveau du détecteur ND280 et dans la partie du programme scientifique de l'expérience NA61/SHINE au CERN relative aux neutrinos.

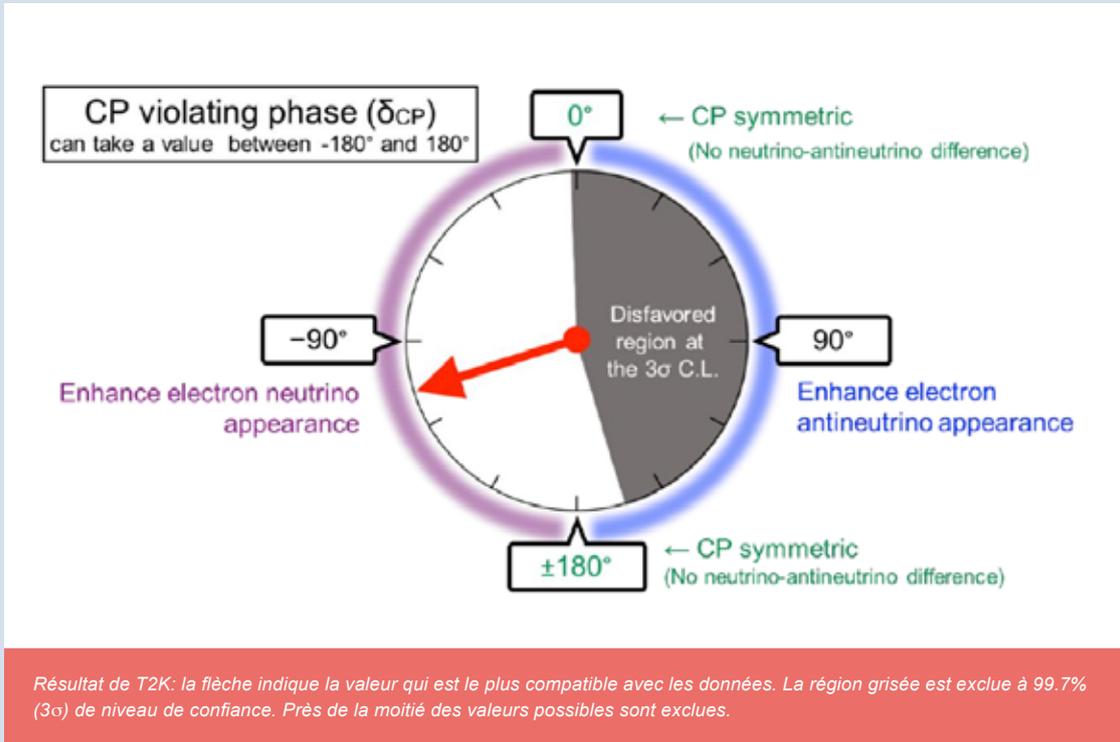


Couverture de la revue "Nature", 16 avril 2020.

Des résultats très importants ont été obtenus et publiés au cours des deux dernières années. En particulier, profitant de l'analyse combinée de l'apparition de ν_e dans un faisceau de ν_μ et de $\bar{\nu}_e$ dans un faisceau de $\bar{\nu}_\mu$ ainsi que de la disparition des ν_μ et des $\bar{\nu}_\mu$, la collaboration T2K a publié dans la revue "Nature" (photo ci-dessus) de nouveaux résultats excluant certaines régions possibles pour la phase de violation de CP δ_{CP} à 3σ (figure ci-après). La valeur de δ_{CP} la plus probable dans cette analyse est proche de $-\pi/2$, ce qui correspond à la violation maximale de la symétrie CP. Si cela était confirmé, cela permettrait une découverte précoce de la violation de CP dans le secteur des leptons dans le cadre du projet T2K-II d'abord, mais surtout de Hyper-Kamiokande.

jusqu'à environ 5%, ce qui est sans précédent pour les expériences utilisant des neutrinos produits par accélérateur. Cette amélioration est également importante pour les mesures précises des sections efficaces d'interaction des neutrinos, autre source importante d'incertitude systématique.

La deuxième étape de l'expérience, T2K-II, récemment approuvée au Japon, permettra de pousser plus loin ces améliorations par l'adjonction de nouveaux détecteurs dans ND280. Dans ce cadre, le groupe du LPNHE assure un rôle de coordination pour la mise à niveau du ND280 et contribue au développement et à la production de l'électronique de lecture pour les nouvelles chambres à projection temporelle dites à



grand angle (HA-TPC), c'est-à-dire permettant la mesure des traces de particules chargées à grand angle par rapport à la direction du faisceau, traces sur lesquelles le ND280 initial était inefficace.

La contribution technique apportée par l'équipe du LPNHE s'est tout d'abord centrée sur la conception et la fabrication des cartes *front-end* (FEC) qui seront connectées au plus proche des capteurs des nouvelles TPC. Chaque carte FEC reçoit les signaux provenant du capteur (détecteur Micromegas) via les 576 voies d'entrée analogiques à faibles niveaux, les met en forme et les mémorise par le biais de 8 circuits ASIC dédiés. Après réception d'un signal de déclenchement externe correspondant à un événement significatif, les signaux analogiques mémorisés sont numérisés sur 12 bits et transmis à l'électronique d'acquisition. Le design de ces cartes a été approuvé en octobre 2020 lors d'une revue d'experts de la collaboration. La production des 84 unités nécessaires est assurée par l'entreprise sous-traitante Oues-

tronic, dans laquelle un banc de test dédié a été installé pour valider les cartes après fabrication (photo ci-dessous). La production s'est étalée de fin 2020 à l'automne 2021. Les tests en faisceau sur un module complet (détecteur Micromegas + électronique *front-end* associée), réalisés en juillet 2021 à DESY-Hambourg, ont permis de valider le fonctionnement de l'ensemble du module, notamment le comportement des cartes FEC soumises à un champ magnétique constant de



0,2 T. Le *crosstalk* entre voies a été mesuré inférieur à 3% dans tous les cas de figure. *In fine* 64 cartes FEC équiperont les nouvelles TPC pour un total de 36864 voies de mesure. Les 20 cartes supplémentaires serviront de réserve pour la maintenance ainsi que pour équiper les différents bancs de test de la collaboration.

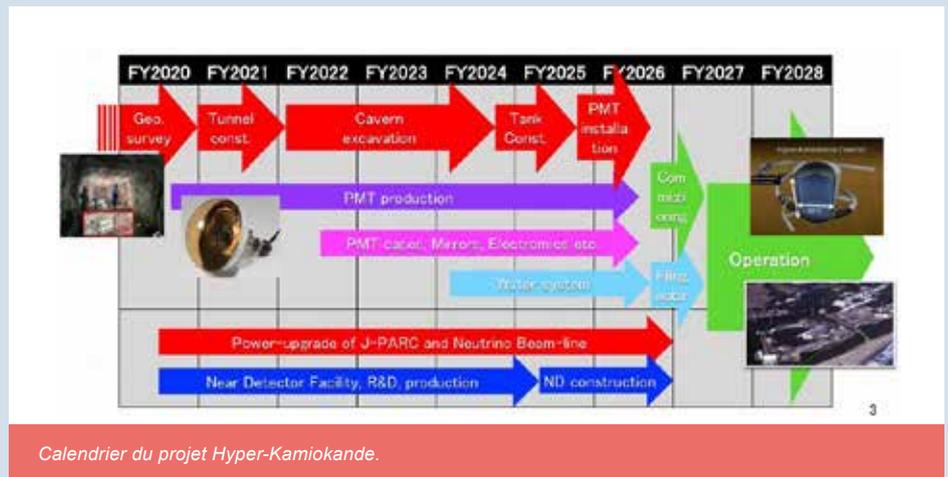
En second lieu l'équipe du LPNHE a participé, en collaboration avec l'équipe du CEA/Irfu, au design du capotage de refroidissement de ces cartes FEC et a procédé au suivi de leur production. Ces capots, fixés sur chacune des cartes FEC et usinés en aluminium Fortal, effectuent un couplage thermique avec les composants des cartes FEC émettant le plus de chaleur. Ils sont refroidis grâce à un serpentín, plaqué au capot et dans lequel circule de l'eau refroidie. La fabrication a porté sur un total de 80 pièces et a démarré par un premier lot de 8 pièces usinées au LPNHE au début de l'année 2021. L'entreprise sous-traitante Chanteloup-Associés a été sélectionnée pour l'usinage des 72 autres capots et soldera la production pour la fin de l'année 2021.

Le dernier élément de la contribution technique de l'équipe du LPNHE porte sur le développement *software* de l'acquisition des données (DAQ). Dans le cadre du module électronique *back-end* TDCM (*Trigger and Data Concentrator Module*), toutes les fonctions de configuration et de lecture, la concentration de données et le contrôle de l'interface avant et arrière, sont des activités coordonnées par l'intermédiation d'un module logiciel embarqué initié au CEA/Irfu, proposant un serveur de commandes qui interagit comme intermédiaire entre le micro-logiciel de la TDCM et la DAQ. Ce logiciel est actuellement limité à un seul processeur et en mode "baremetal" (sans système d'exploitation). Nous avons choisi de faire une proposition d'évolution vers un système hétérogène, Linux embarqué et "baremetal", supportant deux processeurs et intégrant des nouveaux mécanismes de coordination pour l'activation du processeur supplémentaire et pour la communication de messages entre les deux processeurs, appuyé sur une technologie récente du monde embarqué nommée *OpenAMP*, qui permet justement de traiter efficacement cette hétérogénéité pour des solutions multiprocesseurs.

Pour l'acquisition des données proprement dite, le LPNHE a pris la responsabilité de développer l'interface entre les concentrateurs de signaux numériques et l'enregistrement des données dans le cadre logiciel Midas. Ce programme a été testé avec succès lors des deux tests sur faisceaux réalisés à DESY (en juillet 2021) et au CERN (en novembre 2021) et a vocation à devenir le programme d'acquisition qui sera déployé lors de la mise en service des nouvelles HA-TPC.

L'installation du détecteur ND280 amélioré se fera en 2022, parallèlement à la modernisation du complexe d'accélérateurs J-PARC. Avant le début de l'exploitation du détecteur de nouvelle génération Hyper-Kamiokande, en 2027, nous prévoyons d'accumuler au moins 10^{22} p.o.t. (protons sur cible), ce qui permettrait de confirmer à 3σ l'indication de violation maximale de la symétrie CP présente dans nos données actuelles.

Hyper-Kamiokande (figure ci-dessous) sera non seulement le projet le plus sensible pour les me-



sures de la violation de CP, mais sera également un observatoire unique pour les neutrinos provenant de sources astrophysiques (permettant certaines synergies avec d'autres groupes du LPNHE) et pour la désintégration des protons. Le projet Hyper-Kamiokande – approuvé par le gouvernement japonais – est maintenant pleinement lancé, avec le début de la construction des infrastructures (tunnel d'accès et caverne) dès avril 2020. Le groupe du LPNHE a défini ses contributions potentielles à cette expérience autour du développement d'un système de distribution d'horloge et de synchronisation temporelle pour l'ensemble des photo-multiplicateurs (il y en aura jusqu'à 40.000 dans la version maximale).

Après une phase de R&D, la collaboration devrait trancher sur les différentes technologies et projets alternatifs proposés pour le détecteur. Dans ce cadre, le groupe LPNHE-HK coordonne les efforts de définition de la base de temps et de distribution de l'horloge. Cette partie est au cœur du détecteur puisqu'elle synchronise tous les modules frontaux qui lisent le signal des PMTs en établissant une base de temps commune. Le même système de distribution du temps sera utilisé pour déclencher les événements générés par l'accélérateur grâce à sa connexion au temps universel (UTC) acquis à partir des constellations de satellites de navigation tels que GPS et GALILEO.

Le système proposé peut être divisé en 3 parties. La première est composée d'une série d'horloges atomiques et de récepteurs GNSS (*Global Navigation Satellite System*) qui génèrent la base de temps locale de l'expérience en accord avec le temps UTC. L'horloge commune est intégrée dans les données de contrôle en utilisant la technique de récupération d'horloge et de données. Cette base de temps et les données associées sont ensuite distribuées à tous les modules de lecture au moyen d'un réseau de cartes de distribution. Cette méthode est très efficace car elle permet d'échanger des données et une horloge en utilisant un seul support de transmission tout en garantissant de très bonnes performances en termes de gigue et de stabilité de phase. La création du système de génération de base de temps est le fruit d'une collaboration du LPNHE et du laboratoire des Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE) de l'Observatoire de Paris, le laboratoire de référence pour les activités de métrologies sur le temps et les fréquences en France et dans le monde. Avec l'installation d'une antenne GNSS à Jussieu, la stabilité du système global constitué d'horloges atomiques et des antennes sera caractérisée en utilisant notamment une horloge Maser à Hydrogène Passive plus stable et le temps UTC(OP) provenant du

SYRTE par un lien optique *White Rabbit*. Les premiers tests et caractérisations sont en cours. Au-delà de la caractérisation fine des oscillations de neutrinos, à laquelle s'attache le groupe depuis plus de 10 ans dans T2K, Hyper-Kamiokande nous permettra d'élargir nos champs d'investigation, avec en particulier l'étude des neutrinos de supernovae et les études astrophysiques en mode dit multi-messager.

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

Pierre Billoir, Adrien Blanchet, Alain Blondel, Jacques Dumarchez, Claudio Giganti, Mathieu Guigue, Jean-Michel Lévy, Marco Martini, Lucile Mellet, Viet Nguyen, Boris Popov, Sergey Suvorov, Uladzislava Yevarouskaya, Marco Zito

Équipe technique :

Julien Coridian, Sébastien Lefèvre, Yann Orain, Jean-Marc Parraud, Julien Philippe, Eric Pierre, Stefano Russo, Diego Terront, François Toussenel, Vincent Voisin

CHIFFRES CLEFS

Le faible niveau d'incertitude systématique, **~5%**, sur les flux de neutrinos atteint dans T2K grâce à la prise en compte des mesures dédiées de hadroproduction dans NA61/SHINE

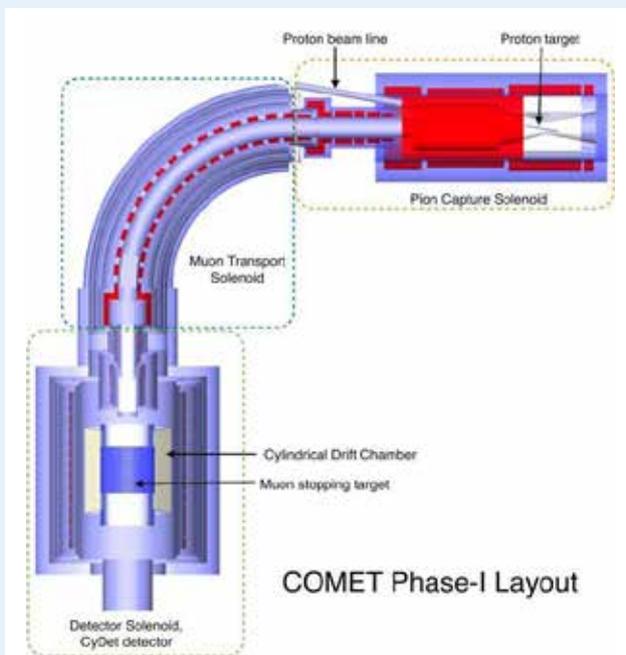
84 cartes électroniques de front-end ont été produites et testées pour la jouvence de ND280

10⁵ événements pourraient être détectés dans HK si une supernova explosait dans le centre galactique (à environ 10 kpc de distance)

Recherche d'un signal de physique au-delà du Modèle Standard avec COMET

La recherche d'événements rares, comme la transition cohérente de muons en électrons assistée par un noyau $\mu^- + N(A,Z) \rightarrow e^- + N(A,Z)$ violant la conservation de la saveur des leptons chargés (CLFV), 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 à un événement de 3×10^{-15} pour la Phase I et 3×10^{-17} pour la Phase-II. Si la Nouvelle Physique (NP) responsable du CLFV comprend également une source de Violation du Nombre Leptonique (LNV), l'atome muonique peut subir une transition à la fois CLFV et LNV ($\mu^- + N(A,Z) \rightarrow e^- + N'(A,Z-2)$). La mesure de ce type de signaux est à l'étude dans l'expérience COMET. Le signal expérimental étant moins propre que celui de la conversion cohérente car le positron émis n'est plus mono-énergétique et il y a plus de sources de bruit de fond. Une mise en évidence de la violation du nombre leptonique dans le secteur chargé pour des rapports d'embranchements supérieurs à ceux donnés en considérant l'oscillation des neutrinos contraindra les modèles théoriques. Dans le cas contraire les limites imposées donneront matière à réflexion aux physiciens.

La Phase-I (figures ci-dessous et photo ci-contre) permettra de caractériser le faisceau et les divers bruits



Installation de l'aimant de transport des muons dans le Hall COMET à J-PARC.

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. Avant la Phase-I, il est prévu d'effectuer un ensemble de préparatifs préliminaires, qui ont été appelés Phase- α . La Phase- α profitera de la livraison anticipée (2022) du faisceau de protons de 8 GeV (ligne-C) vers COMET (photo ci-après). L'expérience fonctionnera alors sans solénoïde de capture de pions en utilisant une cible de production de pions en graphite mince, des détecteurs de diagnostic à faisceau de protons et des détecteurs de particules secondaires.

Plan schématique de la Phase-I de l'expérience COMET. La Phase-I aura les sections de capture de pions et de transport de muons jusqu'à la fin du premier virage à 90° de l'expérience complète (Phase-II). Les muons seront alors arrêtés dans les cibles d'aluminium au centre d'une chambre à dérive cylindrique dans un champ magnétique de 1T.

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 utilisant entre autres l'homologie persistante ainsi qu'à la gestion du calcul et des simulations de l'expérience, en étroite collaboration avec les ingénieurs du CCIN2P3. Le stockage des productions massives de données simulées et leur partage, ainsi que l'accueil du *software* de l'expérience avec un espace de travail 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.

Les muons des rayons cosmiques peuvent se désintégrer en vol ou interagir avec les matériaux autour de la zone des cibles d'arrêt des muons et produire des électrons de type signal dans la région du détecteur. Dans le but de contrôler ce bruit de fond, un système de veto aux rayons cosmiques (CRV) est requis pour COMET. La collaboration COMET-France est fortement impliquée dans la simulation de ce bruit de fond et la conception d'un télescope pour échantillonner le flux de muons atmosphériques dans la zone expérimentale du détecteur COMET.

Il est à noter que dans le cadre d'une recherche de Nouvelle Physique, nous sommes aussi signataires de l'expérience g-2/EDM à J-PARC avec une contribution au *software* de reconstruction de traces et une aide à la simulation, en coordination avec le CCIN2P3.



Construction de la ligne de faisceau de protons (ligne-C) dans le hall expérimental de physique nucléaire de J-PARC. La ligne-C doit transporter le faisceau de protons de 8 GeV vers la cible de proton de l'expérience COMET. Les muons utilisés dans cette expérience sont générés à partir de la désintégration des pions produits dans la cible de proton. La construction de la ligne-C devrait être achevée en 2022.

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

Wilfrid da Silva, Frédéric Kapusta

Équipe technique :

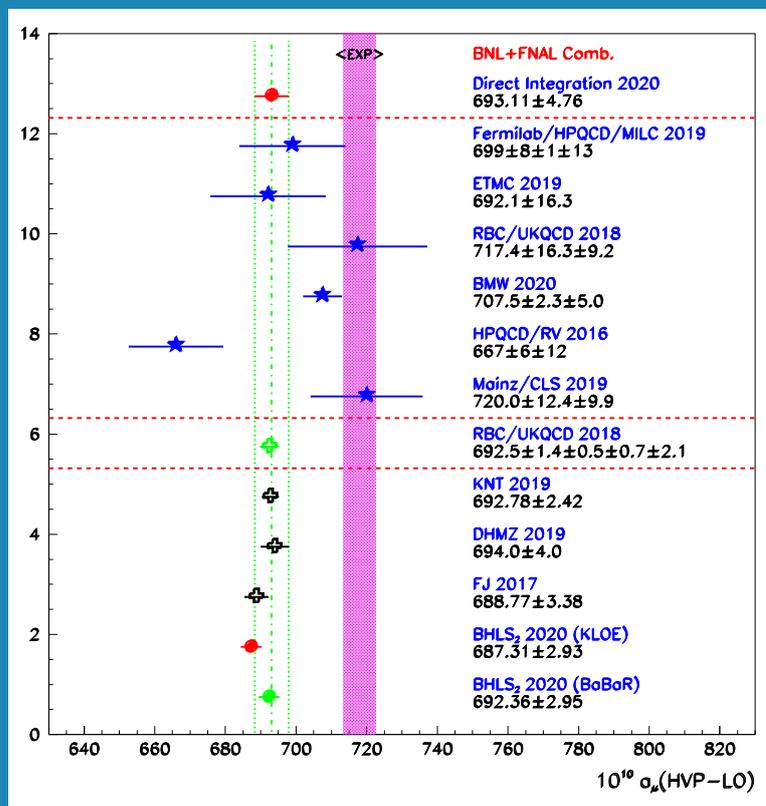
Patricia Warin-Charpentier

Le moment magnétique anormal du muon a_μ

La récente mesure de a_μ à FNAL, combinée à celle de BNL, donne une valeur située à plus de 4σ des estimations théoriques basées sur les méthodes dispersives. Ce désaccord est communément attribué aux contributions hadroniques à la polarisation du vide photonique (HVP) et/ou à la contribution dite *light-by-light* qui, par définition, pourraient omettre le signal d'une physique au-delà du Modèle Standard. Une collaboration commencée en 2012 entre le LPNHE (M. Benayoun et L. Delbuono) et F. Jegerlehner (DESY) a conduit à définir une nouvelle méthode d'évaluation de la HVP basée sur des Lagrangiens Effectifs déduits du modèle HLS par l'adjonction de mécanismes de brisure de symétrie ; ceux-ci permettent de définir une procédure d'ajustement simultané de toutes les

données d'annihilation e^+e^- à basse énergie. Le dernier en date de ces Lagrangiens confirme les conclusions du précédent – résumées dans l'édition précédente du Rapport d'Activités du LPNHE (2017-2019). Les spectres mesurés dans les annihilations $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- / K^+K^- / K_L K_S / \pi^+\pi^-\pi^0/\pi^0\eta\gamma$ (plus de 60) sont tous analysés dans des ajustements qui les incluent simultanément avec des probabilités supérieures à 90%. Ces ajustements montrent une tension importante entre les spectres di-pions de BaBar et de KLOE qui conduisent à préférer donner deux valeurs pour la HVP plutôt qu'une seule : $(692.36 \pm 2.95) \times 10^{-10}$ (BaBar) et $(687.31 \pm 2.93) \times 10^{-10}$ (KLOE). En prenant en compte les erreurs systématiques, les distances de ces prédictions à la valeur expérimentale de a_μ sont 4.1σ (BaBar) et 5.4σ (KLOE) ; la différence entre ces prédictions étant entièrement un effet de jeux de données et non de méthode. Ces prédictions de la HVP

sont portées au bas de la figure ci-contre avec les principales autres prédictions (voir également une partie de l'article "Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans l'expérience ATLAS" pages 61, 62 et 63).



Évaluations récentes de la HVP-LO en unités 10^{-10} . Tout en haut figure le résultat expérimental combinant les mesures de BNL et FNAL et celui déduit par une intégration directe des données d'annihilation. Elles sont suivies par les 6 principales estimations basées sur la QCD sur réseaux (LQCD).

Tout en bas figurent 5 estimations basées sur des méthodes dispersives, les 2 dernières provenant de nos ajustements basés sur le modèle HLS et incluant nos brisures de symétrie. Le point intermédiaire noté RBC/UKQCD est obtenu en combinant LQCD et des méthodes dispersives.

Physique hadronique

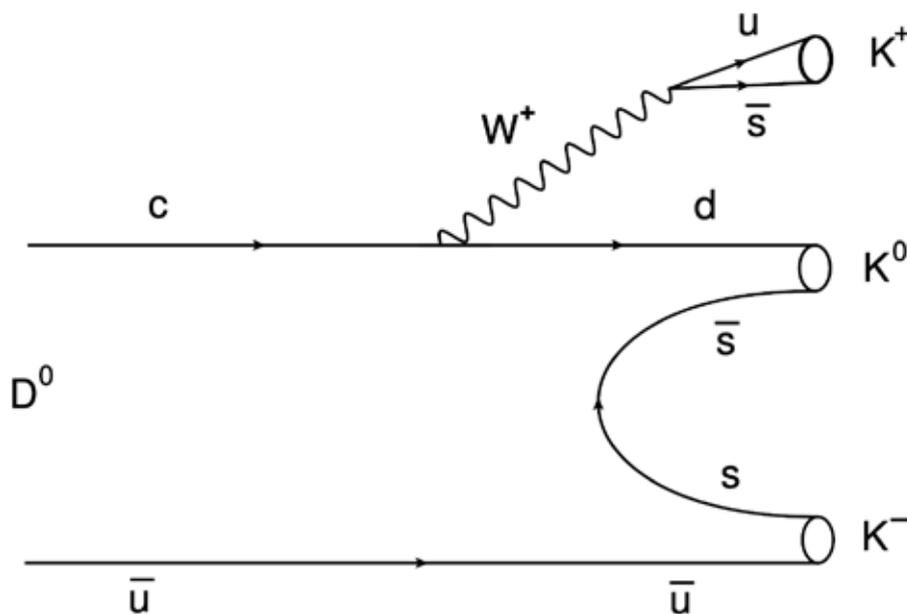
B. Loiseau, J.-P. Dedonder, R. Kamiński et L. Leśniak ont publié une analyse des données de la collaboration BaBar des processus $D^0 \rightarrow K_S K^+ K^-$ dans le cadre d'une approche de factorisation QCD à quasi deux-corps (figure ci-dessous). Les interactions dans l'état final sont décrites par les facteurs de forme du kaon. Leur amplitude peut être utile pour préciser le paramètre de mélange $D^0 \bar{D}^0$ et l'angle CKM γ .

B. Loiseau et J.-P. Dedonder, en collaboration avec R. Kamiński, L. Leśniak, B. Moussallam et P. Żenczykowski ont commencé à tester, sur les données publiées des collaborations Belle et BaBar, leur amplitude $B^0 \rightarrow K_S K^+ K^-$ calculée dans l'approche précédente. Avec S. Wycech, B. Loiseau a publié une analyse des données des

atomes anti-protoniques d'hydrogène et d'hélium. Une mise à jour du potentiel $N\bar{N}$ de Paris 2009 est nécessaire pour fixer la position des états quasiment liés (baryonia) de façon à mieux reproduire ces données. Avec J. Carbonell et S. Wycech, B. Loiseau améliore le raccordement des potentiels théoriques et phénoménologiques de longue et courte portée du potentiel $N\bar{N}$ de Paris 2009. Ils modifient la courte portée en vue d'un meilleur accord avec les atomes anti-protoniques légers et d'une utilisation dans le projet PUMA.

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

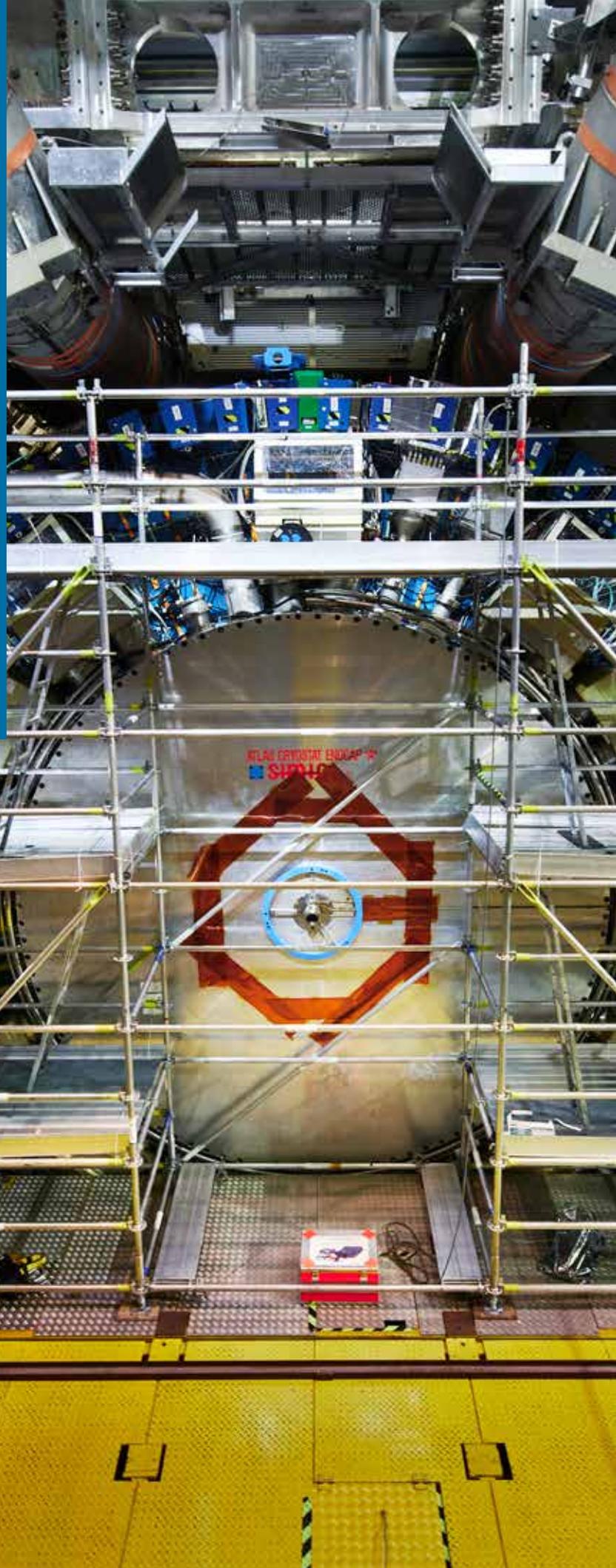
Maurice Benayoun, Jean-Pierre Dedonder, Luigi Delbuono, Benoît Loiseau



Exemple de diagramme illustrant le processus $D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$

Masses et interactions fondamentales

- Physique du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du Modèle Standard
 - Mieux connaître le boson de Higgs: mesures de ses propriétés
 - Recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard
- Physique du quark top dans l'expérience ATLAS
- Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans l'expérience ATLAS
- Jouvence du détecteur ATLAS
 - R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération (ITk)
 - Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk
 - Une solution innovante pour le système de refroidissement : les micro-canaux
 - Les puces électroniques frontales pour l'ITk
 - HGTD : un détecteur hautement granulaire de mesure du temps de vol des particules
- Prospectives en physique des particules
 - FCC - Groupe d'étude sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs
 - Conception des détecteurs pour les futurs accélérateurs e^+e^- : le programme de R&D Calice



Masses et interactions fondamentales



Le Modèle Standard (MS) des interactions fondamentales et de la matière, développé à partir des années 1960, s'est progressivement imposé comme description de référence pour l'ensemble des phénomènes physiques à l'œuvre aux échelles subatomiques. Il s'agit d'une théorie quantique des champs, avec un groupe de symétrie de jauge contenant un secteur électrofaible et un secteur d'interactions fortes. Les particules fondamentales sont la manifestation corpusculaire des champs du MS : les quarks et leptons pour la matière, le photon avec les bosons W et Z pour l'interaction électrofaible, et les gluons pour l'interaction forte.

Le MS contient aussi le champ de Higgs. Celui-ci est à l'origine, par le biais du mécanisme de Brout-Englert-Higgs (BEH), de la brisure de la symétrie électrofaible, qui donne lieu à la masse des bosons W et Z, ainsi qu'à l'existence d'une particule neutre, de spin 0 : le boson de Higgs. Par ailleurs, les couplages (dits de Yukawa) du champ de Higgs avec les champs de matière donnent lieu à la masse des quarks et des leptons chargés.

La découverte en 2012 d'un boson de Higgs, de masse 125 GeV, a mis en évidence l'existence de ce champ. Les mesures faites depuis sont de plus en plus nombreuses et toutes en accord avec celles correspondant précisément au champ de Higgs, tel que prédit par le MS.

Une des forces du MS provient de sa prédictibilité : à partir d'un nombre relativement réduit de paramètres, le Lagrangien du MS prédit un grand nombre de rela-

tions entre observables physiques, et celles-ci sont calculées de nos jours avec des précisions en amélioration continue. On dispose d'un nombre croissant de mesures expérimentales, dont celles provenant des collisionneurs passés et du LHC, le grand collisionneur de hadrons, dont certaines atteignent des niveaux de précision impressionnants.

On possède maintenant des mesures directes de la quasi-totalité des paramètres du MS liés au secteur électrofaible, avec seulement une exception significative: l'autocouplage du champ de Higgs. Des premières contraintes sur celui-ci commencent à apparaître, mais la mesure de précision relèvera de la future phase haute luminosité du LHC, HL-LHC, et au-delà.

On se retrouve cependant face à une situation qui peut être qualifiée de paradoxale : d'une part le MS jouit d'une grande santé, et d'autre part le MS laisse sans réponse des questions fondamentales.

Il existe deux grandes catégories de limitations du MS. Il y a d'une part celles qu'on peut qualifier d'intrinsèques, portant par exemple sur la hiérarchie des couplages de Yukawa ou sur l'origine de la brisure BEH, c'est-à-dire pourquoi l'échelle électrofaible est tellement plus petite que les corrections quantiques aux ordres supérieurs. Et il y a d'autre part celles concernant les liens entre les échelles de l'infiniment petit et de l'infiniment grand, autrement dit les problèmes ouverts en physique des structures à grande échelle de l'Univers. Ainsi le MS n'explique pas pourquoi la gravitation est beaucoup plus faible que les trois autres interactions ; le MS ne propose aucune réponse concernant la nature de la matière noire ou de l'énergie noire ; et les prédictions du MS concernant l'asymétrie matière-antimatière à l'échelle subatomique ne permettent pas d'expliquer l'absence d'antimatière observée à très grande échelle.

Cette situation paradoxale, entre une théorie pleine de succès d'un côté et des questions ouvertes de l'autre, a donné lieu à un consensus dans la communauté scientifique, qui situe le MS comme une théorie effective des champs: le MS serait la limite à basse énergie d'une théorie plus fondamentale, qui répondrait à l'ensemble des questions laissées ouvertes

ou sans solution par le MS. Une grande variété de propositions de nouvelle physique ont été établies par les théoriciens: extension du groupe de symétrie du MS (théories de grande unification), inclusion de nouveaux champs (modèles avec un secteur de Higgs plus étendu), modèles où le champ de Higgs émerge comme un état lié provenant de nouvelles interactions, inclusion de nouvelles relations entre fermions et bosons (les modèles supersymétriques), voire approches totalement différentes telles que la gravité quantique ou la théorie des cordes.

D'un point de vue expérimental, deux approches différentes sont à l'œuvre :

1) la recherche de nouvelles particules. Il s'agit d'une approche privilégiée dans l'histoire de la physique des particules, qui vise à identifier des signaux clairs dans les états finaux produits lors des collisions de particules permettant de mettre en évidence un état physique intermédiaire auparavant inconnu ; cette approche a été notamment celle utilisée pour découvrir le boson de Higgs.

2) les mesures de précision d'observables physiques, afin de les comparer aux prédictions du MS. Il s'agit ici aussi d'une approche validée par l'histoire: cela a permis de prédire l'existence du quark charmé, puis celle du quark top, et ce avant-même leur découverte. Dans le cas du Higgs, les mesures de précision des paramètres électrofaibles du MS avaient établi un intervalle possible pour sa masse, située entre la borne inférieure posée par les recherches expérimentales précédant le LHC, et la borne supérieure donnée par la cohérence de la théorie. L'observation du boson de Higgs à 125 GeV est venue se situer justement dans cet intervalle possible.

C'est dans ce contexte que se situent les activités du groupe Masse et Interactions Fondamentales : étude des propriétés du Higgs ; mesures de précision des paramètres électrofaibles du MS ; recherche de signaux expérimentaux non décrits par le MS ; recherche directe de nouvelles particules. Ce programme de physique s'accompagne d'études des performances du détecteur ATLAS, cruciales pour assurer la robustesse des mesures expérimentales. L'équipe est également active dans la préparation du futur, qu'il s'agisse des mises à jour du détecteur ATLAS pour les phases à venir au LHC, ou la préparation des futurs projets expérimentaux pour l'après-LHC.

Sur la période de référence pour ce rapport, les études auxquelles s'est intéressée l'équipe ATLAS au LPNHE ont porté sur l'ensemble des données enregistrées au LHC pendant la deuxième période de prise

de données (*Run 2*), aussi bien sur ce qui concerne les analyses de physique (détaillées ci-après) que sur un nombre important d'études de performance : étalonnage des jets, identification de jets provenant de quarks b ou de bosons électrofaibles, reconstruction de jets larges impliquant des particules dites "boostées" ; identification, étalonnage et isolation des photons, dont des paires boostées de photons.

Après l'observation de la désintégration du boson de Higgs en une paire de quarks b, l'équipe s'intéresse maintenant au couplage du boson de Higgs au quark b, et ainsi étudie le mécanisme de Yukawa. De même, l'équipe recherche la production conjointe de deux bosons de Higgs (l'un se désintégrant en paires de photons, et l'autre en paires de quarks b) pour accéder au paramètre d'autocouplage du champ de Higgs, une étude pour l'instant limitée par la statistique mais d'importance cruciale pour le futur. Toutes ces études concernant le couplage du Higgs au quark b ont vu leur performance enrichie non seulement par l'utilisation du lot complet de données du *Run 2*, mais aussi par le développement d'algorithmes d'apprentissage automatique et des études de performances sur les jets. D'autres études de physique s'en sont également enrichies: les mesures de sections efficaces de production de jets dans les collisions proton-proton ont donné lieu à des comparaisons détaillées avec les prédictions théoriques ; un projet innovant d'exploration des interactions fortes par la méthode dite du plan de Lund. De la même manière, l'équipe continue à avancer son programme de mesure de la masse du quark top, en utilisant des jets de quark b contenant des états liés avec charme (J/ψ ou mésons D).

Le programme de recherche de nouvelle physique au-delà du MS a avancé sur deux voies complémentaires. D'une part, la recherche de nouvelles particules se désintégrant en paires de photons, couvrant des domaines de masse au-dessus et au-dessous de la masse du boson de Higgs. D'autre part, le possible couplage du champ de Higgs à des secteurs non décrits par le MS est étudié en recherchant des processus de production au LHC de matière noire, en association avec le boson de Higgs se désintégrant en paires de photons. Ici également, ce travail s'enrichit des études de performances liées aux photons auxquelles participe l'équipe.

L'équipe prépare le futur dans trois directions simultanées : participation aux études de physique avec les données du *Run 3* à démarrer en 2022 ; développement, construction et installation de deux nouveaux

composants du détecteur ATLAS pour la future phase à haute luminosité du LHC ; puis finalement participation aux réflexions et projets en cours pour l'après-LHC. L'équipe joue depuis plusieurs années un rôle de premier plan dans le développement de nouveaux capteurs en silicium pour le futur trajectographe ITk (*Inner Tracker*), qui remplacera à partir de 2027 l'intégralité du système de trajectographie actuellement en fonctionnement dans le détecteur ATLAS. ITk est conçu pour répondre aux exigences de performance posées par l'augmentation du taux d'empilement et de flux de radiation attendus pour la phase à haute luminosité du LHC. Cette mise à jour du détecteur ATLAS en 2027 sera complétée par l'installation du futur détecteur HGTD (*High-Granularity Timing Detector*), un nouveau projet validé par la collaboration ATLAS en 2020, et dans lequel l'équipe du LPNHE est fortement impliquée : campagnes de tests en faisceau, études de performance, structure mécanique. La participation dans les deux projets ITk et HGTD bénéficie du partage des expertises de l'équipe, notamment en ce qui concerne la conception, construction et validation de détecteurs silicium, ainsi que dans les développements technologiques en cours dans le cadre du programme CALICE, un projet de calorimétrie conçu comme composant d'un détecteur pour un futur collisionneur linéaire électron-positron, l'*International Linear Collider*, ILC.

Finalement, ces dernières années ont été un temps fort en ce qui concerne le futur. Le travail du groupe

préparatoire de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules a pris fin en 2020, avec un tableau de bord de recommandations ambitieuses pour le futur, menant vers un collisionneur proton-proton à 100 TeV, et passant au préalable par une étape intermédiaire de collisionneur électron-positron répondant aux besoins de la physique du secteur électrofaible et du Higgs. L'équipe est active dans plusieurs études de faisabilité de ces futurs programmes, et bénéficie d'une expertise aussi bien dans la physique que dans les compétences instrumentales.

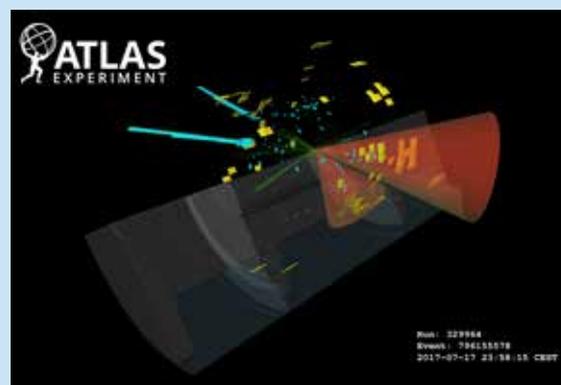
En plus des activités déjà évoquées, le groupe participe aussi au fonctionnement de l'expérience ATLAS au travers de tâches de coordination scientifique sur la qualité des analyses et de contribution relative à l'écriture ou à l'évaluation interne d'articles. Le groupe participe au développement du logiciel pour la reconstruction et l'analyse des données, au logiciel validant la qualité des données et à la mise en place des moyens de calcul et de stockage de l'expérience dans le cadre de la grille de calcul.

Le groupe entretient plusieurs collaborations internationales, notamment avec l'Université de Chicago et l'Université Nationale de Colombie à Bogotà pour les études sur les jets larges, l'Université de Cracovie en Pologne pour le quark top, un consortium d'Universités et Instituts de recherche au Brésil pour la recherche de matière noire et le développement de nouvelles techniques de déclenchement pour électrons et photons.

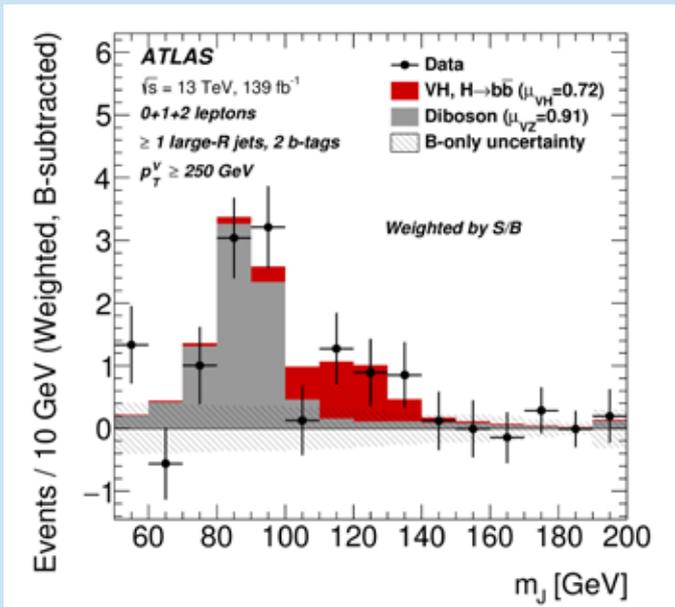
Physique du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS : mesures des paramètres et recherche de physique au delà du Modèle Standard

Mieux connaître le boson de Higgs : mesure de ses propriétés

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, nous avons profité en 2020-2021 de mesurer les propriétés du boson de Higgs avec plus de précision en utilisant la totalité de données fournies en Run 2, 139 fb^{-1} entre 2015 et 2018.



Événement candidat $HH \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$ dans les données ATLAS prises en 2017. Les traces des particules chargées sont représentées en vert, les deux photons sont représentés par des tours bleues et les deux jets de b sont représentés par des cônes rouges.



Distribution de la masse invariante des paires de jets de quarks b dans les événements candidats $VH, H \rightarrow bb$ dans les données du Run 2 (points noirs) dans le régime boosté après soustraction de tous les processus de bruit de fond sauf la production diboson $VZ, Z \rightarrow bb$ (histogramme gris). L'excès dans les données est bien compatible avec un signal $VH, H \rightarrow bb$ (histogramme rouge) tel que prédit par le Modèle Standard.

Nos objectifs de travail sont de triple nature. Premièrement, la mesure des couplages du boson de Higgs aux fermions élémentaires chargés de troisième génération. Avec un rapport d'embranchement de 58%, la désintégration du boson de Higgs en bb est le canal sur lequel nous sommes concentrés. Deuxièmement, la compréhension de l'auto-couplage de Higgs, c'est-à-dire savoir si le boson de Higgs est capable de se coupler à lui-même. Une telle interaction contribuerait à la production d'une paire de bosons de Higgs dans les collisions proton-proton à haute énergie du LHC, un processus incroyablement rare dans le Modèle Standard - plus de 1000 fois plus rare que la production d'un seul boson de Higgs ! Finalement, la recherche des processus de désintégration du boson du Higgs non observés lors du *Run 1*.

Il y a trois ans, nous avons observé la désintégration du boson de Higgs en une paire de quarks de beauté ($H \rightarrow bb$), faisant passer son étude de « l'ère de la découverte » à « l'ère de la mesure ». Une nouvelle analyse publiée en 2020 utilisant ~75% de données supplémentaires par rapport à l'édition précédente (ensemble complet de données *Run 2*) et des algorithmes d'apprentissage automatique donnent une mesure actualisée de $H \rightarrow bb$, où le boson de Higgs est produit en association avec un boson vecteur (W ou Z) se désintégrant en leptons. Parmi plusieurs nouveaux résultats, l'observation de la production

du boson de Higgs en association avec un boson Z a été rapportée avec une signification de 5,3 écarts-types (σ), et la preuve de la production avec un boson W avec une signification de 4,0 σ . Plusieurs contributions du groupe liées à l'amélioration des incertitudes des processus de fond et le développement des algorithmes d'apprentissage automatique ont été très importants pour ces résultats.

De plus, une nouvelle version de l'analyse conçue pour sonder le boson de Higgs lorsqu'il est produit avec une grande quantité de mouvement transverse a également été publiée en 2021, une avancée importante dans la recherche de nouvelle physique. Normalement, les deux quarks b issus de la désintégration $H \rightarrow bb$ se manifestent dans le détecteur ATLAS sous la forme de deux gerbes distinctes de particules hautement collimatées et énergétiques, appelées "jets". Cependant, lorsque le boson de Higgs est produit à un très grand moment transverse, dépassant le double de la masse du boson de Higgs de 125 GeV, le système $H \rightarrow bb$ est "boosté" et les deux quarks b ont alors tendance à être produits à proximité l'un de l'autre, fusionnant en un seul jet. La nouvelle analyse a utilisé différents algorithmes de reconstruction des jets b adaptés à ce régime boosté et nous a permis de reconstruire la masse du boson de Higgs et d'identifier un excès par rapport aux processus de fond, comme le montre la figure ci-contre. Ces deux résultats confirment ainsi les prédictions du Modèle Standard dans le secteur de Yukawa – pour la troisième génération – avec une précision meilleure que 15%. Nous étudions aussi actuellement pour la première fois le processus $VH, H \rightarrow bb$ avec le boson vecteur se désintégrant en jets.

Dans le cadre du Modèle Standard, la production de paires de bosons de Higgs est une prédiction fondamentale du modèle mais qui est attendue comme beaucoup plus rare que la production unique du boson du Higgs. La mesure d'un auto-couplage du boson de Higgs différent de la valeur prédite aurait des conséquences importantes ; l'univers pourrait être en mesure de passer à un état d'énergie inférieure et les lois qui régissent les interactions de la matière pourraient prendre une autre forme. Nous avons utilisé toutes les données du *Run 2* pour rechercher le processus rare dans lequel l'un des deux bosons de Higgs se désintègre en deux photons et l'autre en deux quarks b ($HH \rightarrow \gamma\gamma bb$), figure page précédente.

L'analyse a utilisé un algorithme d'apprentissage automatique pour séparer les événements qui ressemblent au

processus $HH \rightarrow \gamma\gamma bb$ de ceux qui ne leur ressemblent pas. Nous avons étudié en particulier la modélisation du bruit de fond dans les différentes catégories de l'analyse. Des contraintes sur l'auto-couplage du boson de Higgs, entre -1,5 et 6,7 fois la prédiction du Modèle Standard, et sur la section efficace de production de paires de Higgs ont été obtenues. Le résultat sur l'auto-couplage du boson de Higgs est plus de deux fois plus précis que le résultat précédent d'ATLAS dans le même canal de désintégration de la paire de Higgs, créant ainsi un portail pour mieux comprendre le mécanisme fondamental du boson de Higgs. Mais le travail ne fait que commencer. L'observation de l'auto-couplage du boson de Higgs est en effet l'une des raisons d'être du programme du LHC à haute luminosité (HL-LHC) qui devra fournir un ensemble de données

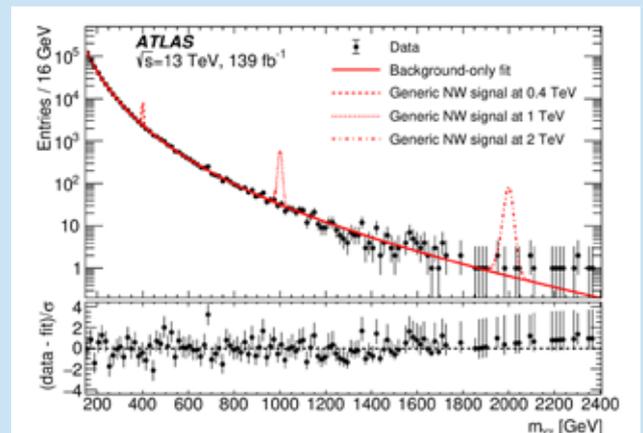
plus de 20 fois supérieur à celui utilisé dans cette analyse et fonctionner à une énergie de collision plus élevée.

Enfin, nous avons recherché - pour l'instant sans succès - les désintégrations rares (prévues par le Modèle Standard) du boson de Higgs en $Z+\gamma$ dans les données du *Run 2*. Les derniers résultats publiés utilisent l'ensemble complet de données *Run 2*, ils montrent un signal de désintégration $H \rightarrow Z\gamma$ avec une significativité de 2 écarts-types et que l'on espère pouvoir mettre en évidence au *Run 3*. Nous avons aussi contribué à la mesure de la section efficace de production du boson de Higgs se désintégrant en deux photons et aux projections des mesures des propriétés du boson de Higgs au HL-LHC.

Recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard

La découverte d'un boson scalaire compatible avec le boson de Higgs prédit par le Modèle Standard de la physique des particules a été une étape fondamentale dans la validation de ce dernier et a éclairé notre compréhension du mécanisme de génération de la masse des particules fondamentales. Avec les données de précision apportées par le *Run 2* du LHC, le Modèle Standard a brillamment survécu aux tests menés par les équipes des expériences du LHC en prédisant correctement, dans l'état actuel de la précision des mesures, les rapports d'embranchement dans la totalité des états finaux observés au *Run 2* du LHC.

Néanmoins, la découverte du secteur du Higgs offre une fenêtre nouvelle permettant d'explorer son possible rôle dans des phénomènes impliquant de la physique au-delà du Modèle Standard, en particulier dans son possible couplage avec un éventuel secteur noir permettant de réconcilier les observations aux grandes échelles (évolution cosmologique de l'Univers, description des corrélations angulaires du fond cosmologique diffus, formation des grandes structures de l'Univers, spectre des vitesses de rotation des étoiles dans les galaxies, effets de lentille gravitationnelle). Nous avons donc entrepris depuis



Spectre de masse invariante des paires de photons obtenu avec les données du *Run 2* du LHC. Cette recherche infructueuse de résonances di-photons très massives a une sensibilité jusqu'à un peu plus de 2 TeV.

2013 des recherches visant, d'une part, à explorer la possible production de matière noire au LHC et d'autre part à rechercher la production de résonances signant la mise en évidence d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

La participation intense de notre équipe aux recherches du boson de Higgs dans le canal di-photons nous a mis particulièrement en bonne situation pour ré-exploiter nos compétences dans la recherche de nouvelles résonances di-photons dans le contexte de la recherche de physique nouvelle. Notre équipe

●●●

a tout d'abord dirigée pour la collaboration ATLAS la recherche de résonances di-photons dans le domaine des hautes masses allant de 200 GeV jusqu'à la limite de sensibilité de l'analyse autour de 2 TeV (figure ci-avant). Cette analyse a été publiée en 2021. L'équipe s'est ensuite intéressée à la recherche de possibles résonances légères typiquement dans l'intervalle de masse allant de 10 GeV à 65 GeV. De telles résonances sont éventuellement attendues dans le cas d'une matière noire composée de particules de type axion. En parallèle, nous avons exploré la possibilité de voir la matière noire produite en association avec un boson de Higgs se désintégrant en paires de photons. Cette approche a permis de publier deux articles : le premier en 2020 sur la recherche d'electroweakinos prédits par la supersymétrie et le second en 2021 sur la recherche de matière noire dans le canal inclusif Higgs en di-photons accompagné d'énergie transverse manquante. Ces deux articles utilisent la totalité des données du Run 2 du LHC. En parallèle le groupe a travaillé sur des aspects assez techniques de correction de la diaphonie dans le calorimètre qui dégrade fortement sa résolution en temps afin d'amé-

liorer la réjection de l'empilement. Ces recherches ont bénéficié du projet de collaboration bilatérale entre la France et le Brésil que nous menons depuis 2018, financé par le COFECUB.

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

Gregorio Bernardi, Romain Bouquet, Luiz Eduardo Bralabram Filho, Giovanni Calderini, Reina Camacho Toro, Artur Cordeiro-Oudot-Choi, Luis Pascual Dominguez, Yajun He, Bogdan Malaescu, Mateus Hufnagel, Bertrand Laforge, Alexander Leopold, Ang Li, Mykola Kandoga, Giovanni Marchiori, Ioannis Nomidis, José Ocariz, Marton Sandes, Werner Spolidoro-Freud, Lydia Roos, Yufeng Wang

CHIFFRES CLEFS

La collaboration ATLAS a atteint en 2020 la publication de **100 résultats** utilisant l'ensemble de données complet du Run 2 du LHC, collectées entre 2015 et 2018.

Physique du quark top dans l'expérience 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, mais aussi dans de nombreuses extensions du Modèle Standard.

Le groupe a poursuivi son programme de mesure de la masse du quark top 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 μ+μ-) soit un méson D (un D⁰ produit en association avec un μ ou un D*(2010)). La mesure est basée sur une méthode de patrons 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. 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 plu-

part des autres mesures. En revanche, les rapports d'embranchement de ces processus étant faibles, les mesures sont limitées par la statistique. Par ailleurs les mesures sont sensibles à la modélisation des processus de fragmentation et d'hadronisation des quarks b. Une thèse a été soutenue sur le sujet en septembre 2020. Une précision de l'ordre 1,6 GeV est obtenue, dominée par les incertitudes systématiques. Des études sont en cours pour réduire celles-ci, en particulier leur composante d'origine statistique.

Le groupe bénéficie d'une collaboration avec Cracovie (IFJ-PAN) dans le cadre des accords de coopération IN2P3-COPIN et de séjours invités par Université de Paris.

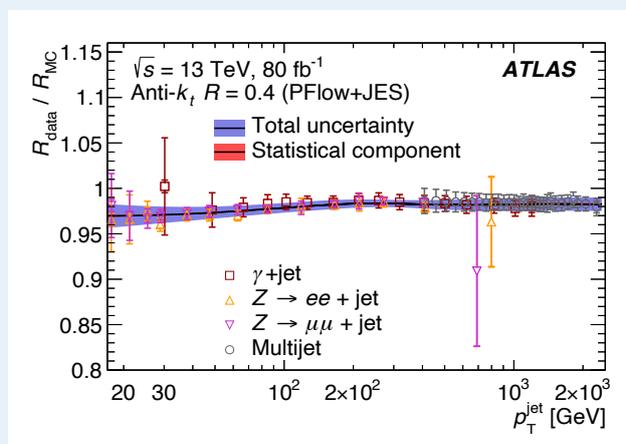
Chercheur.euse.s et doctorant.e.s :

Frédéric Derue, Jad Zahreddine

Études de performance des jets et mesures de sections efficaces dans l'expérience 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 avait déjà 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, l'algorithme est plus stable et s'exécute environ mille fois plus vite. L'utilisation de méthodes in-situ, méthodes utilisant l'équilibre en impulsion transverse avec un objet dont l'énergie est très bien connue, a été généralisée pour la calibration de jets de grandes dimensions, souvent appelés de façon rapide jets larges, ce qui a permis une réduction importante de son incertitude (figure ci-dessous). 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 impliquant des particules lourdes boostées.



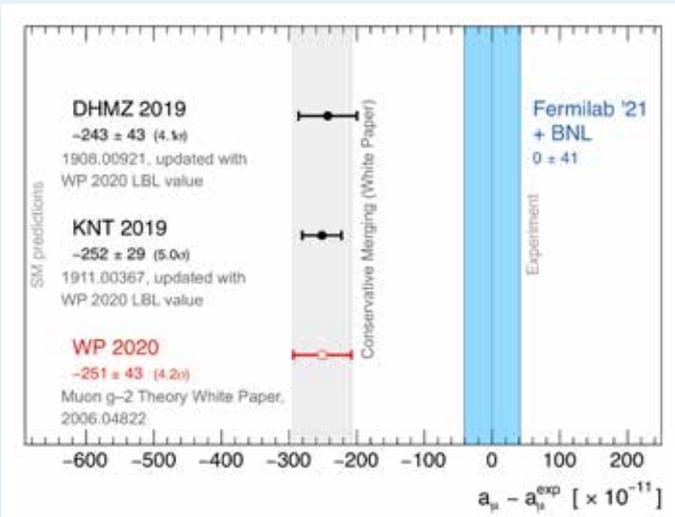
Rapport de la réponse des jets entre les données et les événements simulés en fonction de l'impulsion transverse p_T du jet pour les différentes méthodes de calibration in-situ.

La prochaine étape dans l'amélioration de la calibration est en cours de développement dans le groupe et profite pleinement de l'expertise acquise. Il s'agit d'arriver à une calibration dite absolue en séparant la contribution d'effets de détecteur déterminée sur les données et la partie dépendant de la physique dont la contribution est déduite de la simulation Monte Carlo. En effet, la déconvolution des deux effets permet de mieux comprendre chacun et donc de mieux corriger, c'est ce qui est espéré avec le développement de ce projet. De plus, la dépendance à la simulation Monte Carlo n'est plus qu'une dépendance au niveau de la vérité, c'est-à-dire la partie la plus facilement appréhensible. La mise en œuvre est en cours et renforcera la complète refonte de la calibration, un projet de long terme du groupe.

En plus d'avoir été étendues à de nombreuses analyses de physique, les améliorations de la calibration déjà réalisées ont apporté des bénéfices importants aux études auxquelles le groupe a participé. Parmi celles-ci il y a notamment les mesures de sections efficaces inclusives des jets ainsi que de l'impulsion transverse la plus élevée parmi celles des jets de chaque événement. Cette dernière est une mesure originale du groupe. 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 détaillée de l'impact des incertitudes sur les corrélations expérimentales et théoriques.

D'autre part, un effort pour étudier des méthodes permettant d'effectuer des mesures de distributions non-binnées a été démarré dans le groupe. Il implique en particulier des développements pour des méthodes d'*unfolding* utilisant des approches d'intelligence artificielle.

Il faut ajouter qu'entre septembre 2019 et septembre 2021, Bogdan Malaescu, a été coordinateur du groupe de travail LHC ElectroWeak à la suite de sa coordination du groupe Modèle Standard les 2 années précédentes dans lequel environ 80 analyses sont en permanence en cours et auquel plus de 400 chercheurs.euse.s contribuent. Il a, parallèlement, continué des travaux sur la



Comparaison entre les prédictions théoriques et la mesure réalisée avec l'expérience du Brookhaven National Laboratory il y a 20 ans. La valeur "DHMZ 2019" correspond au résultat obtenu par l'équipe dans laquelle travaille Bogdan Malaescu. Ce résultat prend en compte de nombreux effets subtils dans le traitement de données. La valeur "WP 2020" est utilisée comme prédiction de référence, résultat d'une comparaison conservative avec les autres groupes travaillant sur ce sujet (comme par exemple KNT 2019). Cette figure reflète l'état des connaissances avant la nouvelle mesure réalisée par l'expérience « Muon g-2 » de Fermilab.

physique de précision à basse énergie, notamment des études pour déterminer la contribution hadronique au g-2 du muon comme membre de l'équipe "DHMZ" qui joue un rôle de *leader* dans la combinaison des spectres hadroniques mesurés par différentes expériences, dans les 32 canaux pertinents pour le calcul de la contribution hadronique de polarisation du vide, pour la prédiction théorique du g-2 du muon. Cette détermination est la seule à prendre en compte l'ensemble des corrélations des incertitudes (entre les mesures d'une expérience donnée, entre les expériences pour

un canal donné et entre les canaux), ainsi que de l'ensemble des tensions entre certaines mesures.

Sa proposition de méthode pour la fusion du résultat DHMZ avec ceux obtenus par deux autres équipes a été retenue pour le calcul de la prédiction théorique qui a conduit à une différence de 4,2 écarts-types avec la mesure expérimentale (figure ci-contre). Il a également été éditeur de plusieurs sections du *White Paper* décrivant cette prédiction. Il a aussi soulevé, pour la première fois dans ce domaine, l'importance des incertitudes sur les incertitudes et sur leurs corrélations.

Par ailleurs, des membres de l'équipe travaillent sur l'étiquetage des bosons se désintégrant de façon hadronique et l'étalonnage de ces algorithmes d'identification dans le cas des bosons W/Z ou de Higgs avec H→bb (figure ci-après). En particulier, ils explorent l'utilisation du plan de jet de Lund pour obtenir une représentation théoriquement bien motivée des jets issus des bosons et ils utilisent les images résultantes comme entrée pour les classificateurs d'apprentissage automatique.

L'idée de cartographier l'espace de phase au sein d'un jet unique en utilisant le plan de jet de Lund représente une avancée théorique majeure. L'utilisation de cette technique afin d'évaluer la constante de couplage de l'interaction forte fait aussi partie du travail du groupe pour fournir un éclairage unique sur la Chromodynamique Quantique, ainsi que sur la physique potentielle au-delà du Modèle Standard. Une ANR jeune chercheur qui permettra de recruter un post-doctorant a été obtenue sur ce sujet à l'issu de

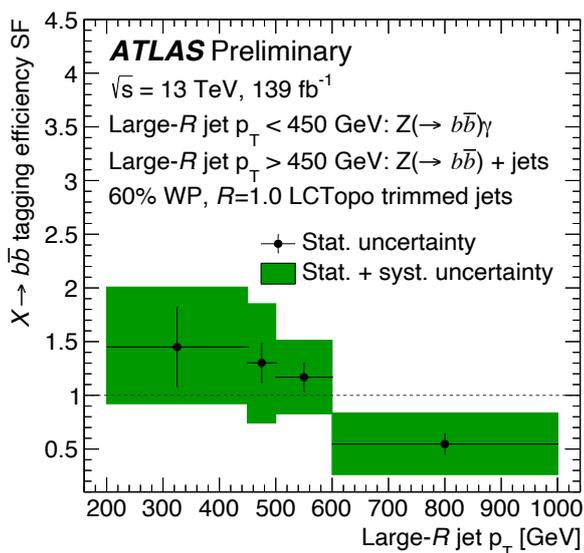
Jouvence du détecteur ATLAS

R&D et construction d'un trajectographe de nouvelle génération (ITk)

À partir de 2027, la phase à Haute Luminosité du LHC (HL-LHC) permettra de fournir à ATLAS et CMS une luminosité instantanée entre 5 et 7,5 fois la luminosité du projet LHC, avec une luminosité totale de 4000 fb⁻¹, soit dix fois le lot disponible avant le début de la phase HL-LHC. Cela représente une opportu-

rité unique pour mieux comprendre les propriétés du boson de Higgs ainsi que pour étendre la portée de la recherche de la nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

Cette augmentation importante de luminosité aura comme conséquences un taux d'événements très significatif et un facteur d'empilement autour de 200 collisions par croisement des faisceaux, soit 5 fois plus que le taux actuel. Les conditions autour de la



Facteurs de correction de l'efficacité du signal $X \rightarrow b\bar{b}$ pour un étiquetage avec une efficacité de 60% entre l'efficacité mesurée sur les données et la simulation Monte Carlo en fonction du p_T du jet large.

l'appel à projet 2021. Ce sujet bénéficie également en 2021 et 2022, d'une collaboration avec l'université de Chicago, financée pour organiser des rencontres entre les deux groupes par le programme « *France and Chicago Collaborating in the Sciences* » (FACCTS).

Les activités qui viennent d'être mentionnées, ont été reconnues par la collaboration ATLAS qui a nommé Reina Camacho Toro coordinatrice, depuis octobre

2021 et pour 2 ans, du groupe de travail sur les jets et l'énergie transverse manquante de l'expérience. Il s'agit d'un groupe d'environ 150 personnes dédié à la caractérisation de la physique hadronique dans ATLAS. Le coordinateur du sous-groupe sur la calibration et la résolution des jets a également appartenu au laboratoire, il y a quelques temps, ainsi que la coordinatrice du sous-groupe sur la calibration des jets étiquetés de saveur de septembre 2019 à septembre 2021, ce qui montre la vitalité du travail sur les jets dans le groupe ATLAS du LPNHE.

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

Reina Camacho Toro, Louis Ginabat, Yajun He, Mykola Khandoga, Bogdan Malaescu, Luc Poggioli, Mélissa Ridel

CHIFFRES CLEFS

La calibration des jets dans ATLAS au *Run 2* du LHC a une précision en dessous de **1%** entre **200** et **2000 GeV**.

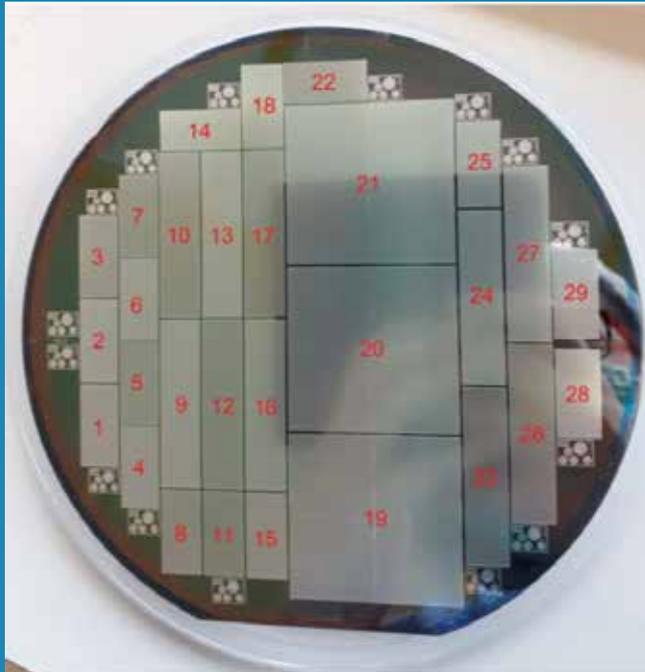
région d'interaction seront beaucoup plus sévères pour les détecteurs en terme de flux de radiation, entre 1 et $2 \cdot 10^{16}$ neq (neutrons équivalents, à 1 GeV) par centimètre carré, soit 20 fois plus que le niveau attendu dans le trajectographe actuel d'ATLAS.

Le trajectographe actuel d'ATLAS et la technologie utilisée ne seront plus adaptés pour ces nouvelles conditions complexes et un dessin totalement nouveau du détecteur sera nécessaire.

Le groupe ATLAS du LPNHE a centré son activité depuis de nombreuses années sur le développement de nouveaux capteurs pour le trajectographe ITk et a commencé depuis quelque temps à préparer l'infrastructure nécessaire à la construction des modules du détecteur.

En parallèle, en collaboration avec l'ITk d'ATLAS mais aussi avec d'autres projets internationaux, tels que RD50, RD53 et AIDAInnova, le groupe a continué à développer certains composants qui seront utilisés pour les futurs détecteurs au silicium avec des technologies pour lesquelles le groupe a développé une expertise reconnue, notamment dans le dessin de solutions de refroidissement avancées, avec l'utilisation de micro-canaux gravés dans le silicium, ou dans des technologies d'interconnexion, avec de nouvelles solutions pour connecter les pixels du capteur avec les canaux de l'électronique frontale.

Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk



Galette de silicium de notre production FBK utilisée pour la qualification des capteurs ITk.

Depuis plus de 10 ans, le groupe ATLAS du LPNHE a développé une expérience reconnue dans la conception et la construction de capteurs à pixels en silicium. En particulier, nous avons proposé, avec d'autres groupes, d'utiliser la technologie *n-in-p* à la place du *n-in-n*, utilisée pour le trajectographe actuel d'ATLAS et pour la couche IBL. Le *n-in-p* est une technologie plus simple et moins chère qui avait seulement besoin d'être démontrée, et au cours des dernières années, le groupe ATLAS du LPNHE s'est concentré sur cette tâche. Le choix du *n-in-p* a été accepté par la collaboration ITk dans le TDR du système Pixel ITk, qui a été approuvé en 2018, et l'acquisition des capteurs basés sur cette technologie a commencé. Une autre réalisation majeure du groupe du LPNHE a été la contribution au développement des capteurs à pixels minces, spécialement adaptés au haut niveau de fluence attendu au HL-LHC. La faible épaisseur permet de minimiser le mécanisme de piégeage de charge qui réduit le signal dans les capteurs après les dégâts causés par le rayonnement.

Au laboratoire, des solutions spécifiques pour capteurs minces ont été étudiées avec un dessin optimisé pour maximiser l'acceptance géométrique, et spécialement pour garder une bonne performance dans la région en bordure du capteur.

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. 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. 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 accélérateurs, l'uniformité du refroidissement sera extrêmement importante pour éliminer le risque d'emballement thermique qui peut se déclencher en lien avec 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 de la CO_2 et connectés aux modules, permettra de réduire la quan-

Notre groupe a conçu et construit plusieurs générations de capteurs à pixels en collaboration avec la fonderie *Fondazione Bruno Kessler* (FBK) à Trento, en Italie. Nous avons aminci l'épaisseur pour atteindre des capteurs de 150 μm , 100 μm et même 50 μm d'épaisseur, qui ont été caractérisés dans notre salle blanche et sur faisceau avant et après irradiation. Les résultats montrent que l'efficacité de détection de traces après la fluence typique attendue au HL-LHC dépasse le 97%, une performance bien en accord avec les spécifications imposées par la collaboration ATLAS pour le futur trajectographe. FBK a été qualifié pour la production des capteurs à 100 et 150 μm d'épaisseur, et notre dessin va être utilisé pour les capteurs de la première couche des pixels planaires ('*Layer-1*', celui à 100 μm d'épaisseur) qui seront produits par FBK (figure ci-avant).

Le LPNHE aura un rôle de premier plan dans la construction des modules en France pour le nouveau trajectographe ITk. La construction en France sera assurée dans le cadre d'un regroupement parisien avec le LPNHE, l'IJCLab et le CEA/Irfu qui a été créé depuis 2019.

Le regroupement a été qualifié par la collaboration ITk à travers la construction de prototypes et devra produire 33% des modules de la partie extérieure du tonneau de l'ITk, soient quelques ~2100 objets, et les valider à tra-

vers 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 une machine pour la métrologie et un microscope à haute résolution pour l'assurance qualité des modules assemblés. Un tube à rayons X va permettre des tests de qualité sur les interconnexions capteur-puce de lecture. Les personnels du laboratoire ont déjà l'expérience nécessaire pour utiliser la nouvelle infrastructure. La machine à bonder va représenter l'un des points importants de l'instrumentation du laboratoire pour les années futures. Une deuxième machine pour tests sous pointes a été achetée dans le cadre du projet CLAP (voir paragraphe Plateforme, partie Organisation du laboratoire), et va être utilisée pour le contrôle qualité des capteurs fabriqués dans les fonderies. Le programme de contrôle qualité des modules produits demandera aussi une participation importante du côté technique, avec un cahier de charge de plusieurs tests électriques et thermomécaniques: des mesures de stabilité du courant de fuite, des cyclages chaud-froid rapides dans l'enceinte thermique ou un programme de métrologie.

tité 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.

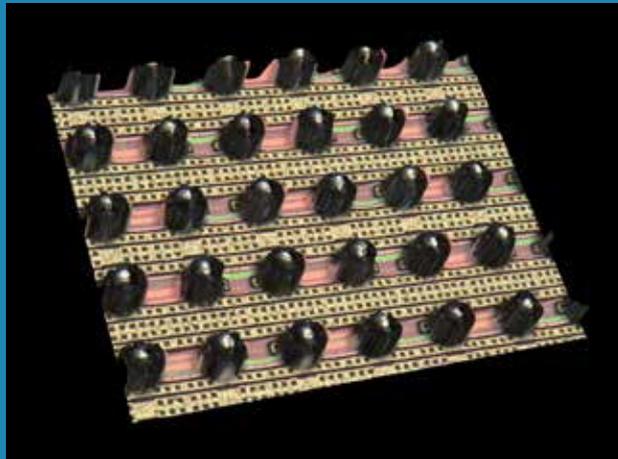
Grâce au projet AIDAInnova qui a commencé en 2021, dans lequel le laboratoire est impliqué et a reçu un financement important pour le développement de dispositifs à microcanaux, le groupe va continuer le développement

des dispositifs déjà fabriqués en collaboration avec FBK (voir article précédent), surtout par rapport aux nouvelles solutions d'interconnexion entre blocs différents. Un détail des dispositifs produits à FBK est exposé dans le rapport d'activité d'AIDA-2020¹.

Un certain nombre de dispositifs produits ont aussi été caractérisés par des tests thermomécaniques au CERN (dans le Laboratoire EP-DT du Refroidissement des Détecteurs) dans le cadre d'AIDA-2020 et les mesures ont été publiées.

<https://cds.cern.ch/record/2712574>

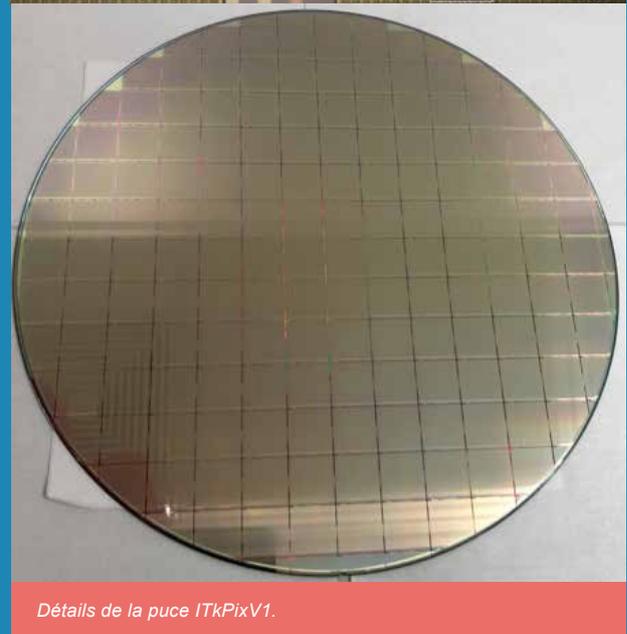
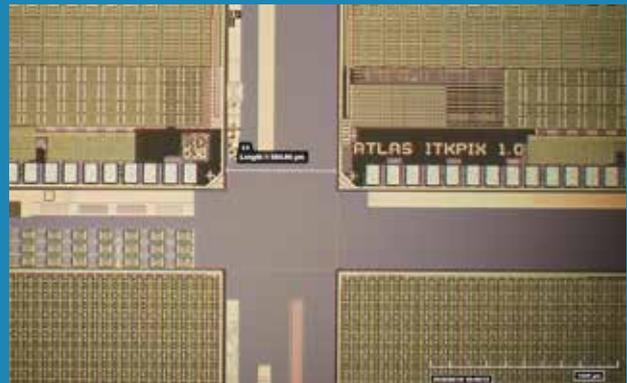
Les puces électroniques frontales pour l'ITk



Photographie de bosses de soudure de SnAg sur des blocs de 50 µm sur la puce électronique frontale RD53. Cette photographie a été prise au LPNHE avec notre microscope Keyence.

Une collaboration commune ATLAS – CMS, nommée RD53, a été créée en 2013 pour dessiner une architecture en technologie CMOS 65 nm à utiliser dans les puces de lecture des pixels d'ATLAS et CMS. Le groupe ATLAS du LPNHE fait partie de RD53 depuis le début et a eu une contribution majeure dans le développement du cœur numérique des nouvelles puces, notamment dans l'implémentation du protocole de lecture *end-of-column* (figure ci-avant). Un premier prototype de puce appelé RD53A a été produit en 2017 et a été la base de toutes les dernières R&D pour ATLAS ITk, aussi pour ce qui concerne le développement des capteurs, qui ont été caractérisés grâce à cette puce. Plus récemment la nouvelle puce ITkPixV1 a été fabriquée, avec l'architecture et la taille finales qui seront utilisées pour les modules

de l'ITk (figures ci-dessous). La puce a été livrée en 2021 et est en train d'être interconnectée aux capteurs pour la *Final Design Review* (FDR) des modules qui aura lieu en février 2022. Le groupe du LPNHE a participé au dessin et à la validation de la simulation avant envoi à la fonderie.



Détails de la puce ITkPixV1.

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

Marco Bomben, Giovanni Calderini, Reina Camacho Toro, Artur Cordeiro-Oudot-Choi, Frédéric Derue, Yajun He, Mykola Khandoga, Bertrand Laforge, Luc Poggioli, Reem Taibah

Équipe technique :

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

CHIFFRES CLEFS

Taille d'un pixel : **50µm x 50µm**

Plus de **10 000 modules** à construire au total dont **~2000** à Paris

Les pixels représentent **13m²** de silicium et **5 milliards** de canaux

HGTD : un détecteur hautement granulaire de mesure du temps de vol des particules

Le détecteur HGTD (*High Granularity Timing Detector*) s'installera dans ATLAS pour la phase haute luminosité du LHC (HL-LHC) vers 2026. Depuis 2020, il s'agit d'un projet officiel approuvé par la collaboration ATLAS et qui complétera les performances d'ITk pour les jets à grande impulsion transverse. Ce détecteur permettra ainsi d'affiner les associations de traces aux vertex primaires dans une phase où le LHC aura un empilement (pileup) élevé de l'ordre de 200 contre moins de 50 jusqu'à maintenant. Il participera également au marquage des jets de b , permettra d'évaluer l'isolation leptonique dans les zones à forte pseudo-rapacité, et plus généralement améliorera la sensibilité de nombreuses analyses ainsi que la mesure de la luminosité.

Dans la pratique, le détecteur HGTD prendra la forme de disques instrumentés placés devant les deux cryostats des calorimètres bouchons de ATLAS situés à environ 3,5 m du centre d'interaction. Ces disques de détection seront au nombre de 4, chaque face étant instrumentée de 1004 modules constitués de capteurs silicium à avalanche à bas gain (LGAD) de 20x40 mm² associés à un ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) de traitement et un câble flexible amenant les données vers l'extérieur du disque. Ces modules seront associés sur des unités de support (SU) intermédiaires elles-mêmes fixées sur une plaque de refroidissement.

Les laboratoires français sont présents dans quasiment tous les pans de la construction de HGTD. Au niveau francilien, avec le CEA/Irfu et l'IJCLab au sein d'un consortium francilien, nous préparons dès maintenant la tâche de construction qui nous incombera : *wire-bonding* des ASIC et LGAD, installation des modules sur les SU. Notre laboratoire est spécifiquement responsable de l'étude, la réalisation et le suivi de production de ces SU.

Plus largement, nos contributions se placent sur plusieurs aspects.

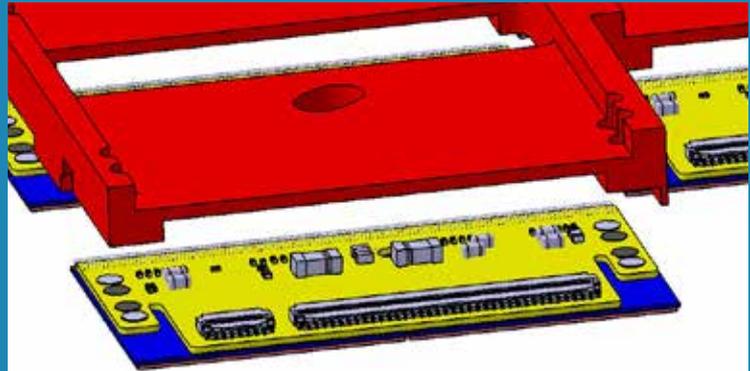
- Nous participons aux campagnes de tests sur faisceau (à DESY ou au CERN) pour l'étude des futurs

capteurs LGAD. La reconstruction des trajectoires des particules des faisceaux est réalisée avec l'outil PaTrack (*Paris Tracking Code*) développé au LPN-HE et à l'IJCLab. Les analyses des données collectées permettent de finaliser les choix des caractéristiques et des fabricants des capteurs qui seront retenus pour HGTD. Le capteur doit répondre au cahier des charges défini dans le TDR (été 2020) concernant les charges collectées (4 fC minimum), la réponse en temps (~entre 30 et 50 ps après irradiation), le gain (le rapport S/N doit être supérieur à 7) et la tension à laquelle ils doivent fonctionner sans claquer (compatible avec l'irradiation tout le long de la vie du détecteur).



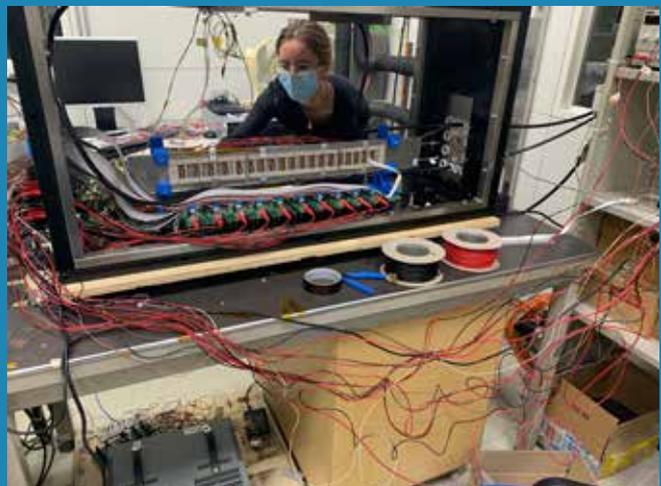
Études et essais de différents matériaux pour les unités supports (SU) : fibre de carbone T300 usiné, ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene) imprimé 3D, Accura® 25 imprimé 3D, PEEK (Polyether Ether Ketone) imprimé 3D ou usiné. Ce dernier (PEEK usiné) est le matériau cible retenu à ce jour (fin 2021).

- Nous prenons part aux études de simulations et performances de HGTD. En particulier une méthode de réduction de taux de fausses traces dans le détecteur a été développée en utilisant l'information sur des signaux manquants (*holes*) dans ITk ou HGTD le long des traces. Nous travaillons également sur l'assignation d'un temps aux traces reconstruites.
- Au niveau électronique, nous avons effectué les premières études concernant le *wire-bonding* entre l'ASIC et le capteur LGAD, et nous assurons la veille technologique permettant d'anticiper les futurs tests des modules lors de l'installation sur les SU.
- C'est au niveau mécanique qu'une partie importante des forces du groupe HGTD du laboratoire se situe. Les plans de la structure et du découpage des SU



A gauche, représentation des 12 SU différents constituant la face "front" d'un quart de disque instrumenté de HGTD. La partie interne, composée de 3 SU sera changée tous les 1000 fb⁻¹, la partie médiane, composée de 4 SU sera changée tous les 2000 fb⁻¹ et la partie externe ne sera pas changée au cours de la vie du détecteur. Chaque SU sera assemblé avec les modules instrumentés séparément pour un montage final global au CERN sur la plaque de refroidissement. Et à droite, détail en vue 3D de la CAO du module prenant place dans son logement de l'unité support.

(figure ci-dessus) sont désormais quasiment figés. La fixation sur les SU s'effectue par un collage assuré par un robot spécifiquement programmé. Le matériau cible pour les SU, après nombreuses études de 4 matériaux cibles (figure ci-dessous), est choisi, il s'agira de PEEK. Nous produisons désormais à l'atelier les premiers SU pour le démonstrateur, ainsi que les outillages nécessaires à l'assemblage, notamment les supports à dépression maintenant en place les modules (figure page précédente) lors du collage.



Installation des unités support munies de chaufferettes assemblées au laboratoire sur le démonstrateur au CERN pour tests (automne 2021).



Collage en cours de modules chaufferettes pour le démonstrateur sur le support externe. Le collage nécessite 4 points de colle d'environ 0,8 µL de Araldite 2011 chacun distribué par un pistolet à colle de haute précision monté sur un robot de collage. Les chaufferettes sont placées avec des pions de positionnement puis immobilisées par dépression sur une plaque réalisée au laboratoire.

Enfin, nous avons entamé le travail de montage sur le démonstrateur de HGTD qui doit valider l'ensemble des choix du TDR : plaque de refroidissement, supports, modules, électronique de lecture. Ce dernier sera pleinement opérationnel courant 2022. Des supports spécifiques ont été assemblés (figure ci-avant) au laboratoire avec des chaufferettes pour une installation à l'automne 2021 (figure ci-dessus).

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

Tristan Beau, Didier Lacour, Alexander Leopold,
Irena Nikolic, Valentina Raskina,
Sophie Trincaz-Duvoid

Équipe technique :

Yann Da Silva, Olivier Dadoun, Guillaume Daubard,
Marc Dhellot, Patrick Ghislain, Alexandre Lantheaume,
Didier Laporte, Sébastien Lefevre, Julien Philippe

CHIFFRES CLEFS

8032 modules de détection
3 614 400 pixels sensibles
384 supports de modules, dont
24 de formes différentes à produire
zone sensible entre **120** et
640 mm de l'axe du faisceau,
installation à **3,5 m** du point
d'interaction

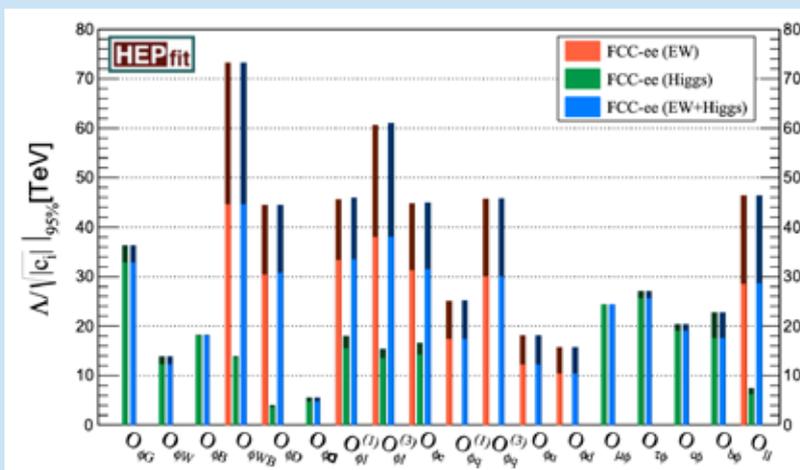
Prospectives en physique des particules

FCC - Groupe d'étude sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs

En juin 2020, la mise à jour de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules a recommandé, pour l'après-LHC, l'étude de la faisabilité d'un collisionneur proton-proton au CERN atteignant au moins 100 TeV dans le centre de masse, avec comme première étape possible, une machine e^+e^- , usine à Higgs et pour la physique électrofaible (figure ci-dessous).

Dans cet esprit, le CERN a lancé en juin 2021, et pour une durée de 5 ans, le projet FCC-FS (pour *Future Circular Collider Feasibility Study*), avec comme but de présenter la faisabilité du projet, tant en termes de machine, de physique que de détecteurs, à la prochaine mise à jour de la Stratégie Européenne en 2026.

Au laboratoire, le projet FCC est passé en novembre 2020 devant le Conseil Scientifique, qui adhère aux perspectives de physique et à de futurs développements instrumentaux proposés et recommande la création d'un groupe de recherche FCC.



Au FCC-ee, contraintes obtenues dans un ajustement global EFT, provenant du Higgs (rouge), du secteur électrofaible (vert) et de leur combinaison (bleu). Les contraintes sont présentées en fonction des limites sur l'échelle de l'interaction, pour chaque opérateur EFT. Les zones plus sombres représentent les résultats obtenus en négligeant les erreurs théoriques.

●●●

L'activité du groupe se concentre sur les études de faisabilité de canaux de physique, visant à optimiser le design des futurs détecteurs, plus précisément la détermination précise dans la phase e^+e^- de α_s via l'étude de la multiplicité des jets hadroniques produits, ainsi que ses conséquences sur le calorimètre, en termes de résolution en énergie et granularité. À cet effet, l'exper-

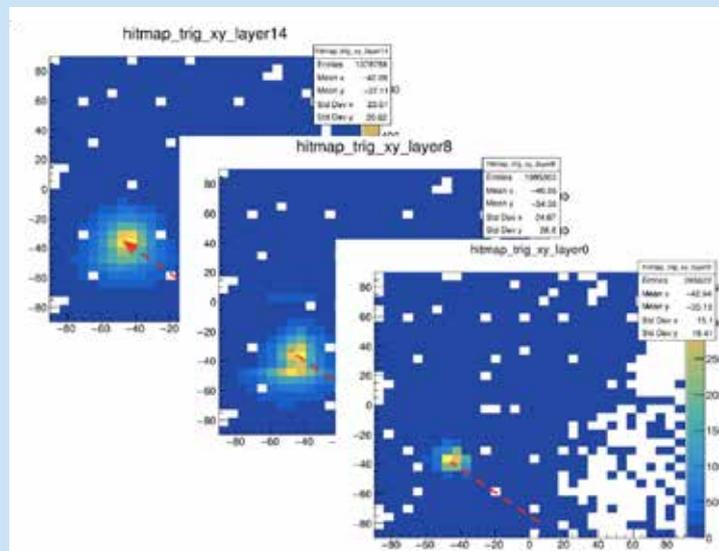
tise acquise au laboratoire dans les développements de détecteurs en silicium, tant pour les détecteurs de vertex que la calorimétrie à haute granularité, sont des atouts majeurs. En parallèle, le groupe essaie de se renforcer par l'arrivée de postdoctorants, doctorants, et également de physiciens du laboratoire, principalement impliqués aujourd'hui dans les expériences LHC.

Conception des détecteurs pour les futurs accélérateurs e^+e^- : le programme de R&D CALICE

Les détecteurs du futur collisionneur ILC 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. 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 a en charge l'étude du procédé de collage des capteurs silicium sur les circuits imprimés et les caractérisations électriques de ces capteurs. Les contributions du LPNHE ont permis la mise au point du procédé de collage et la participation à la fabrication de prototypes de calorimètre qui ont été testés en faisceaux à DESY ou au CERN à plusieurs reprises depuis une dizaine d'années (voir par exemple les résultats obtenus en 2021 sur la figure ci-après).

La fabrication au LPNHE d'une quinzaine de plans de détecteur a permis de construire des premiers modules de calorimètre. En 2020 et 2021, de nouvelles cartes électroniques avec les puces de lecture implantées



Visualisation d'une gerbe électromagnétique dans un module de calorimètre Silicium-Tungstène CALICE enregistrée lors du test en faisceaux à DESY en novembre 2021. Quatre plans du détecteur sont représentés parmi les quinze testés. Ces plans ont été assemblés au LPNHE, par collage conducteur des senseurs silicium sur les cartes électroniques.

Chercheur.euses, doctorant.es :

Alain Blondel, Bogdan Malaescu,
Luc Poggioli

CHIFFRES CLEFS

Phase e⁺e⁻ - prise de données à
4 énergies : pic du Z (**5x10¹² Z
produits**), ZH (**10⁶ Higgs**),
WW (**10⁸ W**), tt (**10⁶ top**)
Démarrage vers **2045**
Phase hh : **100 TeV** dans le
centre de masse, **10¹⁰ Higgs**,
10¹⁷ b, **10¹² top**

dans le corps des cartes ont été développées par la collaboration (cartes COB – *Chip On Board*). Le LPNHE a adapté le processus d'assemblage à ce nouveau design. La figure ci-après est une photographie du système actuellement opérationnel au laboratoire. Un prototype équipé en partie avec ces cartes sera mis en faisceau fin 2021, début 2022.

De plus, une étude systématique de la géométrie des circuits imprimés a été mise en place pour évaluer la qualité. 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 dans le but d'industrialiser le processus de collage. L'accent est mis sur les mesures de contrôle qualité avec l'automatisation du procédé et les contrôles en ligne des alignements par vision artificielle.

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

Didier Lacour

Équipe technique :

Rémi Cornat, Patrick Ghislain, Jean-Marc Parraud

Ces activités pourraient déboucher sur de la R&D pour le détecteur ILD en contribuant à une proposition technique, mais également pour les détecteurs FCC-ee/hh.



Ensemble du système d'assemblage des plans de détecteur CALICE en cours d'opération. La partie collage et la partie positionnement sont visibles sur la photographie ainsi que la carte électronique COB (Chip on Board) en bas à gauche.

CHIFFRES CLEFS

Calorimétrie "imageur"
(ou "ultragranulaire" ou "tracker
calorimeter") visant une densité
de volumes de mesure de l'ordre
de **5000/dm³**
Reproductibilité de placement
du robot : **25 µm**

PUBLICATIONS

La liste des publications du LPNHE de janvier 2020 à décembre 2021 est disponible sur le site internet du laboratoire à l'adresse

<http://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1623>

COMMUNICATIONS À DES CONFÉRENCES

Christina Agapopoulou

- « LFU tests at high-q² », réunion annuelle du GDR- InF, Paris, France, novembre 2021

Sid El Moctar Ahmed Maouloud

- « Machine learning for LXe TPC analysis », GDR DUPhy, cyberspace, juin 2021

Pierre Astier

- « LSST », Pont, cyberspace, décembre 2020

Adrien Blanchet

- « Recent results from the T2K experiment », Rencontres de Blois, Blois, France, octobre 2021

Alain Blondel

- « FCC: A heavy neutrino factory », NuFact, Cagliari, Italie, septembre 2021

Julien Bolmont

- « Search for signatures of Lorentz Invariance Violation in VHE flares of AGN », Conférence « Probing the Extragalactic Universe with High and Very High Energy Sources », cyberspace, décembre 2020

Marco Bomben

- « LPNHE - FBK thin n-on-p pixels for HL-LHC upgrades and beyond », TREDI, Vienne, Autriche, février 2020

Romain Bouquet

- « b-jet energy scale calibration using ttbar lepton+jets events in ATLAS », Top LHC, cyberspace, avril 2021

Giovanni Calderini

- « The ATLAS ITk detector for the HL-LHC », VERTEX, UK, cyberspace, novembre 2021
- « LPNHE-FBK thin n-on-p pixel sensors for HL-LHC upgrade and beyond », VERTEX, Japon, cyberspace, octobre 2020

Lukas Calefice

- « Downstream tracking in the first stage of the upgraded LHCb trigger system », DPG, cyberspace, mars 2021

Reina Camacho Toro

- « Open science, shared infrastructure and collaborative networks: the challenge of new higher education system », CILAC, cyberspace, avril 2021
- « Higgs physics at the LHC: status and prospects », COMHEP, cyberspace, novembre 2020
- « Higgs to bb », Higgs, cyberspace, octobre 2020
- « Advances in jet substructure techniques (including ML) », BOOST, cyberspace, juillet 2020
- « LA-CoNGA physics: an open science education collaboration between Latin America and Europe for High Energy », Open Symposium on High Energy, Cosmology and Astroparticle Physics in Latin America, cyberspace, juillet 2020

Floriane Cangemi

- « INTEGRAL discovery of a high energy tail in Cygnus X-3 », 9th Microquasar workshop, cyberspace, septembre 2021
- « INTEGRAL discovery of a high energy tail in Cygnus X-3 », INTEGRAL symposium, cyberspace, octobre 2021

Matthew Charles

- « Highlights and perspectives from the LHCb experiment », LHCP, cyberspace, mars 2020
- « Discussion leader* (chair d'une séance de discussion : Flavour) », Moriond EW, cyberspace, mars 2021

Marianna Fontana

- « A GPU High Level Trigger 1 for the upgraded LHCb detector », EPS, cyberspace, juillet 2021
- « Overview and prospects for charm rare decays at LHCb », Charm, cyberspace, mai 2021

Romain Gaior

- « DAMIC-M electronics and acquisition system », TWEPP, cyberspace, septembre 2021
- « Dark Matter searches with DAMIC at Snolab », TAUP, cyberspace, août 2021

Claudio Giganti

- « The TPCs of the T2K experiment », New Horizons in TPCs, Santander, Espagne, octobre 2020
- « The TPCs of the T2K experiment », P2IO BSM Nu workshop, Saclay, France, février 2021

Vladimir Gligorov

- « Lepton flavour at colliders: experimental overview », NuTau, cyberspace, septembre 2021
- « Review of flavour physics experimental results », Portorož 2021, Portorož, Slovénie, septembre 2021
- « Triggering and online calibration with machine learning techniques », LHCP, cyberspace, mai 2020

Thomas Grammatico

- « Measurements of CP violation in charmless 3-body B meson decays at LHCb », ICHEP, cyberspace, juillet 2020
- « CP violation in charmless 2-body B meson decays at LHCb », EPS-HEP, cyberspace, juillet 2021

Mathieu Guigue

- « The T2K Experiment: Status, Results and Prospects », Neutrino Telescopes, Venise, Italie, février 2021

Robert Hankache

- « ATLAS Jet Measurements for PDFs and their Uncertainties », DIS, New York, USA, mars 2020,

Yajun He

- « Performance and calibration of boosted H(bb) tagging, including applications in physics analysis with ATLAS », BOOST, cyberspace, août 2021

Claire Juramy

- « Tearing and Mitigation in the LSST Focal Plane », Detector Modelling workshop, cyberspace, juin 2021

Jean-Philippe Lenain

- « Monte Carlo Simulations and Validation of NectarCAM, a Medium Sized Telescope Camera for CTA », ICRC, cyberspace, juillet 2021
- « Southern African Large Telescope Spectroscopy of BL Lacs for the CTA project », ICRC, cyberspace, juillet 2021
- « The ablation of gas clouds by blazar jets and the long-lasting flare in CTA 102 », ICRC, cyberspace, juillet 2021
- « Active Galactic Nuclei population studies with the Cherenkov Telescope Array », ICRC, cyberspace, juillet 2021

Alexander Leopold

- « Searches for Dark Matter produced in association with a Higgs boson and invisible decays of the observed Higgs boson using the ATLAS detector », DIS, cyberspace, juillet 2021

- « Search for Dark Matter in events with missing transverse momentum and a Higgs boson decaying to two photons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector », Moriond EW, cyberspace, mars 2021

Christelle Levy

- « Robust constraints on Lorentz Invariance Violation from H.E.S.S., MAGIC and VERITAS data combination », ICRC, cyberspace, juillet 2021
- « Modeling intrinsic time-lags in flaring blazars in the context of Lorentz Invariance Violation searches », ICRC, cyberspace, juillet 2021

Benoît Loiseau

- « In search of Baryonia », ECT, Trento, Italie, mai 2021
- « The Paris nucleon-antinucleon potential and Baryonia », ESNT, Saclay, France, novembre 2021

Bogdan Malaescu

- « Theory of muon g-2 », SPIN, cyberspace, octobre 2021
- « On the dispersive evaluation of the HVP contribution to a_μ and α_{QED} , and implications for the EW fit », LIO international conference on Future colliders and the origin of mass, cyberspace, juin 2021
- « Perspective for High Precision QCD Studies @ FCCee », FCC-ee France workshop, janvier 2021
- « Impact of correlations between a_μ and α_{QED} on the EW fit », The hadronic vacuum polarization from lattice QCD at high precision, cyberspace, novembre 2020
- « Top / EW / SM Report », ICHEP, cyberspace, août 2020

Marco Martini

- « Nuclear models for LBL and Onbb: synergies », P2IO BSM Nu workshop, Saclay, France, février 2021

Lucile Mellet

- « Analysis and R&D preparation for Hyper-Kamiokande experiment towards precise measurement of neutrino oscillation parameters », JRJC, La Rochelle, France, octobre 2021

Viet Nguyen

- « Physics studies for ND280 upgrade in T2K experiment », NuFact, Cagliari, Italie, septembre 2021

Irena Nikolic

- « Performance of HPK Prototype LGAD sensors for the ATLAS High-Granularity Timing Detector HGTD », TIPP, cyberspace, mai 2021

Giorgos Papadopoulos

- « Using scientific-grade CCDs for the direct detection of dark matter with the DAMIC-M experiment », ISAPP, cyberspace, juillet 2021
- « Using scientific-grade CCDs for the direct detection of dark matter with the DAMIC-M experiment », PSD 12, Birmingham, UK, septembre 2021

Luis Pascual Dominguez

- « Searches for low- and high-mass Higgs-like resonances with the ATLAS detector », NUCLEUS, St Petersburg, Russie, septembre 2020

Ignasi Pérez Ràfols

- « Quasar identification with SQUEzE », DESI Lyman α workshop, cyberspace, juillet 2020
- « The Lyman alpha deltas », DESI Lyman α workshop, cyberspace, septembre 2021

Francesco Polci

- « Experimental overview of flavour physics », Rencontres de Physique de Particules, Palaiseau, France, janvier 2020

ET RESPONSABILITÉS

- « Experimental Challenges for Future LFU Measurements », Beyond the flavor anomalies, cyberspace, avril 2020
- « Charged lepton flavor violation searches with tau leptons at LHCb », Snowmass tau-CLFV coffee hour, cyberspace, mai 2021
- « Flavor physics », rECFA, Paris, France, septembre 2021

Julie Rode

- « Calibration of the liquid argon ionization response to electronic and nuclear recoils with DarkSide-50 », GDR DUPhy, Paris, France, décembre 2021

Alessandro Scarabotto

- « Search for New Physics with Rare Charm decays at LHCb », HADRON, cyberspace, juillet 2021
- « Rare Charm decays at LHCb », réunion annuelle du GDR- InF, Paris, France, novembre 2021

Sergey Suvorov

- « Performance of the Time Projection Chambers with resistive MicroMegs of the T2K near detector upgrade », Neutrino Telescopes, Venise, Italie, février 2021
- « The T2K near detector upgrade », Rencontres de Blois, Blois, France, octobre 2021

Michelangelo Traina

- « Results on Low-Mass Weakly Interacting Massive Particles from a 11 kg d Target Exposure of DAMIC at SNOLAB », ICRC, cyberspace, juillet 2021
- « Tackling CCD backgrounds to detect light Dark Matter with the DAMIC experiments », DM 2021, cyberspace, septembre 2021
- « Results on Low-Mass Weakly Interacting Massive Particles from a 11 kg d Target Exposure of DAMIC at SNOLAB », GDR DUPhy, Paris, France, novembre 2021

Sophie Trincaz-Duvoird

- « A High-Granularity Timing Detector for the Phase-II upgrade of the ATLAS Calorimeter system : beam test results », BTTB workshop, cyberspace, février 2021

Yufeng Wang

- « Search for new resonances in high-mass diphoton final states using proton-proton collision data collected with the ATLAS detector », ICHEP, cyberspace, juillet 2020

Steffen Georg Weber

- « Lepton Flavor violation at LHCb », ICHEP, cyberspace, juillet 2020
- « Search for rare B decays with τ in the final state at LHCb and Belle II », réunion annuelle du GDR- InF, cyberspace, octobre 2020

Uladzislava Yevarouskaya

- « Measurements of the deposited energy resolution of a resistive Micromegas module for the TPC of the T2K Near Detector upgrade », congrès des doctorant·e·s déconfiné·e·s, Paris, France, juillet 2021

Pauline Zarrouk

- « Cosmological constraints from full-shape analysis of DESI galaxy samples », Action Dark Energy, Paris, France, octobre 2021
- « DESI BGS: from target selection to scientific analyses », AAS, cyberspace, janvier 2021

Jean-Philippe Zopounidis

- « Search for sub-GeV dark matter in XENON1T », GDR DUPhy, cyberspace, mai 2021

SÉMINAIRES

Reina Camacho Toro

- « High transverse momentum boson identification techniques and a couple of applications in Higgs->bb analysis », Universidad de Antioquia, Colombie (online), novembre 2021

Frédéric Derue

- « Top quark mass measurement in ATLAS », IFJ-PAN, Cracovie, Pologne, novembre 2021

Romain Gaior

- « Dark Matter searches with DAMIC detectors », University of Edinburgh, UK (online), octobre 2021
- « Dark Matter searches with DAMIC detectors », Kamioka observatory, Japan (online), août 2021

Claudio Giganti

- « Recent results from T2K and plans for T2K-II and Hyper-Kamiokande », CPPM, Marseille, France, février 2021

Vladimir Gliorov

- « Real-time analysis at 30 MHz – the LHCb experience », Université de Genève, Suisse, novembre 2021

Claire Juramy

- « Retour d'expérience sur la construction de la caméra CCD de LSST », Réseau des électroniciens d'Ile-de-France, novembre 2021

Olivier Martineau

- « The GRANDProto300 experiment on the path to the Giant Radio Array for Neutrino Detection », University of Delaware, USA, mars 2021

Marco Martini

- « Electroweak excitations of nuclear systems: from neutrino cross sections to astrophysical phenomena », IP2I, Lyon, France, juin 2021

Ignasi Pérez Ráfols

- « Cosmology (and astrophysics) with the Lyman α forest », IAP, Paris, France, février 2021
- « Measuring BAO with the Lyman α forest: achievements and challenges », LAM, Marseille, France, octobre 2020
- « Cosmology (and astrophysics) with the Lyman α forest », DIPC, Donosti, Espagne, février 2020

Boris Popov

- « NA61/SHINE hadron production measurements for T2K », DLNP, Dubna, Russie, mai 2021

Luca Scotto Lavina

- « Direct Dark Matter Search with XENON Project », LLR, Palaiseau, France, janvier 2020

Ting Tan

- « Detection of DLAs in Quasar Spectra using Machine Learning Algorithms », IAP, Paris, France, octobre 2021

Pauline Zarrouk

- « DESI BGS: from target selection to scientific analyses », University of Waterloo, cyberspace, mars 2021

INTERVENTIONS DANS LES ÉCOLES THÉMATIQUES

Pierre Astier

- « Grands relevés Imageurs pour le visible », Ecole Euclid, Anglet, France, août 2021
- « Grands relevés Imageurs pour le visible », Ecole Euclid, Hyères, France, août 2020

Pierre Billoir

- « Lecture on tracking algorithms », GDR-InF, Paris, France, novembre 2021

Adrien Blanchet

- « T2K latest oscillation analysis and cross section results and sensitivity studies for T2K-SK », IRN Neutrinos, Paris, France, décembre 2021

Mathieu Guigou

- « Computing model for T2K and HK », IRN Neutrinos, Paris, France, décembre 2021

Ignasi Pérez Ráfols

- « Quasar identification in DESI », 6th INFIERI School, Madrid, Espagne, août 2021

Sergey Suvorov

- « Performances of resistive Micromegas for the T2K ND280 upgrade », IRN Neutrinos, Paris, France, décembre 2021

ORGANISATION DE CONFÉRENCES ET D'ÉCOLES THÉMATIQUES

Gregorio Bernardi

- Membre du comité d'organisation, Higgs hunting, Orsay, France, juillet 2020

Marco Bomben

- Membre du comité d'organisation, école SIMDET 2020, Paris, France, reportée en novembre-décembre 2021

Giovanni Calderini

- Organisateur, école SIMDET 2020, Paris, France, reportée en novembre-décembre 2021

Lukas Calefice

- Organisateur, LHCb Starterkit, cyberspace, novembre 2021

Reina Camacho Toro

- Membre du comité scientifique, BOOST, cyberspace, juillet 2020 et août 2021
- Membre du comité d'organisation, Higgs Hunting, cyberspace, septembre 2021
- Membre du comité d'organisation, Physics ATLAS France, cyberspace, juin-juillet 2021

Matthew Charles

- Membre du comité d'organisation, Implications of LHCb measurements and future prospects, cyberspace, octobre 2020

Francesco Crescioli

- Membre du comité d'organisation, école SIMDET 2020, Paris, France, reportée en novembre-décembre 2021

Frédéric Derue

- Membre du comité d'organisation, journées Top-LHC France, cyberspace, mai 2021

Jacques Dumarchez

- Organisateur, Moriond EW 2020, La Thuile, Italie, annulé

- Organisateur, Moriond QCD 2020, La Thuile, Italie, annulé
- Chair, Moriond Cosmo 2020, La Thuile, Italie, annulé
- Organisateur, Rencontres de Blois 2020, Blois, France, annulé
- Organisateur, Vietnam Neutrinos 2020, Quy Nhon, Vietnam, annulé
- Chair, Moriond Grav 2021, cyberspace, mars 2021
- Organisateur, Moriond EW 2021, cyberspace, mars 2021
- Organisateur, Moriond QCD 2021, cyberspace, mars 2021
- Organisateur, Rencontres de Blois 2021, Blois, France, octobre 2021

Vladimir Gligorov

- Membre du comité scientifique, Connecting the Dots, cyberspace, avril 2020
- Membre du comité scientifique et convener des séances "Flavour physics - CKM and beyond", PANIC, cyberspace, septembre 2021
- Membre du comité scientifique, CKM, cyberspace, novembre 2021

Michael Joyce

- Membre du comité scientifique, Ecole de Gif, Marseille, France, septembre 2021

Bogdan Malaescu

- Membre du comité d'organisation, Moriond QCD, La Thuile, Italie, depuis 2021
- Co-organisateur du workshop « Jets and their substructure from LHC data », mai-juin 2021
- Chair de la session « Precision measurements », Moriond EW, cyberspace, mars 2021
- Co-organisateur, LHC EW WG General Meeting, CERN, Genève, Suisse, octobre 2020
- Membre du panel pour une session de discussions, ICHEP, Prague, République Tchèque, cyberspace, août 2020
- Convener de la session « QCD and Forward Physics », LHCP, Paris, France, mai 2020
- Co-organisateur des discussions statistiques ATLAS+CMS+LHCb sur la méthode sPlot, mai 2020

Giovanni Marchiori

- Membre du comité d'organisation, école SIMDET 2020, Paris, France, reportée en novembre-décembre 2021
- Co-chair de la conférence et du comité d'organisation, LHCP, cyberspace, mai 2020

Marco Martini

- Organisateur, NuFact conference, Cagliari, Italie, septembre 2021

Jérémy Neveu

- Membre du comité scientifique et du comité d'organisation, Journées LSST-France, Orsay, France, février 2020

Francesco Polci

- Membre du comité d'organisation, Séminaire de perspectives IN2P3 thématique GT01: « physique des particules », Lyon, France, mars 2020
- Organisateur, GDR-Inf lectures: Effective Field Theory (part I), cyberspace, septembre 2020
- Organisateur, GDR-Inf lectures: Effective Field Theory (part II), cyberspace, juin 2021
- Organisateur, réunion annuelle du GDR-Inf, cyberspace, octobre 2020
- Organisateur, réunion annuelle du GDR-Inf, Paris, France, novembre 2021
- Organisateur, GDR-Inf lectures: tracking detectors and algorithms, cyberspace, novembre 2021

Alessandro Scarabotto

- Organisateur, LHCb Starterkit, cyberspace, novembre 2021

Pauline Zarrouk

- Organisation des ateliers interactifs, Rencontres Physique-Entreprise-Recherche de la SFP, Paris, France, septembre 2021

RESPONSABILITÉS DANS LES COMITÉS D'ÉVALUATION, LES INSTANCES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Pierre Antilogus

- Membre du DESC Advisory Committee, depuis 2021
- Responsable scientifique pour le changeur de filtre de LSST, depuis 2014
- Responsable scientifique pour la contribution de l'IN2P3 au plan focal de LSST, depuis 2007
- Coordinateur technique de DESC, 2017-2021

Pierre Astier

- Responsable du groupe de travail Sensor de LSST, 2014-2021
- Membre du groupe de travail « Physique Fondamentale » du CNES, depuis 2019
- Membre du conseil scientifique de IP2I, 2016-2020

Christophe Balland

- Membre du comité HCERES d'évaluation du LAPP, janvier-février 2020
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, jusqu'en 2020
- Responsable national de eBOSS/DESI pour l'IN2P3, depuis 2019

Tristan Beau

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2021
- Membre du CLHSCT du LPNHE, depuis 2021

Eli Ben-Haim

- Coordinateur senior du groupe de travail BnoC/Event Selection de LHCb, depuis 2019
- Coordinateur du bureau « Early Career, Gender and Diversity » de LHCb, depuis 2020
- Coordinateur du groupe Rare decays de Heavy Flavour Avaraging, 2013-2021

Marc Betoule

- Membre du conseil scientifique du PNCG, depuis 2021

Julien Bolmont

- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2021
- Membre du Collaboration Board de H.E.S.S., depuis 2020
- Conseiller en radioprotection du LPNHE, depuis 2016
- Membre du CLHSCT du LPNHE, depuis 2016
- Membre du Conseil Scientifique du DIM ACAV+ de la Région Ile de France, jusqu'en 2021
- Membre du comité de rédaction d'une nouvelle proposition de DRIM de la Région Ile de France (DRIM Origines), 2021
- Membre du comité de coordination de l'action COST (Réseau de Coopération Européen en Sciences et Technologies) CA18108 « Quantum gravity phenomenology in the multi-messenger approach », depuis 2019
- Membre suppléant du CNU section 29, depuis 2019
- Co-responsable de la plateforme de TP de physique nucléaire du Master de Physique de SU, depuis 2016

Sébastien Bongard

- Responsable du groupe de travail Photometric Calibration de LSST, depuis 2020

Giovanni Calderini

- Responsable du projet ATLAS-ITk
- Responsable des collaborations RD50 et RD53
- Chair du comité de gouvernance de AIDA Innova, depuis 2021
- Responsable du work package « μ -channel interconnectivity » de AIDA Innova, depuis 2021
- Coordinateur ITk France, depuis 2016
- Membre de l'équipe de management ITk, depuis 2018
- Coordinateur pour l'IN2P3 de la préparation du projet AIDA Innova, 2020

Lukas Calefice

- Liaison RTA/EMTF pour le groupe de travail QEE de LHCb, 2020-2021

Reina Camacho Toro

- Membre du comité « ATLAS Early Career Scientists », 2019-2021
- Co-coordinatrice du groupe de travail Flavour Tagging Calibration de ATLAS, 2019-2021
- Co-coordinatrice du groupe de travail Jet/ETmiss de ATLAS, depuis 2021
- Membre de l'instance Latin American Strategy Forum for Research Infrastructure (LASF4RI), groupe préparatoire, depuis 2019

Floriane Cangemi

- Membre du comité d'attribution de temps d'observation (TAC) pour INTEGRAL, 2021

Matthew Charles

- Coordinateur de physique de LHCb, 2018-2020
- Membre du Conseil Scientifique du LPNHE, depuis 2017

Isabelle Cossin

- Responsable de l'animation du réseau des communicants de l'IN2P3
- Membre du groupe de travail pour la mise en place du réseau Com'on des chargés de communication du CNRS
- Expert auprès de l'observatoire des métiers pour modifier la fiche emploi-type « Assistant-Ingénieur - Chargée 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 de traitement dématérialisé de la dépenses (SCTD)

Wilfrid da Silva

- Membre du Collaboration Board de COMET, depuis 2014

Frédéric Derue

- Représentant ATLAS-IN2P3 à l'International Computing Board, depuis 2019
- Chair du groupe de travail Calcul ATLAS France, depuis 2017
- Membre du conseil de direction de LCG-France

Jacques Dumarchez

- Membre du board international de T2K, depuis 2009
- Co-coordonateur du groupe « HK near detector », depuis 2021

Marianna Fontana

- Coordinateur du groupe de travail Charm de LHCb, depuis 2021

Romain Gaior

- Coordinateur technique de DAMIC, depuis 2019
- Membre du conseil GDR DUPhy, depuis 2020

Claudio Giganti

- Responsable du projet d'upgrade de ND280, depuis 2019
- Responsable national de T2K pour l'IN2P3, depuis 2021
- Co-coordonateur du groupe « HK near detector », depuis 2021
- Membre du comité exécutif de T2K, depuis 2021
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2020

Vladimir Gligorov

- Coordonateur du projet Real Time Analysis de LHCb, depuis 2019

Mathieu Guigue

- Co-coordonateur du groupe reconstruction pour l'upgrade de ND280, depuis 2019
- Co-coordonateur HK computing, depuis 2021
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2021

Delphine Hardin

- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2020
- Membre du conseil scientifique du LPSC, depuis 2021
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019

Frédéric Kapusta

- Responsable COMET-France, de 2018 à 2020

Didier Lacour

- Coordonateur HGTD detector units, depuis 2016
- Membre de l'Institute Board de HGTD
- Membre de l'Institute Board de Calice
- Membre du Collaboration Board de ATLAS

Bertrand Laforge

- Membre de la section 01 du CoNRS, depuis 2021
- Co-coordonateur du groupe de travail Data Quality cal-combined de ATLAS, depuis 2017
- Coordonateur des groupes de travail BSM diphoton et recherche de matière noire de ATLAS

Olivier Le Dortz

- Responsable de l'électronique Back End du SciFi dans LHCb, 2016-2021

Jean-Philippe Lenain

- Vice-coordonateur du groupe de travail Extragalactique du Consortium CTA, depuis 2021
- Coordonateur du groupe de travail Simulations de la collaboration H.E.S.S., jusqu'en 2021
- Membre du comité de sélection sur un poste de Maître de Conférences mis au concours, Université de Paris, 2020
- Membre du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2020
- Membre du CLHSCT du LPNHE, depuis 2018
- Membre du Consortium Board de CTA, depuis 2016

Antoine Letessier Selvon

- Coordonateur scientifique de DAMIC, depuis 2017

Bogdan Malaescu

- Coordonateur du groupe de travail LHC EW, jusqu'en 2021
- Coordonateur du comité de statistique, depuis 2020

Giovanni Marchiori

- Membre du comité de publications ATLAS, 2021
- Co-coordonateur du groupe de travail Higgs at LHC cross section, 2020
- Membre du conseil scientifique de la Fédération de Recherche Interactions Fondamentales (FRIF), 2020-2021
- Responsable du group d'analyse des sections efficaces $H \rightarrow \gamma\gamma$, 2020-2021

Olivier Martineau

- Membre de la section 01 du CoNRS, depuis 2020
- Spokesperson de GRAND, depuis 2015

Marco Martini

- Membre du comité NuSTEC

Evelyne Mephane

- Membre de jury de concours externe CNRS et MESRI
- Présidente fondatrice du CREDAU (Réseau des Administrateurs de la DR2)
- Responsable de l'animation du groupe de réflexion sur la fonction d'administrateur au sein du CREDAU
- Responsable de l'animation du groupe de travail sur la formation des administrateurs d'unités au sein du CREDAU
- Expert auprès de l'Observatoire des Métiers pour la relecture des profils de concours

Jérémy Neveu

- Coordonateur scientifique de LSST-France, 2018–2020

José Ocariz

- Membre du High-Level Strategy Group pour le Latin-American Strategy Forum for Research Infrastructure (LASF4RI), depuis 2020
- Membre du conseil scientifique de l'IPHC, depuis 2020
- Membre du comité de pilotage du laboratoire franco-japonais de physique des particules TYL-FJPPL, depuis 2018

Francesco Polci

- Vice-coordonateur Operation de LHCb, depuis 2020
- Directeur du GDR Intensity Frontier, 2017-2021

Boris Popov

- Coordonateur de l'analyse des données de NA61/SHINE pour T2K, depuis 2012
- Responsable national de NA61/SHINE pour l'IN2P3, depuis 2018
- Coordonateur des ressources financières pour NA61/SHINE, depuis 2021

Paolo Privitera

- Spokesperson de DAMIC, depuis 2017

Mélissa Ridet

- Représentante du LPNHE auprès de l'ECFA, depuis 2021
- Membre de la commission d'interclassement régional des propositions 2020 d'avancement des IT de la BAP C, septembre 2020
- Directrice adjointe du LPNHE, depuis 2019
- Membre ex-officio du conseil de laboratoire du LPNHE, depuis 2019
- Membre ex-officio du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2019
- Membre ex-officio du CLHSCT du LPNHE, depuis 2019
- Correspondante ANR pour le LPNHE auprès de l'IN2P3

Lydia Roos

- Directrice Adjointe Scientifique à l'IN2P3 en charge des laboratoires et sites, 2018–2021

Luca Scotto Lavina

- Responsable du groupe de travail XENON Computing, 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, 2017–2020
- Membre du conseil GDR DUPhy, depuis 2020

Sophie Trincaz-Duvoid

- Chargée de mission pour l'accueil et le suivi des doctorants du LPNHE, depuis 2021
- Deputy team leader pour le User's office du CERN, depuis 2020
- Membre du conseil scientifique du LPNHE, depuis 2020
- Responsable des stages au LPNHE, depuis 2019

Da Yu Tou

- Responsable de la liaison entre les groupes de travail Tracking, alignment and vertexing et le projet RTA de LHCb, 2018-2020

Pauline Zarrouk

- Co-organisatrice de l'action nationale Dark Energy, depuis 2021
- Co-coordinatrice du Key Project 5 de DESI, depuis 2020

CONFÉRENCES GRAND PUBLIC

Tristan Beau

- « P_yCOA », salon culture et jeux mathématiques, mai 2021
- « P_yCOA », hackathon COVID – Lutter ensemble, avril 2021
- « P_yCOA », hackathon Data Against COVID-19, avril 2020

Reina Camacho Toro

- « Overview of Particle Physics and Applications », US-ATLAS Education and Outreach Event, cyberspace, juin 2021

Olivier Dadoun

- « P_yCOA », salon culture et jeux mathématiques, mai 2021
- « P_yCOA », hackathon COVID – Lutter ensemble, avril 2021
- « P_yCOA », hackathon Data Against COVID-19, avril 2020

Claire Juramy

- « Instrumentation en astrophysique, le projet LSST », Faites de la Science, Avon, France, novembre 2021

José Ocariz

- « La décennie du boson de Higgs », IPSA, Paris, France, février 2020
- "Après le boson de Higgs, la recherche de Nouvelle Physique au LHC", Magistère de Physique, Université de Paris, France, novembre 2021
- « Hablemos de física avanzada », séminaire d'ouverture de la liste de rencontres virtuelles d'inauguration du projet LA-CoNGA, juin-juillet 2020
- "The LA-CoNGA physics project", Sociedad Peruana de Física, Pérou, décembre 2021

Ignasi Pérez Ràfols

- « Observant l'univers invisible », Cycle de conférence "Ciència a la fresca", Observatoire du Pedraforca, Espagne, août 2021
- « L'origine de l'univers », Cycle de conférence "Ciència a la fresca", Observatoire du Pedraforca, Espagne, août 2020
- « L'origine de l'univers », Festival du village, Sant Quirze Safaja, Espagne, juillet 2020

Pauline Zarrouk

- « L'expansion de l'univers s'accélère ! Qui appuie sur la pédale d'accélérateur ? », SAF, Paris, France, décembre 2021
- « Adaptation : notre univers, notre planète, notre écosystème », Festival Atmosphères, Courbevoie, France, octobre 2021
- « L'observation des galaxies, d'hier à demain », Fête de la Science, Université de Cergy, France, octobre 2021

- « Les galaxies sur les traces de la matière noire », Festival d'astronomie, Fleurance, France, août 2021
- « L'observation des galaxies, d'hier à demain », Festival d'astronomie, Liban, cyberspace, mai 2021
- « No plan B : un univers, une planète, un écosystème, des chercheuses », Festival Atmosphères, Courbevoie, France, octobre 2020

ACTIVITÉS DE VULGARISATION

Tristan Beau

- Rencontres autour du logiciel P_UCOA, démonstration et atelier de codage, fête de la science, octobre 2021
- Julien Browaeys, Tristan Beau et Groupe IREM "Mesurer en physique-chimie". « La relation de conjugaison et la régression linéaire. Deuxième partie : alternative ». Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie 115.1033, p. 475-487, avril 2021
- Julien Browaeys, Tristan Beau, Stéphane Frayon et al., « Enseignement Scientifique Terminale ». Belin Éducation, ISBN: 979-10-358-0899-0, 2020

Eli Ben-Haim

- Intervention dans l'émission « La méthode scientifique » sur la découverte du tetraquark Tcc⁺ par LHCb, octobre 2021

Reina Camacho Toro

- Participation au Women in Physics panel, conférence COMHEP, Colombie, cyberspace, décembre 2021
- Visite virtuelle de l'expérience ATLAS au CERN, fête de la science au LPNHE, Paris, France, octobre 2021
- Portraits de femmes et d'hommes de l'IN2P3, septembre 2021
- Podcast Aguacast pour le magazine Persea, avril 2021
- Participation au Networking workshop de CUWiP (Conferences for Undergraduate Underrepresented Minorities in Physics from APS), US, cyberspace, janvier 2021
- Co-organisatrice des conférences Gaïa, série de conférences de femmes scientifiques avec le soutien de Homeward Bound, Femmes et Sciences, Génération Climat de la Fondation Nicolas Hulot et FORIM, 2020
- Participation au panel « The importance of women in driving impact », Change NOW Summit, mars 2020
- Séminaire « Ingénieurs, Éthique et Société », ICAM, La Roche-sur-Yon, France, février 2020

Floriane Cangemi

- Participations, fête de la science, LPNHE, France, octobre 2021

Matthew Charles

- Implication dans les visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2021
- Interview dans "Science & Vie" au sujet de l'observation du tetraquark Tccc, juillet 2020
- Contributions à de nombreux annonces et articles courts concernant les résultats de LHCb (CERN Courier, site web du CERN, site web LHCb, ...), jusque juin 2020

Olivier Dadoun

- Rencontres autour du logiciel P_UCOA, démonstration et atelier de codage, fête de la science, octobre 2021

Frédéric Derue

- Mise en place des visites et du musée du LPNHE, fête de la science, octobre 2021

Jacques Dumarchez

- Frise chronologique du laboratoire, mai et décembre 2021
- Poster du LPNHE pour l'exposition des 50 ans de l'IN2P3, mai 2021

Vladimir Gligorov

- Intervention au lycée Leonardo da Vinci, Paris, février 2021
- Responsable des Masterclasses LHCb au LPNHE, depuis 2017

Guillaume Grolleron

- Participations, fête de la science, LPNHE, France, octobre 2021

Mykola Khandoga

- Visite virtuelle de l'expérience ATLAS au CERN, fête de la science au LPNHE, Paris, France, octobre 2021

Bertrand Laforge

- Visite virtuelle de l'expérience ATLAS au CERN, fête de la science au LPNHE, Paris, France, octobre 2021

Jean-Philippe Lenain

- Participations, fête de la science, LPNHE, France, octobre 2021
- Interview dans Numerama sur la lumière Cherenkov, décembre 2020

Jérémy Neveu

- Observations astronomiques grand public avec l'AFA, Rencontres du Ciel et de l'Espace, Paris, France, novembre 2021

Ignasi Pérez Ráfols

- Participation au programme « Jeunes et Science », Catalogne, Espagne, juillet 2021

Francesco Polci

- Exposition photographique « A la frontière de l'intensité », depuis 2021
- Article Refflets Phys. N.66 (2020) 6-9 : « Universalité de la saveur leptonique - Les trois leptons ont réellement les mêmes propriétés? », 2020
- Interview dans « Science et Avenir » sur « Les derniers secrets de la matière », avril 2020

Boris Popov

- Article pour le journal JINR-Dubna « T2K experiment: new results on the search for CP violation in the lepton sector via neutrino and antineutrino oscillations », avril 2020

Mélissa Ridet

- Nouvelle plaquette du laboratoire, avril 2021
- Frise chronologique du laboratoire, mai et décembre 2021
- Poster du LPNHE pour l'exposition des 50 ans de l'IN2P3, mai 2021

Pauline Zarrouk

- Membre du CA et du comité scientifique du Festival d'astronomie de Fleurance, depuis 2021
- Membre du conseil scientifique du Festival Atmosphères de Courbevoie, depuis 2021
- Organisation de l'anti-conférence, débat sur Insignifiant et atelier « Exoplanètes le jeu » avec des scolaires, Festival Atmosphères, Courbevoie, France, octobre 2021
- Podcast avec Hélène Courtois, animé par Sébastien Follin, « Les combattants pacifiques », octobre 2021
- Challenge vidéo astro jeunes de la SAF, de mars à juin 2021

Marco Zito

- "Les supernovae, des étoiles qui explosent", présentation au festival Les sciences des livres, Cachan 2020
- Conférence à la société astronomique de France, 2020
- Parrainage d'une classe de collège (Parcours science)
- Rédaction de l'article T2K pour Scholarpedia

DISTINCTIONS

Reina Camacho Toro

- Prix TechPlayMakerAwards, dans la catégorie « Academic Achievement », 2020

Véronique Criart

- Cristal collectif du CNRS, 2021

Guillaume Daubard

- Cristal collectif du CNRS, 2021

Claire Juramy

- Médaille de cristal du CNRS, 2020
- Cristal collectif du CNRS, 2021

Didier Laporte

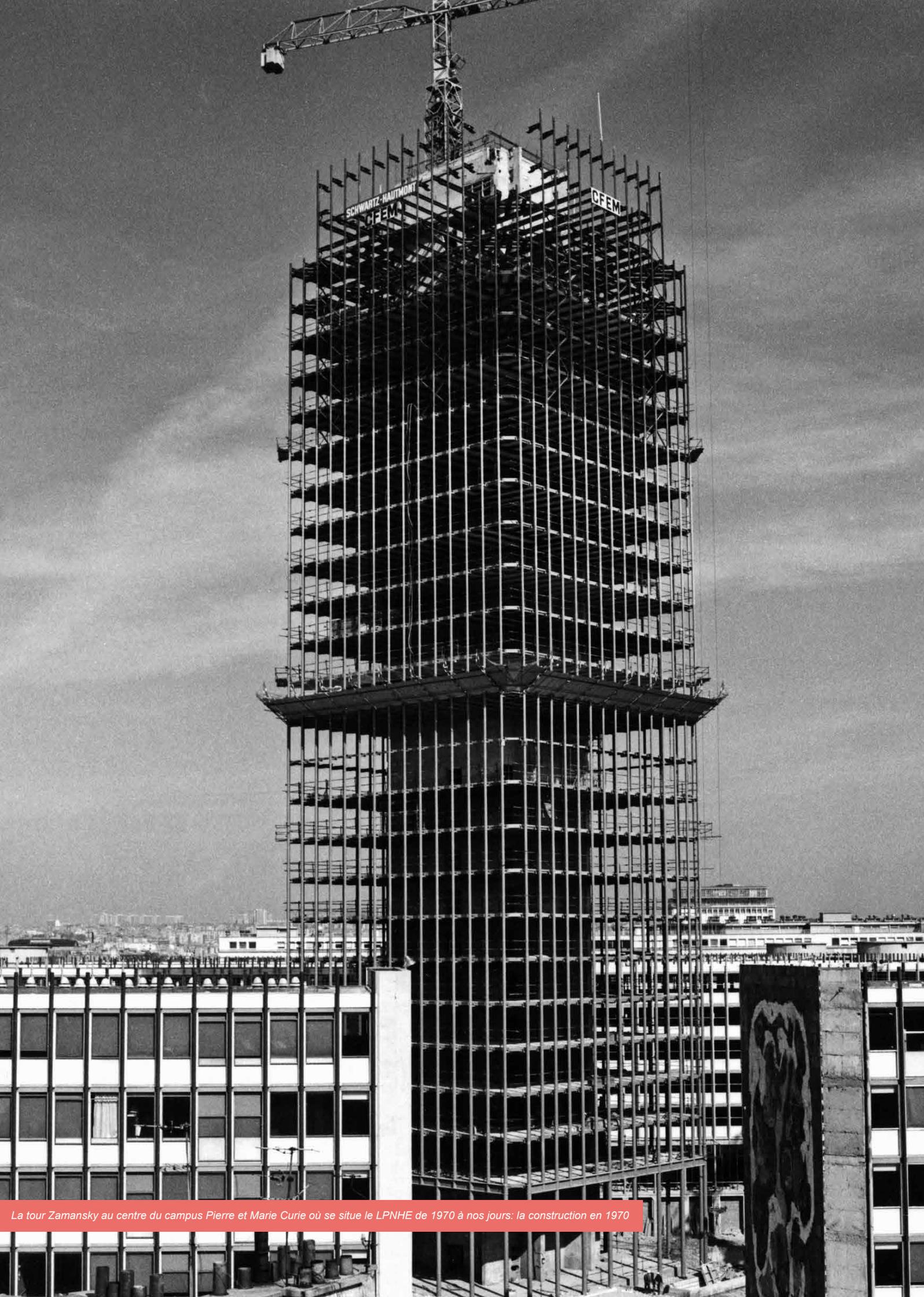
- Cristal collectif du CNRS, 2021

Dorothea vom Bruch

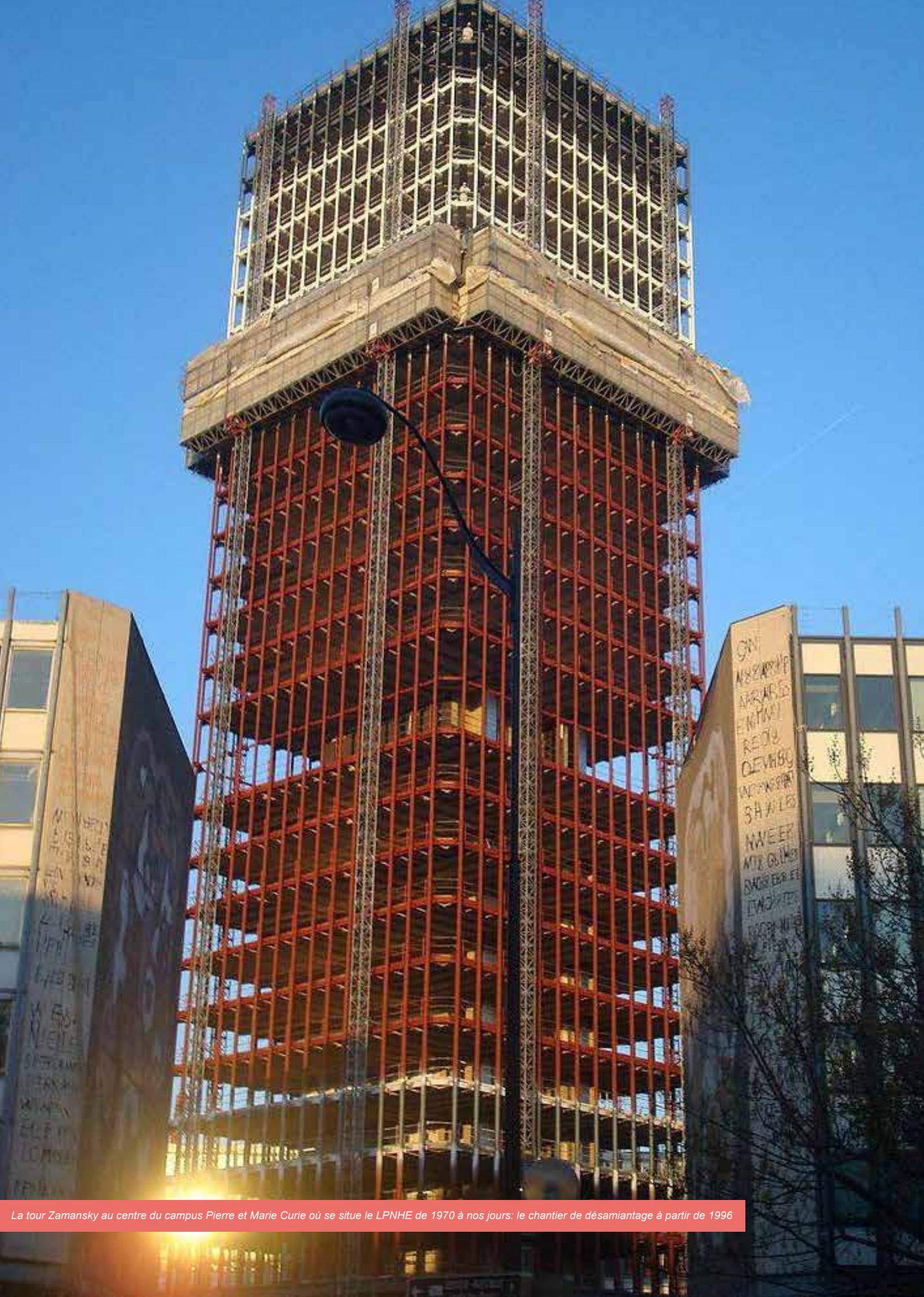
- Prix « Early Career Scientist Award » de LHCb, 2020

Pauline Zarrouk

- Finaliste de Falling Walls Lab pour le CNRS, 2021



La tour Zamansky au centre du campus Pierre et Marie Curie où se situe le LPNHE de 1970 à nos jours: la construction en 1970



La tour Zamansky au centre du campus Pierre et Marie Curie où se situe le LPNHE de 1970 à nos jours: le chantier de désamiantage à partir de 1996

1954

L'anneau du PS en 1959, juste avant son démarrage.



© CERN

La création du CERN

En 1954, la France, avec le soutien de Pierre Mendès France, décide de participer à la mise en œuvre du laboratoire européen pour la recherche nucléaire, le CERN. C'est l'événement clef qui déterminera le paysage de la discipline à très long terme, préfigurant la création de l'IN2P3 17 ans plus tard. Les premiers travaux pour la construction du laboratoire et de ses accélérateurs commencent en mai 1954. En 1957, un synchro-cyclotron à protons de 600 MeV est mis en service. Le premier grand accélérateur du CERN est conçu quelques années plus tard : un Synchrotron à Protons de 670 mètres de circonférence, le PS, capable à l'époque d'atteindre 20 GeV. Inauguré en février 1960, il est toujours utilisé aujourd'hui comme injecteur du LHC... !

1972

L'expérience NA48 étudie la violation de la symétrie Charge-Parité (CP). Photo de 1972.



© CERN

Théorie de la violation de CP (Cabibbo, Kobayashi et Maskawa)

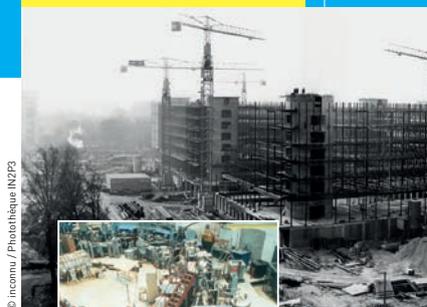
En étendant à trois familles de quarks travaux de Cabibbo, les physiciens Kobayashi et Maskawa décrivent les transformations des quarks du type «haut» (u,c,t) vers le type «bas» (d,s,b) par interaction faible grâce à un mécanisme élégant connu sous le nom de matrice CKM. Ce mécanisme peut rendre compte de la violation de CP observée en 1964 dans les désintégrations des kaons. On prédit également des violations de CP dans les hadrons beaux pas encore découvertes à l'époque : ces violations seront finalement observées en 2001. Elles seront également observées dans les hadrons charmés en 2010.

1971

Création du LPNHE

Création du Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies par la réunion de 2 groupes travaillant sur des expériences de chambre à bulles à l'Institut de Radium (Paris) et à l'Institut de Physique Nucléaire (Orsay).

Chantier de construction du campus Jussieu. Vue de l'angle rue des Fossés Saint Bernard/quai Saint Bernard. Construction de la tour 12 en premier plan, où se trouvera le LPNHE à 2 moments de son histoire.



© Inconnu / Photothèque IN2P3

Création de l'in2p3

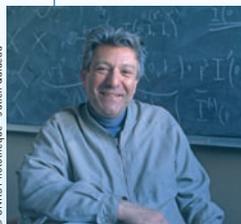
La création en 1971 d'un Institut national de physique nucléaire et de physique des particules au sein du CNRS se fait avec l'objectif de «développer et de coordonner les recherches» en physique nucléaire et en physique des particules, sous la tutelle du CNRS. Jean Teillac, qui a joué un rôle essentiel dans ce projet, est nommé directeur de l'institut le 19 avril 1971.

© CEA-Saclay / Photothèque IN2P3

A l'occasion des 50 ans de l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules), l'Institut du CNRS auquel est rattaché le laboratoire LPNHE (Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies), qui fête également ses 50 ans en 2021, des chronologies rassemblant grandes découvertes et développements scientifiques et techniques ont été établies grâce à un travail collectif important. Elles ont été rendues publiques sur le site <https://50ans.in2p3.fr> et le LPNHE a souhaité en garder une trace vivante dans ses murs.

La séquence centrale résume la chronologie du LPNHE, entourée par les grandes dates de la physique des deux infinis. Le laboratoire a directement contribué à plusieurs résultats importants pour l'avancée de nos connaissances dans ce domaine.

Jean Iliopoulos en 1999.



© CNRS Photothèque - Julien Quéreau

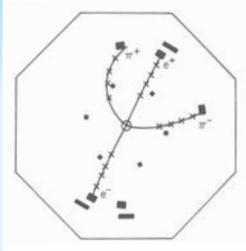
Prédiction de l'existence d'une nouvelle particule élémentaire, le quark « charmé »

Sheldon Lee Glashow, Jean Iliopoulos et Luciano Maiani introduisent le mécanisme dit de « GIM », comme nouveau modèle des interactions faibles entre quarks par échange de boson chargé massif. Alors que seuls trois quarks sont supposés exister à l'époque, ce mécanisme pour des raisons de symétrie postule l'existence d'une nouvelle particule élémentaire, le quark «charmé». La découverte de la particule J/psi en 1974 confirmera l'existence de ce quark.

1970

1974

Reconstruction par ordinateur d'une désintégration de psi dans le détecteur Mark I, donnant une image presque



© SLAC

Découverte de la particule J/psi à BNL et à SLAC

La particule J/psi, découverte indépendamment par deux équipes qui la baptisèrent respectivement J et psi, est un état lié de deux quarks du type charmé et confirme donc l'existence de ce 4e quark, postulé par le mécanisme de GIM en 1970. Cette découverte, qui implique des français aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental, vaudra le prix Nobel à Burton Richter (SLAC) et Samuel Ting (BNL) en 1976.

1977

Extrait du cahier de laboratoire de John Yoh (E288) notant en novembre 1976 les premiers signes de présence d'une résonance à 9,6 GeV, qui sera confirmée en mai 1977 comme étant la résonance Upsilon.



Découverte expérimentale du quark b à Fermilab

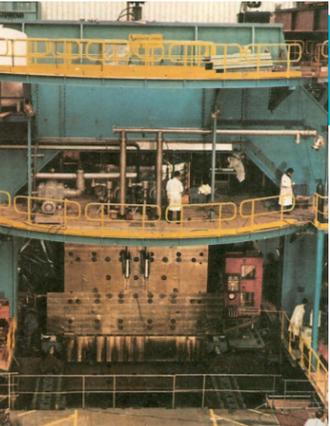
La découverte expérimentale du quark b par l'expérience E288 à Fermilab se fait via la particule U (Upsilon) qui est un état lié de deux quarks beauté, comme l'était le J/psi pour le quark charmé. Leon Lederman et ses collaborateurs de Fermilab découvrent donc un autre quark (et son antiquark) : le quark «bottom» (ou «beauté»). Cette découverte confirme l'existence d'une 3e génération de quarks, telle que prédite par Kobayashi et Maskawa. Comme les quarks sont classés en doublets pour des raisons de symétrie, cette découverte entraîne de facto la recherche d'un sixième quark : le «top» (ou «truth»), qui sera découvert en 1995.

... Les gran

1973

Participation du LPNHE à la collaboration franco-soviétique

Le LPNHE a participé à plusieurs expériences dans la chambre à bulles à hydrogène Mirabelle, construite à Saclay et installée sur l'accélérateur Serpukhov.

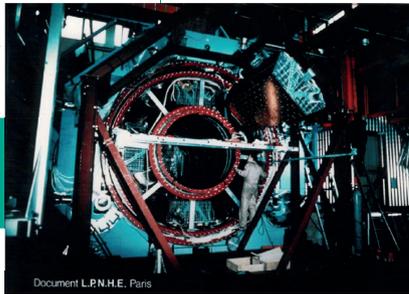


La chambre à bulles Mirabelle à Serpukhov.

1975

Vue du détecteur CELLO installé à la fin des années 70 sur l'accélérateur PETRA.

© Photographie IN2P3



Début des contributions du LPNHE à la construction des grands détecteurs de physique des particules

Un groupe du LPNHE a contribué au projet EHS (European Hybrid Spectrometer au CERN) associant une chambre à bulles à un spectromètre électronique. Parallèlement un autre groupe a rejoint la collaboration CELLO construisant un détecteur destiné au collisionneur PETRA de DESY à Hambourg.

1982

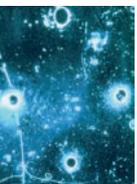
Début de l'activité neutrino au LPNHE

L'expérience PS191 a pour but la recherche de désintégration de neutrinos lourds au CERN-PS (1982 - 1984). Les limites établies par cette expérience restent d'actualité près de 40 ans plus tard. De plus, un signal inattendu pouvant être interprété comme une oscillation de neutrinos a justifié un prolongement de l'expérience, qui n'a pu se faire qu'à Brookhaven avec E816.

© CERN / Photographie IN2P3



Appareillage de l'expérience PS 191. On peut reconnaître François Vannucci de dos, en blanc.



Sur la photographie, un neutrino invisible interagit avec un électron sans se convertir en muon (la trace verticale que l'on voit sur l'image est celle de l'électron). Cet événement leptonique est l'une des preuves de l'existence des courants neutres.

Découverte des courants neutres dans la chambre à bulles Gargamelle (CERN) sous la direction d'André Garggarrigue

Le 9 juillet 1973, l'existence de courants neutres est annoncée au CERN grâce aux résultats obtenus avec la grande chambre à bulles Gargamelle construite à Saclay et installée fin 1970 au CERN. Bombardant la chambre par un flux intense de neutrinos, des muons ou des électrons issus de l'interaction du neutrino avec un noyau devaient être observés. Des événements sans muon ou électron sont cependant aussi observés, ce qui traduit l'existence d'une particule électriquement neutre. La découverte de ces courants neutres est absolument importante car elle assoit la construction toute récente de la théorie de Glashow, Salam et Weinberg (GSW) de la théorie électrofaible, unifiant la force faible (responsable de phénomènes tels que la radioactivité) et la force électromagnétique.

Martin L. Perl dans son bureau.



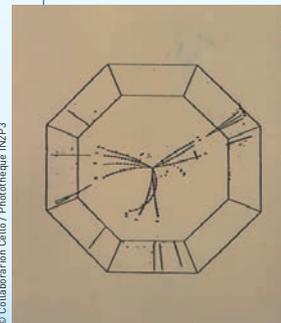
© SLAC

Découverte du lepton tau, première particule de 3e génération

La découverte du lepton tau, cousin massif de l'électron et du muon, a été faite grâce au spectromètre SLAC-LBL (Mark I) auprès du collisionneur électron-positron SPEAR du SLAC à Stanford. Cette découverte inattendue rompt la symétrie entre, d'une part, les quarks, dont 4 sont connus à l'époque et répartis en 2 familles, et d'autre part, les leptons pour lesquels manifestement une 3e famille existe. Ce lepton est donc la première particule de 3e génération observée. La particule fut intensivement étudiée, notamment à DESY et au LEP (CERN). Cette découverte vaudra le prix Nobel de physique à Martin L. Perl en 1995.

Événement à 3 jets observé dans CELLO, identifiant la présence du gluon : 2 quarks produits dans une collision e+e- ont rayonné un gluon et les 3 particules se «matérialisent» sous forme de jets.

© Collaboration Cello / Photographie IN2P3



Découverte du gluon

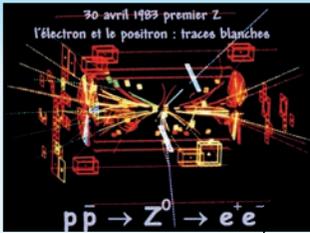
Découverte du gluon, vecteur de l'interaction forte, à DESY.

1973

1975

1979

...



Découverte des particules W et Z

La découverte des particules W et Z dans les expériences UA1 et UA2 au CERN confirme le Modèle Standard de la physique des particules. Suite à cette découverte, le prix Nobel 1984 a été attribué à Carlo Rubbia et Simon van der Meer.

Premier événement Z observé dans la collaboration UA1.

1984 : Collisionneur HERA

Construction du collisionneur

1983 : Collisionneur TeVatron

Construction du collisionneur

1983 : Collisionneur LEP

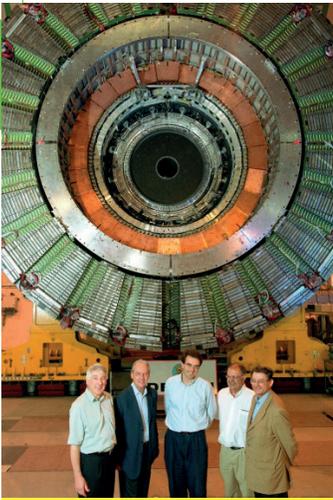
Construction du collisionneur

1983

1986

1987

Le détecteur DELPHI devant lequel posent les anciens porte-parole de l'expérience. Présents de droite à gauche : Jean Eudes Augustin, ancien directeur du LPNHE, Wilbur Venus, Tiziano Campporesi, Ugo Amaldi et Jan Timmermans. La photo a été prise 20 ans plus tard au moment de sa transformation en objet d'exposition.



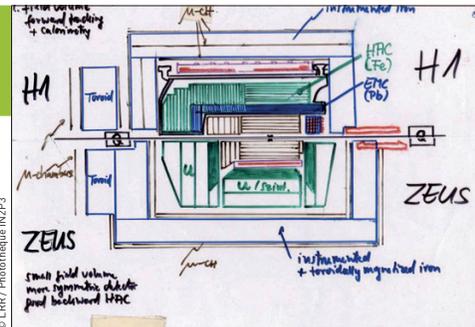
© Laurent Guiraud; Patrice Loiez / Photothèque IN2P3

Lancement de la proposition technique de DELPHI au LEP

La cérémonie du premier coup de pioche pour le LEP, collisionneur électron-positron dans un tunnel de 27 km de long au CERN, a eu lieu en présence de François Mitterrand. Dans la proposition technique de DELPHI, une des quatre expériences sélectionnées pour ce futur collisionneur électron-positron, le LPNHE s'engage à participer à la construction du détecteur de traces dit « externe ».

Proposition de l'expérience H1 sur l'accélérateur HERA à DESY, Hambourg

Deux propositions d'expérience sont défendues pour le nouvel accélérateur HERA: Zeus et H1. L'IN2P3 se concentre sur la participation à H1 à laquelle se sont joints le LPNHE, le LLR, le LAL et Saclay.

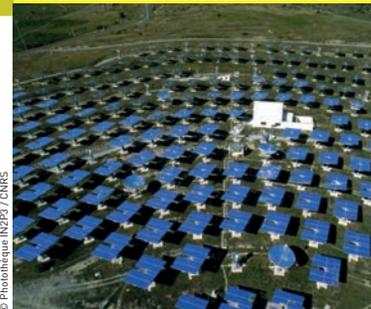


© LLR / Photothèque IN2P3

Avantages comparés des deux futurs détecteurs de HERA, H1 et ZEUS.

Début de l'activité astroparticule au LPNHE

Après l'arrêt par EDF du financement de la centrale nucléaire de Thémis dans les Pyrénées, la collaboration IN2P3-CERN-Saclay y a installé THEMISTOCLE pour tester le principe de la détection gamma de très haute énergie à partir d'un effet Cherenkov produit par les particules secondaires dans l'atmosphère. Le LPNHE a pris en charge la maintenance dans cette expérience.



© Photothèque IN2P3 / CNRS

Champ d'héliostats de la centrale solaire THEMIS, partiellement reconverti pour l'expérience THEMISTOCLE.



© Patrick DUMAS/CEA/CNRS Photothèque

Le musée de l'informatique du CCIN2P3 a conservé la machine NeXT qui a servi de premier serveur Web français

Naissance du Web au CERN

Sont nées au CERN, les bases du Web, une technologie de partage d'informations permettant de naviguer de contenu en contenu. En France, ce sont Wojciech Wojcik et Daniel Charnay, ingénieurs du CNRS travaillant au Centre de calcul de

l'IN2P3 (CC-IN2P3) du CNRS, à Lyon, qui montèrent le premier serveur, et donc la première page web (<http://info.in2p3.fr/> qui était en fait l'annuaire de l'IN2P3). Le World Wide Web naît véritablement en 1991, lorsque le premier site devient consultable hors du CERN. En septembre 1992, Tim Berners-Lee présente pour la première fois son invention lors d'une conférence scientifique conjointement organisée par le CERN et le CNRS à Annecy. A la suite de cette conférence, Wojciech Wojcik revient au CC-IN2P3 avec la technologie en poche et installe le serveur info.in2p3.fr (sur le modèle de celui du CERN, info.cern.ch) sur une station NeXTcube3, le même ordinateur que celui utilisé par Berners-Lee. Le premier serveur Web français est né !



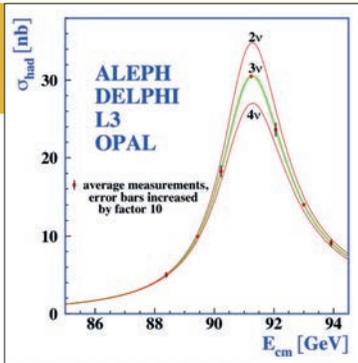
1989

Prise de données de physique du collisionneur LEP



Premières collisions sur le nouvel accélérateur LEP à Genève

Demarrée le 14 juillet 1989, l'exploitation du LEP a permis aux 4 expériences de collecter des données qui mèneront très rapidement à la découverte que la matière est organisée en 3 familles de particules.



© Photothèque IN2P3

Ajustement de la section efficace invisible pour 3 hypothèses sur le nombre de neutrinos.

Proposition d'expérience NOMAD, initiée au LPNHE et approuvée au CERN

Sur une idée de François Vannucci, l'expérience NOMAD cherchait à mettre en évidence des oscillations à courte distance de neutrinos muoniques vers des neutrinos tauiques, oscillations qui auraient renforcé le neutrino comme candidat à la matière noire. L'idée expérimentale était d'identifier cinématiquement le neutrino tau par la désintégration du tau produit dans l'interaction.



© LPNHE / Photothèque IN2P3

De gauche à droite: Boris Popov, Kyan Schahmanech, Emmanuel Gangler, Pierre Astier, François Vannucci, Antoine Letessier Selvon, Jacques Dumarchez. Photo prise en 1997 devant le détecteur NOMAD.

De gauche à droite, Georges Charpak, Fabio Sauli et Jean-Claude Santiard en train de travailler sur une chambre proportionnelle multifils en 1970.



© CERN / Photothèque IN2P3

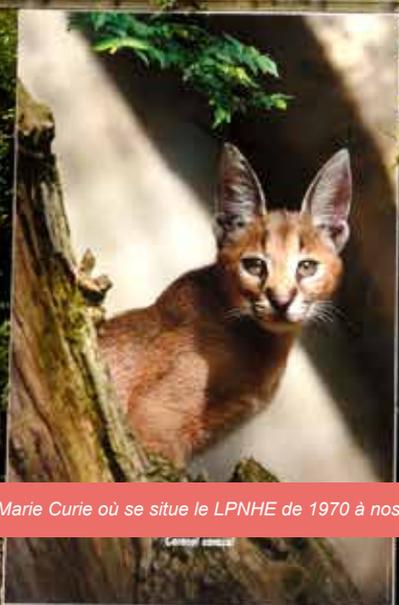
Georges Charpak obtient le prix Nobel de physique pour ses travaux sur les détecteurs de particules à haute énergie

La collision de particules forme une cascade d'autres particules détectées très efficacement par la chambre proportionnelle multifils. Elle est constituée de nombreux fils métalliques parallèles sous tension et plongés dans un gaz. Ce passage des particules libère des électrons qui génèrent des courants collectés dans les fils.

Participation du LPNHE



Pongo pygmaeus pygmaeus



Canis canis



La tour Zamansky au centre du campus Pierre et Marie Curie où se situe le LPNHE de 1970 à nos jours : vue depuis le Jardin des Plantes

Enseignement supérieur 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
 - Les financements des thèses
 - L'accueil et le suivi des étudiant.e.s
- Liste des thèses soutenues au LPNHE entre janvier 2020 et décembre 2021
- Liste des habilitations à diriger des recherches soutenues au LPNHE entre janvier 2020 et décembre 2021
- 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, de la médiation scientifique et culturelle et de la recherche participative



Enseignement supérieur et formation par la recherche

Les activités de formation et de diffusion des connaissances constituent une des missions principales du LPNHE. Les 19 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 impliquée dans l'encadrement de thèses de doctorat.

La formation par la recherche est également essentielle au laboratoire. Les équipes scientifiques et techniques accueillent de sept à huit nouveaux.elles doctorant.e.s et ont également accueilli chaque année une cinquantaine de stagiaires jusqu'à la pandémie de COVID-19 qui a réduit le nombre de stagiaires de tout niveau (du collège au M2) de moitié. En effet, le premier confinement de mars 2020 a énormément perturbé l'organisation des stages du printemps 2020 qui est normalement la période de l'année la plus chargée. Un encadrement à distance a, bien sûr, été mis en place mais le nombre de stagiaires a tout de même diminué temporairement. Au printemps 2021, Sorbonne Université a encouragé la reprise des

stages en finançant une partie des gratifications des stages de plus de 2 mois.

La prise en charge des stagiaires est coordonnée par la responsable des stages qui a proposé en septembre 2021 une refonte des priorités d'accueil puisque le nombre de sollicitations est bien supérieur à la capacité d'accueil du laboratoire qui est d'une trentaine de places en même temps.

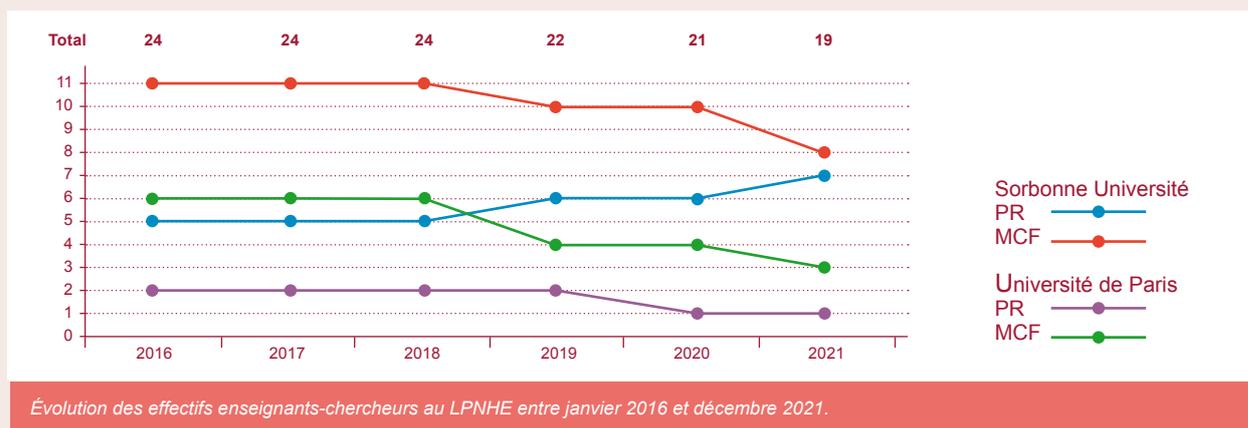
Le suivi des doctorant.e.s est continu et un comité de thèse assure pour chaque doctorant.e des conditions de travail optimales tout au long de sa présence au laboratoire.

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.ère.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 SU et de l'UP. Le graphique ci-dessous montre que le nombre total d'enseignant.e.s-chercheur.euse.s est en légère baisse depuis plusieurs années.



Évolution des effectifs enseignants-chercheurs au LPNHE entre janvier 2016 et décembre 2021.

A l'enseignement des enseignant.e.s-chercheur.euse.s titulaires, s'ajoute celui de moins d'une dizaine de doctorant.e.s chargés 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 Médecine. 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 sont impliqués 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 assurent la responsabilité de plus d'une vingtaine d'unités d'enseignement, certaines ayant des effectifs de plus de 800 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 1400 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 notamment aux activités du laboratoire : physique nucléaire et des particules, interaction particule-matière, physique numérique, théorie classique des champs, introduction à l'ingénierie nucléaire et projets expérimentaux du master « Physique Fondamentale et Applications » ou

« Électronique, Énergie Électrique, Automatique » de SU, du master « Physique Fondamentale et Applications » ou du master « Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation » du domaine « Sciences, Technologie et Santé » de l'UP ou encore du master international « Paris Physics Master » conjointement élaboré par SU et UP dont deux enseignant.e.s-chercheur.euse.s du laboratoire assurent le cours de physique subatomique.

En deuxième année de master, le laboratoire est impliqué dans trois 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 enseignants-chercheurs SU 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 instrumentation, en acquisition et traitement du signal, ainsi qu'en analyse des données. Les personnels du LPNHE y enseignent des applications des interactions particules-matière vues en première année de master à travers le prisme des capteurs pour le médical et également, les méthodes de mesure, le traitement du signal, les grands instruments, l'instrumentation et l'acquisition du signal ou les modélisations d'expériences. La co-responsabilité de cette spécialité est assurée par un enseignant-chercheur du laboratoire.

Partenariats : Sorbonne Université et ESPCI

→ 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 modélisa-

tion 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 ». Une enseignante-chercheuse du laboratoire est directrice adjointe de cette ED et est dans le bureau, 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'ED. Toutes les deux participent aux concours de recrutement. Un enseignant du laboratoire est membre de l'école doctorale « Physique en Ile de France » et assure le suivi des étudiants en fin de première année et participe au concours de recrutement depuis deux ans.

Le laboratoire est également impliqué dans la formation à l'enseignement des doctorant.e.s

chargé.e.s de mission d'enseignement affecté.e.s à l'UFR de physique de SU. Un de ses enseignants-chercheurs assure la coordination de cette formation en lien avec l'Institut de Formation Doctorale de Sorbonne Université.

Un chercheur et un enseignant-chercheur du laboratoire enseignent aux doctorants des cours avancés dans les domaines de recherche de pointe du laboratoire. De plus, 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.

La formation en alternance

Les services techniques du laboratoire permettent à plusieurs apprenti.e.s de se former en alternance. Le service électronique accueille actuellement un apprenti. Le service mécanique avait déjà accueilli 2 apprentis jusqu'en 2020 et un apprenti jusqu'en 2021, et les services généraux ont accueilli un apprenti jusqu'en 2021.



Instances nationales

- Membres du CNU section 29 :
 - Julien Bolmont (Suppléant)
 - José Ocariz (Suppléant)

Conseils, groupes, commissions

- Membre du Conseil de l'UFR :
 - Depuis 2017 : Vladimir Gligorov
 - Depuis 2019 : Sophie Trincaz-Duvoid
- Membre du bureau de l'UFR :
 - 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 de l'UFR:
 - Christophe Balland (nommé)
 - Mélissa Ridel (nommée)
- Correspondante pour la 1^{ère} année de licence du suivi de cohorte de l'UFR :
 - Mélissa Ridel
- Membre du conseil du Département du Cycle d'Intégration (DCI) :
 - Christophe Balland (nommé)
 - Bertrand Laforge (élu)
 - Mélissa Ridel (nommée)
- Membre de la commission des personnels enseignants de l'UFR :
 - Jusqu'en septembre 2021, Sophie Trincaz-Duvoid (Présidente)

Chargé.e.s de mission - structures partenaires

- Initiative Physique des Infinis de l'Alliance Sorbonne Université :
 - co-direction : Christophe Balland
 - membre du comité de pilotage et correspondante mobilité : Sophie Trincaz-Duvoid
- Domaine d'Intérêt Majeur - Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie (DIM-ACAV+) :
 - Julien Bolmont
- International Doctorate Network in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology (IDPASC) :
 - chargé de mission pour les liens avec le réseau IDPASC, représentant de Sorbonne Université et

des établissements français dans ce réseau et responsable de l'animation nationale de ce réseau, membre de l'Advisory board et du conseil scientifique de ce réseau: Bertrand Laforge

Responsabilités dans l'enseignement

- Responsables de la spécialité M2 NPAC :
 - Delphine Hardin
 - Eli Ben-Haïm
- Responsable de la spécialité M2 CIMES :
 - Pascal Vincent
- Membres du conseil de département de master de physique et applications :
 - Delphine Hardin
 - Pascal Vincent
 - Eli Ben-Haim
- Directeur.trice adjoint.e de l'école doctorale « Science de la Terre et Environnement et Physique de l'Univers, Paris (STEP'UP, ED 560) :
 - Depuis 2021, Sophie Trincaz-Duvoid
 - Jusqu'en 2021, Christophe Balland
- Membre du bureau de l'école doctorale STEP'UP :
 - Depuis 2021, Sophie Trincaz-Duvoid
 - Jusqu'en 2021, Christophe Balland
- Représentant des doctorants au conseil de l'école doctorale STEP'UP:
 - Jusqu'en 2020: Thomas Grammatico
- Correspondante pour le LPNHE auprès de l'école doctorale STEP'UP:
 - Mélissa Ridel
- Responsable de suivi au sein de l'école doctorale Physique en Ile de France :
 - Michael Joyce
- Membre du bureau pour le concours d'attribution des financements de thèse de l'école doctorale Physique en Ile de France:
 - Michael Joyce
- Membre du conseil de l'école doctorale PHENIICS :
 - Mélissa Ridel
- Co-responsable du tableau de service pour la licence :
 - Sophie Trincaz-Duvoid
- 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.trice de la Physique en L1, responsable de la plateforme de physique expérimentale en L1 :
- *Depuis septembre 2021, Mélissa Ridel*
- *Jusqu'en septembre 2021, Christophe Balland*
- Co-responsable de l'UE Mécanique Physique 1 :
- *Christophe Balland*
- 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, en 2017, Bertrand Laforge*

Université de Paris

Conseils, groupes, commissions

- Membre du conseil des enseignements :
- *Tristan Beau*
- *Depuis septembre 2021, Irena Nikolic*

Chargé.e.s de mission - structures partenaires

- LA-CoNGA-Physics, projet européen de type ERASMUS+ CBHE :
- *coordinatrice adjointe : Reina Camacho Toro*
- *coordinateur international : José Ocariz*

Responsabilités dans l'enseignement

- Membre du conseil de l'école doctorale STEP'UP :
- *Irena Nikolic*
- Membre du bureau de l'école doctorale STEP'UP :
- *Irena Nikolic*
- Responsable des formations de l'école doctorale STEP'UP pour la composante « Physique de l'Univers » :
- *Irena Nikolic*
- Responsable de l'agrégation interne physique chimie (AIPC) :
- *Tristan Beau*



Les thèses au LPNHE

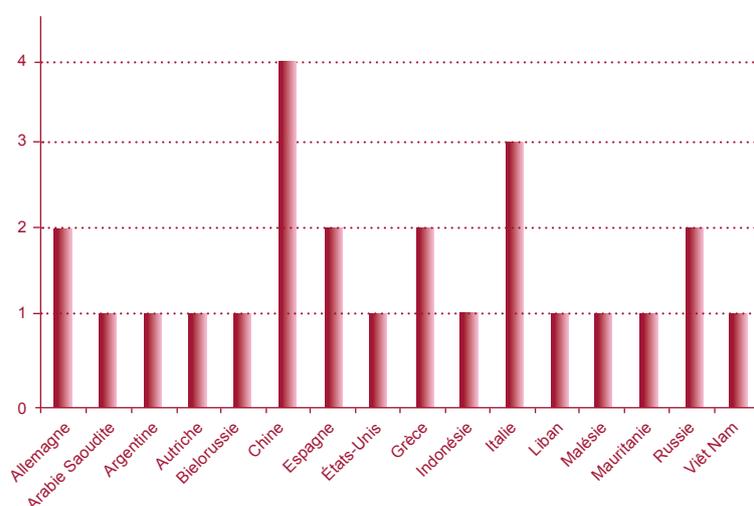


Le LPNHE s'investit particulièrement dans l'accueil des doctorant.e.s (photo ci-dessus) en agissant à trois niveaux : la visibilité du laboratoire pour les étudiant.e.s en recherche de thèse, l'accueil des doctorant.e.s et enfin leur suivi durant la thèse. Ces actions sont menées par un comité des thèses. Depuis 2012, de sept à huit en moyenne nouveaux.elles doctorant.e.s rejoignent 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 de 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 SU et de l'UP, ou par l'organisation de visites du laboratoire et une politique de stages volontariste auprès des étudiant.e.s de L3 et M1 de SU et de l'UP. 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 la Chine, la Colombie, le Brésil, la Pologne, le Venezuela et l'Italie. Les collaborations internationales dans lesquelles travaillent les chercheur.euse.s contribuent aussi à la visibilité du LPNHE à l'étranger. Ainsi, entre 2017 et 2021, sur les quelque 40 doctorant.e.s présent.e.s au laboratoire, 25 viennent de pays étrangers (graphique ci-dessous).



Pays d'origine des 25 doctorant.e.s venu.e.s de l'étranger en thèses au LPNHE entre 2017 et 2021.

Les financements des thèses

Le financement des thèses au LPNHE est assuré par l'ED 560 « STEPUP » (contrats SU et UP), par le Labex ILP (pour un début de thèse jusqu'en 2019) puis par l'initiative Sorbonne Université, Physique des 2 Infinis, qui a pris le relai des financements IDEX ou les bourses doctorales internationales mises en place grâce au programme européen de mobilité Co-Fund dites INSPIRE de l'Université de Paris.

D'autres financements viennent de l'IN2P3 (notamment MIT) ou des IRL (*International Research Laboratory*) associés comme le Laboratoire Franco-Chinois de Physique des Particules à Beijing - FCPPL -, le Centre Pierre Binétruy à Berkeley ou l'IRL avec l'Université de Tokyo.

Source des financements / Années	2017	2018	2019	2020	2021	Total
Contrats Doctoraux Spécifiques Normaliens					1	1
IN2P3 (dont MITI)	0,5	1	1	2	2	6,5
ERC DAMIC-M			2			2
ERC Recept	2			2		4
Etranger		1	1			2
Chinese Scholarship Council	1					1
Fondation CFM			1		1	2
Ecole doctorale STEP'UP	3,5	3	3	3	2	14,5
Labex Institut Lagrange de Paris	1		1			2
INITIATIVE Physique des Infinis - SU				1	1	2
INSPIRE - UP			1			1
Ressources propres	1				0,5	1,5
Université de Stockholm					0,5	0,5
Total	8	5	10	8	8	40

Origine des financements des thèses obtenus en 2017, 2018, 2019, 2020 et 2021.

Des possibilités de financement existent également grâce à la région Ile-de-France (à travers le Domaine d'Intérêt Majeur Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie - DIM-ACAV - qui se termine et sera peut-être renouvelé en 2022 pour 5 ans à travers le nouvel appel à projet DRIM - Domaines de Recherche et d'Innovation Majeurs d'Ile-de-France -), à l'ANR, à la fondation CFM pour la recherche (*Capital Fund Management*) ou pour des étudiant.e.s issus des ENS ou de l'École Polytechnique, ainsi que par des financements provenant de programmes internationaux (citons, par exemple, l'*European Research Council* - ERC -, les bourses de l'Ambassade de France pour les étudiants vénézuéliens ou encore le programme de co-tutelle avec l'Italie International Doctorate on AstroParticle Physics - IDAPP -, le *China Scholarship Council* (CSC), programme collaboratif offrant une formation doctorale aux candidat.e.s chinois.e.s dans les disciplines représentées dans les universités tutelles ou une collaboration développée grâce l'implication d'un chercheur avec l'Université de Stockholm). Le programme CAPES-COFECUB entre le Brésil et la France permet également l'accueil de doctorants brésiliens en visite pour une année au laboratoire et deux étudiants sont arrivés en décembre 2021 dans ce cadre.

Le tableau ci-dessus 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 lors de leur deuxième année de doctorat.

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.e « parrain/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 informe le/la doctorant.e des possibilités qui lui sont offertes (financement d'une école d'été, d'une conférence internationale au cours de la thèse et de leur participation aux Journées Jeunes Chercheurs de la SFP). Une réunion des parrains/marraines se tient trois à quatre 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.

Une rencontre avec des ancien.ne.s doctorant.e.s du laboratoire a été organisée pour les doctorant.e.s actuel.le.s lors de la journée célébrant les 50 ans de l'IN2P3 et du LPNHE et a permis des échanges sur l'employabilité après la thèse. C'est une source de stress important des doctorant.e.s en général et au laboratoire notamment alors qu'en physique des deux infinis, l'employabilité est excellente mais se fait dans des domaines extrêmement variés, ce que les doctorant.e.s mettent du temps à réaliser. A ce titre, l'association des Doctorants et Docteurs des deux Infinis (D2I2) fait un travail de réseau social et professionnel important.

Suite au confinement de mars 2020 et à la difficulté de poursuivre une thèse dans ces conditions complexes d'accès au laboratoire ou aux sites expérimentaux notamment, des possibilités de prolongation de la durée des thèses en cours ont été mises en place avec le plus de bienveillance possible. Toutefois, la réponse dépend de la source de financement.

Enfin, depuis 2011, un.e représentant.e des doctorant.e.s siège au conseil de laboratoire.



Comité des thèses :

Sophie Trincaz-Duvoid (Fonctionnement du système des parrains/marraines, Gestion de la base de données des doctorant.e.s et webmaster)
Précédemment, Sébastien Bongard de septembre 2018 à septembre 2020
<http://lpnhe-doctorants.in2p3.fr>

2020

- Latifa KHALIL

GROUPE : DAMIC

TITRE : Lecture et contrôle de CCD, traitement numérique du signal pour DAMIC

SOUTENANCE : 16 juin 2020

- Gabriel EMERY

GROUPE : H.E.S.S.

TITRE : *Study of the variability of active galactic nuclei at very high energy with H.E.S.S.*

SOUTENANCE : 16 septembre 2020

- Jad ZAHREDDINE

GROUPE : ATLAS

TITRE : Mesure de la masse du quark top dans des événements tt avec des mésons charmés dans l'état final avec les données du Run 2 de l'expérience ATLAS auprès du LHC

SOUTENANCE : 23 septembre 2020

- Jean-Philippe ZOPOUNIDIS

GROUPE : XENON

TITRE : *Search for leptonically interacting dark matter with the XENON1T electronic recoil data*

SOUTENANCE : 30 septembre 2020

- Yufeng WANG

GROUPE : ATLAS

TITRE : *Search for a new resonance decaying into two photons with the ATLAS detector at LHC*

SOUTENANCE : 5 novembre 2020

- Tou DA YU

GROUPE : LHCb

TITRE : *Test of lepton flavour universality in $b \rightarrow sll$ decays*

SOUTENANCE : 14 décembre 2020

- Leopold ALEXANDER

GROUPE : ATLAS

TITRE : *Dark Matter Searches in Association with a Higgs Boson using $\sqrt{s} = 13$ TeV ATLAS Data and Performance Evaluation of the High-Granularity Timing*

SOUTENANCE : 16 décembre 2020

- Florian REISS

GROUPE : LHCb

TITRE : *Test of lepton universality of electrons and muons and primary vertex reconstruction on GPUs for the LHCb Upgrade*

SOUTENANCE : 18 décembre 2020

2021

- Luis PASCUAL DOMINGUEZ

GROUPE : ATLAS

TITRE : *Studies of photon isolation in a large-pileup environment and search for axion-like particles decaying into two photons with the ATLAS detector at the LHC*

SOUTENANCE : 29 janvier 2021

- Ariel MATALON

GROUPE : DAMIC

TITRE : Recherche de Matière Noire Légère avec les Expériences DAMIC à SNOLAB et DAMIC-M : Investigations de Bruit de Fonds Radioactifs et sur les Caméras CCD Skipper en Silicium

SOUTENANCE : 13 septembre 2021

- Reem TAIBAH

GROUPE : ATLAS

TITRE : Mise à jour du trajectographe d'ATLAS en préparation de la phase à haute luminosité du CERN LHC : étalonnage et caractérisation de modules à pixels du détecteur de traces actuel et futur d'ATLAS

SOUTENANCE : 17 septembre 2021

- Christelle LEVY

GROUPE : H.E.S.S.

TITRE : *Energy dependent time delays induced by Lorentz invariance violation: Discriminating source intrinsic effects with blazar modeling and preparation of population studies with H.E.S.S., MAGIC and VERITAS*

SOUTENANCE : 24 novembre 2021

LISTES DES HABILITATIONS À DIRIGER
DES RECHERCHES SOUTENUES
AU LPNHE ENTRE JANVIER 2020
ET DÉCEMBRE 2021

2020

- Marco MARTINI

GROUPE : T2K

TITRE : *Electroweak excitations of the nuclear systems : from neutrino cross sections to astrophysical phenomena*

SOUTENANCE : 16 décembre 2020

2021

- Stefano RUSSO

SERVICE : ELECTRONIQUE

TITRE : *An example of evolution of digital electronics in physics experiments*

SOUTENANCE : 25 février 2021

- Olivier MARTINEAU

GROUPE : GRAND

TITRE : *The path towards the Giant Radio Array for Neutrino Detection*

SOUTENANCE : 21 juillet 2021

Les stages au LPNHE

Le laboratoire accueille en moyenne chaque année une cinquantaine de stagiaires issus de formations diverses, jusqu'à la pandémie de COVID-19 qui a réduit le nombre de stagiaires temporairement de moitié : étudiants en Licence (principalement en niveau L3), Master (M1 comme M2) mais aussi écoles d'ingénieurs et formations professionnalisantes. On peut également citer l'accueil régulier de collégiens en classe de 3^{ème} et de lycéens pour une semaine de découverte du monde professionnel. En 2021, malgré le retour à un accueil sans réserve de stagiaires, le LPNHE n'a pas retrouvé les 50 stagiaires de 2019 car la date des stages de L3 à Sorbonne Université a changé en 2021 pour passer de décembre à janvier. Les stagiaires de L3 manquent donc dans le bilan de l'année 2021.

Les formations d'origine des stagiaires

Les stagiaires en recherche sont issus de Masters de physique (niveau M1 et M2), et de Licence (L3). Devant l'afflux de demandes spontanées, priorité est donnée aux étudiants originaires des universités de tutelle, de bon niveau et motivés par la perspective de continuer vers un M2 recherche. Les étudiants de SU sont majoritaires du fait de l'implantation du laboratoire sur son campus. Dans le cadre de la formation de Licence de physique de SU, les étudiants de L3 ont un stage obligatoire de 15 jours en janvier. Le LPNHE participe pleinement à ce programme de découverte du milieu de la recherche en accueillant une dizaine de ces étudiants chaque année.

ANNÉE	NIVEAU					
	Collège	IUT/Ecole d'ingénieur	Licence	Master 1	Master 2	Total
2019	16	1	18	9	8	52
2020	2	1	7	12	3	25
2021	2	3	4	16	8	34
Total	20	5	29	37	19	111

Nombre de stagiaires accueillis au LPNHE par année et niveau.

L'offre de stages

C'est souvent par le biais des enseignants-chercheurs que les étudiants ont un premier contact avec le LPNHE. Une responsable des stages au laboratoire assure le lien entre les étudiants 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 SU et du L3 de SU pour les stages de janvier. De nombreuses candidatures spontanées de plusieurs universités sont également reçues tout au long de l'année.

Les stages de M2 sont un cas à part puisqu'ils constituent le plus souvent un prélude à une thèse effectuée dans le même groupe de recherche avec le même encadrant. Les propositions de stages pour les M2 sont couplées aux sujets de thèse et diffusées aux étudiants via les M2, les écoles doc-

torales et le site internet du laboratoire. Dans certains Masters de la région parisienne (NPAC par exemple), le directeur de l'ED et les directeurs des laboratoires présentent les sujets de thèse (et donc de stages M2) aux étudiants. Cette présentation a pris des formes différentes suivant les années avec des posters des potentiels encadrants.



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-chercheurs ou chercheurs) est d'environ un par an. Les services techniques accueillent également quelques stagiaires et forment des apprentis.

ANNÉE	THÉMATIQUE				
	Asymétrie Matière Antimatière	Cosmologie et Energie Noire	Masses et Interactions Fondamentales	Rayonnement Cosmique et Matière Noire	Service Administratif et Techniques
2019	18%	20%	27%	18%	17%
2020	16%	20%	36%	20%	8%
2021	6%	21%	21%	45%	6%

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 futurs stagiaires (de manière plus générale, tous les nouveaux arrivants) sont inscrits plusieurs semaines à l'avance dans la base de données de Gestion des Person-

nels, ce qui déclenche l'attribution d'un bureau et la programmation d'une clef, ainsi que la préparation d'un poste informatique. Un « guide d'accueil du 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 encadrants à la préparation de l'accueil des stagiaires au LPNHE.

Responsable des stages :

Sophie Trincaz-Duvoid

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

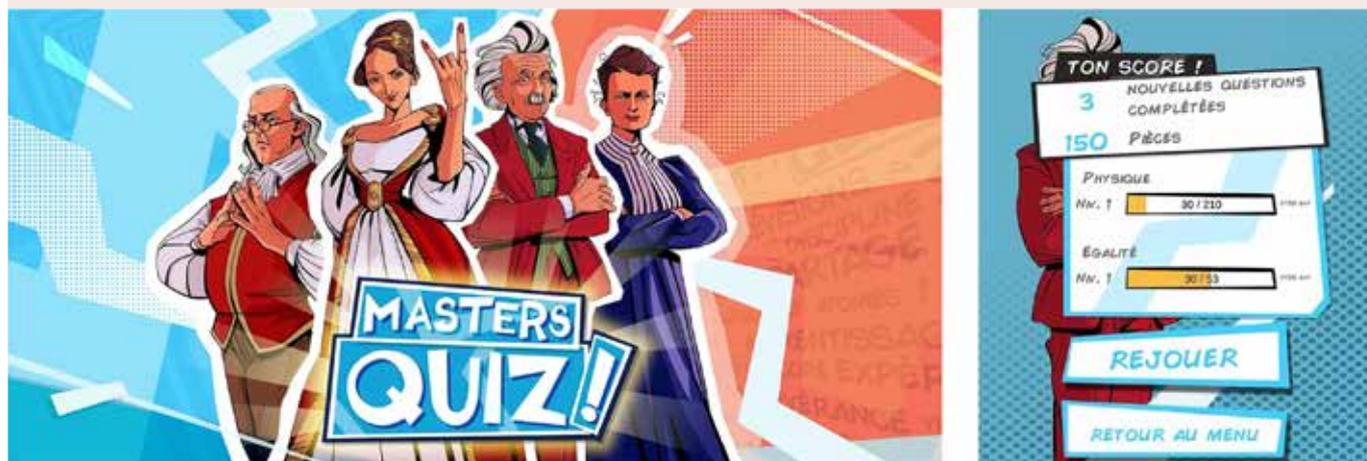
Ikigai est un portail de jeux vidéo éducatifs à destination du public étudiant. Il se destine à un usage généralisé à l'ensemble de l'enseignement supérieur français à court terme, puis à l'ensemble de l'enseignement secondaire et au grand public. Porté initialement par Sorbonne Université, il est depuis 2021 gérée par l'association *Games For Citizens* (gfc.ikigai.games). Son objectif est de constituer le point d'entrée de référence pour du contenu ludique éducatif de qualité correspondant aux attentes des étudiants. 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.

En quelques années, le jeu vidéo est devenu un phénomène de société mondial qui s'étend à toute la sphère sociale et culturelle. Son industrie pèse plus que celle du cinéma et du livre dans le PIB. 90% des étudiants et étudiantes sont des joueurs ou joueuses. Pourtant, le jeu vidéo n'a pas trouvé toute sa place dans le monde de l'éducation. Et il y a à cela des raisons profondes qu'Ikigai se propose de résoudre pour mettre les jeux vidéo pédagogiques au service de l'enseignement en s'adressant à un public de joueurs arrivé à maturité.

La plateforme Ikigai se compose de 3 parties principales : le portail web mettant à disposition les jeux vidéo (un exemple est donné en illustration), les jeux et les services associés, et une solution de récupération et de traitement des données de jeux (*Learning Analytics*). Elle permettra l'obtention d'importants volumes de données et 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 développée par une équipe pluridisciplinaire regroupant scientifiques et pédagogues de nombreuses disciplines, professionnels du jeu vidéo, et spécialistes en *Learning Analytics* et intelligence artificielle. Ce projet est dirigé par Bertrand Laforge (équipe ATLAS du LPNHE) qui a initié et porte ce projet depuis plus de 4 ans et qui préside depuis 2020 l'association *Games for Citizens* qui est désormais le support administratif du consortium.

Responsable du projet :
Bertrand Laforge



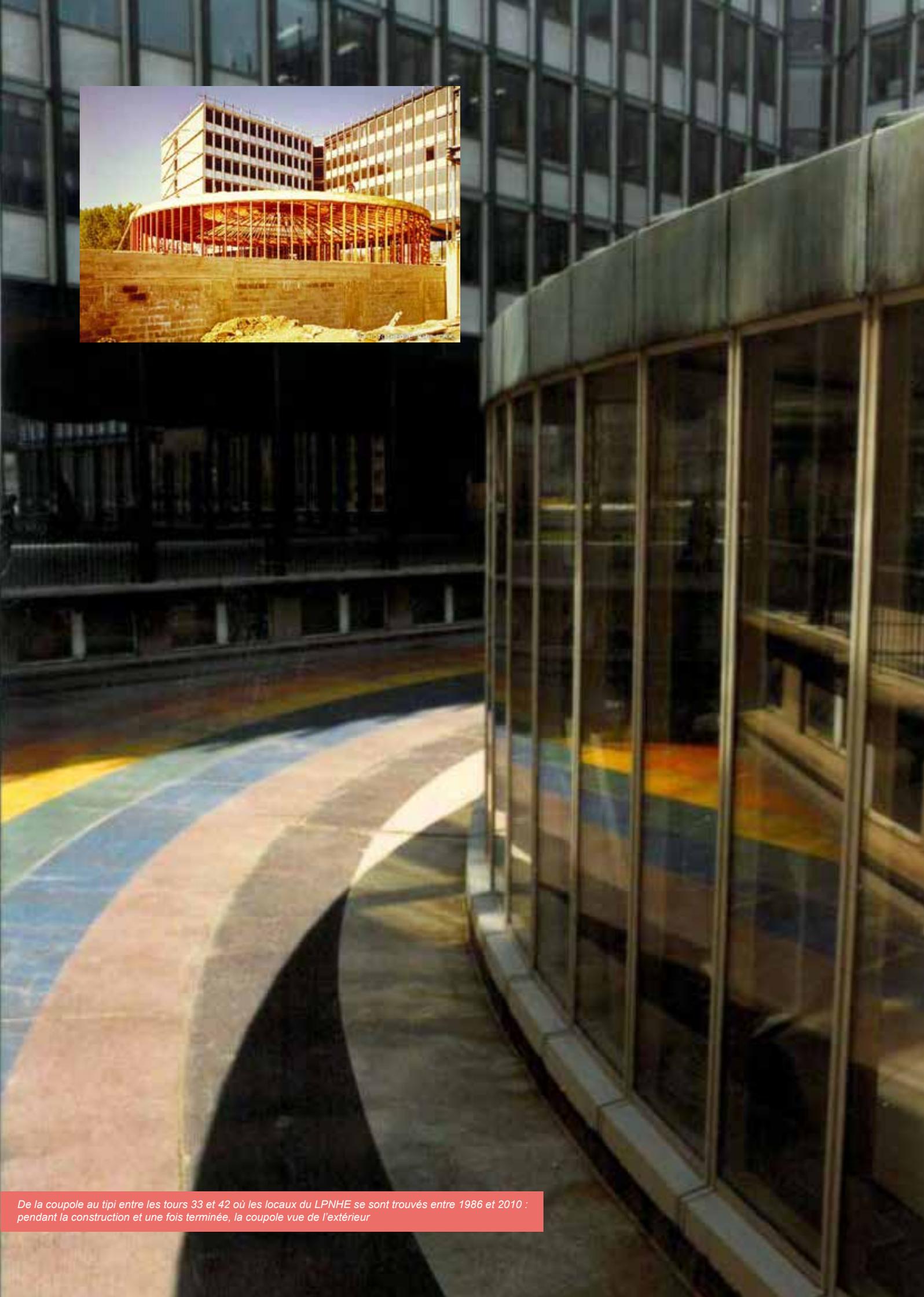
Master Quiz

Utilisez ce quiz sur toutes les disciplines pour défier vos amis, réviser... et vous amuser !

Illustration du début d'un jeu de quiz sur toutes les disciplines qui permet aussi bien de réviser et de s'amuser, seul ou en défi multijoueur.



De la coupole au tipi entre les tours 33 et 42 où les locaux du LPNHE se sont trouvés entre 1986 et 2010 : en 1970 avant l'installation du LPNHE, la coupole abrite alors le CCPN (Centre de Calcul de Physique Nucléaire)



De la coupole au tipi entre les tours 33 et 42 où les locaux du LPNHE se sont trouvés entre 1986 et 2010 : pendant la construction et une fois terminée, la coupole vue de l'extérieur

1995



L'injecteur principal (au premier plan) et le Tevatron (second plan), au laboratoire national Fermi près de Chicago.

1994 : Collisionneur PEP-II

Découverte du quark top à Fermilab
Découverte du quark top par les expériences CDF et D0 sur le Tevatron à Fermilab au cours du premier Run de prise de données de cet accélérateur.

1992

1992

Prise de données de physique du collisionneur Tevatron - Run 1

Prise de données de physique du collisionneur

1993

Vue des électrodes en accordéon lors de la construction du calorimètre.



© LPNHE / Photothèque IN2P3

Proposition de l'expérience ATLAS au CERN

En prolongement de la R&D sur la calorimétrie à argon liquide (LAA-RD3), des laboratoires de l'IN2P3 (dont le LPNHE) et du CEA proposent un calorimètre à géométrie en accordéon offrant une réponse rapide aux particules et une excellente stabilité des mesures. Ce sera un défi de construction. Le projet est préféré par la collaboration ATLAS au calorimètre Spacal.

Début de l'activité «recherche de violation de CP» au LPNHE

L'approbation de 2 nouveaux collisionneurs asymétriques, PEP-II à Stanford et KEK-B à Tsukuba a conduit des groupes français dont le LPNHE à rejoindre la collaboration BaBar.

1994

Proposition de l'expérience BaBar au SLAC

Le LPNHE et les autres laboratoires français se sont engagés pour la construction de compteurs Cherenkov pour l'identification des particules (le DIRC).



© Photothèque IN2P3 / CNRS

Membres de la collaboration BaBar posant devant le détecteur DIRC.

L'expérience CAT
la nébuleuse de
rence de toute

CAT (Cherenkov) installé à Font R rayons gamma a



© Vera Vrandić / Photothèque IN2P3

Ca da

... Les grandes dates des découvertes

Participation du LPNHE

1996 :
Collisionneur
LHC

Construction du collisionneur

Construction du collisionneur

1999

Prise de données de physique du collisionneur HERA

1996

Jouvence du collisionneur Tevatron

Collisionneur LEP

2000

1996

1997

1999

Le télescope CAT mesure le spectre d'émission de la nébuleuse du Crabe en 1996 qui devient une référence dans toute une discipline

Le télescope Chandra (Chandra X-ray Observatory) est un télescope spatial lancé en 1998 et permettant la détection de rayons X à haute énergie (→200 GeV).

■ Début de l'activité de cosmologie observationnelle au LPNHE

Après un séjour à Berkeley (LBL) dans le groupe de Saul Perlmutter, Reynald Pain a initié au LPNHE une activité de cosmologie observationnelle en participant au Supernova Cosmology Project.

■ Découverte de l'expansion accélérée de l'Univers

Le Prix Nobel 2011 a été attribué à Adam Riess, Brian Schmidt et Saul Perlmutter pour la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers. Depuis 1997, le LPNHE participe à l'analyse des données de supernovae retraçant l'histoire de l'Univers.

■ Observation de la grande variabilité de Markarian 501

Première observation par CAT de la grande variabilité (jusqu'à un facteur 7) des flux de gamma reçus du noyau actif de galaxie Mrk 501, observation corroborée par les expériences Whipple et HEGRA.

■ Participation à la jouvence de D0

À l'occasion de la mise en place d'un programme majeur d'amélioration des détecteurs du Tevatron, le LPNHE a proposé de participer à la seconde phase de l'expérience D0 en contribuant à la calibration électronique du calorimètre.

■ Proposition de construire l'Observatoire H.E.S.S. en Namibie



© Julien BOLLMONT/Calibration HESS/CNRS - Photothèque

Filés d'étoiles sur le site de l'expérience HESS (High Energy Stereoscopic System), en Namibie, comprenant quatre télescopes de 13 m de diamètre. Ils forment le détecteur de rayons gamma de très haute énergie le plus sensible au monde. L'expérience apporte une mesure précise de l'intensité et de la répartition énergétique de l'émission gamma. Elle montre que les rayons cosmiques sont plus nombreux et plus énergétiques au centre de la Voie Lactée qu'au voisinage de la Terre.



Caméra de CAT exposée dans les locaux du LPNHE.



Télescope de l'Observatoire Inter-Américain du Cerro Tololo au Chili.

■ Proposition de construction de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine

La question de l'origine et de la nature des rayons cosmiques d'énergie extrême motive la construction d'un gigantesque réseau échantillonnant au sol les gerbes atmosphériques déclenchées par ces rayons cosmiques. La contribution du LPNHE porte sur le système de déclenchement et d'acquisition du réseau ainsi que sur le transfert de données par télécommunication.

1997 : Observatoire H.E.S.S.

Construction de

1999 : Observatoire CFHT

1999 : Observatoire Pierre Auger



■ Découverte des oscillations de neutrinos

L'expérience Super-Kamiokande (au Japon) avec les neutrinos atmosphériques puis l'expérience SNO (au Canada) avec les neutrinos solaires ont établi que les neutrinos oscillaient et étaient donc massifs. Le Prix Nobel 2015 a été attribué à Takaaki Kajita et Arthur McDonald.

Participation du LPNHE

2003 : Accélérateur J-PARC

Construction

Prise de données de physique du collisionneur

Prise de données de physique du collisionneur HERA

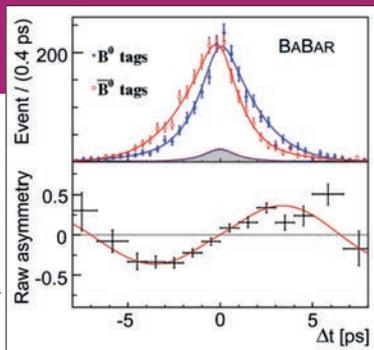
Run de prise

2001

2001

Première observation de la violation de la symétrie CP dans les mésons « beaux »

La découverte de la violation de CP dans les mésons B a été annoncée par les expériences BaBar et BELLE pendant l'été 2001. Et en 2008, le Prix Nobel a été attribué à Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa pour leurs travaux théoriques sur la violation de CP.



© Photothèque INP3

Amplitude de l'asymétrie de violation de CP en fonction du temps dans des événements où sont reconstruits des mésons B neutres.

2003

Mise en service des quatre télescopes de l'observatoire H.E.S.S.

La partie française de la collaboration a eu en charge la réalisation et la construction des caméras. Le LPNHE est chargé de la conception et de la production de leur électronique ainsi que du système d'acquisition.

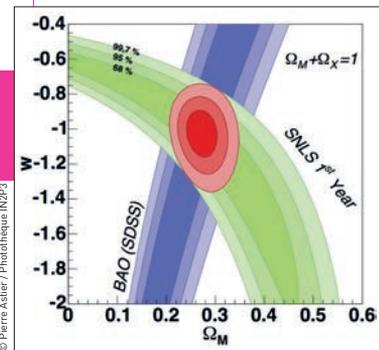


© LRR / Photothèque INP3

Les 4 télescopes de l'expérience H.E.S.S. installés sur le site du Gamsberg en Namibie.

2006

Contraintes cosmologiques obtenues par le diagramme de Hubble des supernovae de SNLS d'une part, les oscillations acoustiques des baryons d'autre part et les contraintes jointes pour un univers plat.



© Pierre Astier / Photothèque INP3

Mesure du taux d'accélération de l'expansion de l'univers, via les distances à des supernovae lointaines

L'analyse des données de la première année du Supernova Legacy Survey (SNLS) enregistrées grâce à la caméra MegaCam produit les meilleures contraintes sur l'équation d'état de l'énergie noire.

l'observatoire H.E.S.S.

2003

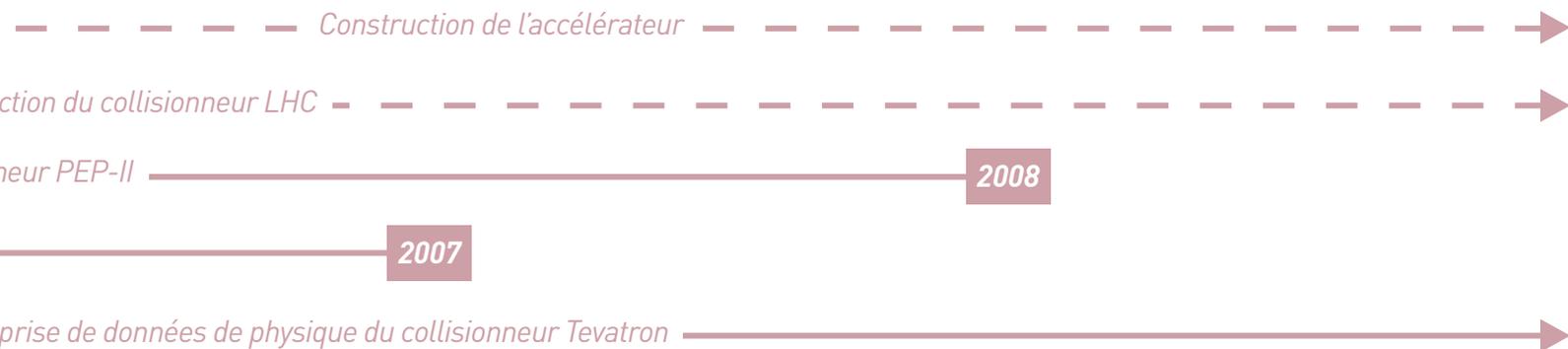
Construction de la caméra MegaCam

2003

Prise de données de physique à l'observatoire

Construction de l'observatoire Pierre Auger

2004



2007

Proposition d'expérience T2K au Japon pour l'étude des oscillations de neutrinos

Après une première expérience de recherche d'oscillations à grande distance au Japon (K2K), une collaboration élargie a proposé d'utiliser le nouveau complexe d'accélérateurs J-PARC pour l'expérience T2K dont le détecteur proche serait installé dans l'ancien aimant de UA1/NOMAD transporté au Japon et le détecteur lointain serait Super-Kamiokande. La contribution du LPNHE a porté sur l'alimentation électrique de l'aimant et sur l'électronique des chambres à projection temporelle du détecteur proche.



© T2K collaboration / Photothèque IN2P3

Proposition de création du réseau de télescopes Cherenkov CTA

Lancement d'une design study européenne de 3 ans avec pour objectif de gagner un ordre de grandeur en sensibilité sur un spectre de 4 décades au delà de 10 GeV par la construction d'un vaste réseau de télescopes.

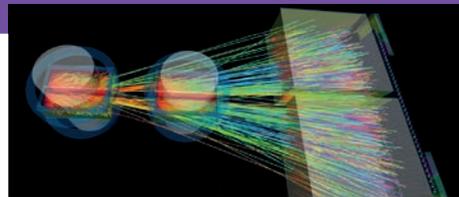
2008

Premières collisions de protons dans le LHC

Malheureusement un accident de cryogénie en septembre 2008 a nécessité plus d'une année de réparation. Le redémarrage pour une réelle prise de données n'a eu lieu que le 20 novembre 2009.

Participation à NA61

Au niveau de précision requis par l'expérience T2K, une bonne compréhension du faisceau de neutrino est indispensable. Une partie de la collaboration T2K, dont le groupe du LPNHE, participe au CERN à une expérience de hadronproduction dédiée.



© NA61/SHINE collaboration / Photothèque IN2P3

Visualisation d'un événement reconstruit dans le spectromètre NA61.

Mise en évidence de l'anisotropie des rayons cosmiques aux énergies extrêmes par Observatoire Pierre Auger

La question de l'origine et de la nature des rayons cosmiques d'énergie extrême a motivé la construction du gigantesque réseau échantillonnant au sol les gerbes atmosphériques déclenchées par ces rayons cosmiques, l'observatoire Pierre Auger. La contribution du LPNHE a porté sur le système de déclenchement et d'acquisition du réseau ainsi que sur le transfert de données par télécommunication.



© Photothèque

Piera Luisa Ghia devant une cuve de l'observatoire Pierre Auger.

Observatoire CFHT avec la caméra MegaCam

Participation du LPNHE

2008



*De la coupole au tipi entre les tours 33 et 42 où les locaux du LPNHE se sont trouvés entre 1986 et 2010 :
le tipi qui remplace la coupole lors de la dernière phase des travaux de désamiantage*

Organisation du laboratoire

- Services techniques
 - Service d'électronique et d'instrumentation
 - Service informatique
 - Service mécanique
- Plateaux techniques
 - Evolution des capacités de caractérisation des détecteurs semiconducteurs
 - 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
 - Pôle logistique et maintenance (services généraux)
 - Création d'un groupe d'aide aux réponses aux appels à projet dite « cellule ANR » et premier bilan
 - Communication et documentation
 - Prévention des risques professionnels - Radioprotection - Rayonnements optiques artificiels
- Feuille de route sur l'intelligence artificielle
- Organigramme
- Personnels au laboratoire au 31/12/2021



Organisation du laboratoire

Les activités de recherche du LPNHE sont amplement centrées sur des projets scientifiques expérimentaux. Les personnels sont répartis en groupes de recherche, services techniques et supports. Les services techniques - mécanique, électronique, informatique - 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. Plusieurs plateaux techniques et leurs environnements permettent leur mise en œuvre et fonctionnent avec le concours essentiel des services généraux. Un effort particulier a été fait en 2020 et 2021 pour mettre à niveau et améliorer les équipements du laboratoire notamment avec une nouvelle capacité de prototype et de réalisation de pièces mécaniques en s'équipant d'une nouvelle imprimante 3D multi-matériaux, une capacité d'analyse de signaux électroniques avec un oscilloscope 12 GHz, une ligne d'azote liquide pour le futur laboratoire Xelab (voir l'article page 34 sur l'expérience XENON dans Activités Scientifiques et techniques), le renouvellement de la centrale de traitement d'air des salles blanches, ou l'achat d'une machine de tests sous pointes de détecteurs semi-conducteurs, de micro-circuits et de circuits imprimés à très bas bruit, une machine permettant au laboratoire de rester compétitif pour la conception des nouvelles générations de détecteurs, obtenue grâce à un financement SESAME avec l'objectif d'en faire une plateforme accessible au-delà des personnels du laboratoire. Un renouvellement important du matériel informatique de tous niveaux est également en cours (serveur CEPH, onduleur, switch réseau, stockage, ...).

Les ingénieur.e.s et les technicien.ne.s du laboratoire sont sous la responsabilité d'un.e chef.fe de service et participent à un ou plusieurs projets relevant de leurs

compétences. La direction technique du laboratoire supervise les trois services techniques et les services généraux, favorisant ainsi la coordination entre services et projets. Les projets sont régulièrement suivis au cours de réunions où le/la responsable scientifique et le/la responsable technique de chaque projet présentent son avancement ainsi que les besoins en personnels techniques et en matériel, demandes arbitrées ensuite en fonction des priorités du laboratoire. Les projets associés aux activités scientifiques en émergence 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 grande 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.

Plusieurs équipes ont montré un intérêt croissant dans des utilisations de méthodes d'intelligence artificielle qui semblent améliorer la sensibilité des expériences de façon importante et sont devenues accessibles. Aussi, un groupe réflexion a vu le jour pour réfléchir à comme accompagner cette évolution au laboratoire. De même, les équipes sont de plus en plus confrontées à la nécessité de répondre à différents appels à projets, et une cellule dite cellule ANR a été créée pour aider les proposant.s.

Services techniques

Service d'électronique et d'instrumentation

Le service Électronique et Instrumentation du LPNHE comprend dix-sept personnes (photo ci-dessous) dont 8 ingénieur(e)s de recherche, 4 ingénieurs d'études, 3 assistants-ingénieurs et 2 technicien(ne)s. Le service est impliqué dans des projets de physique auprès des grands accéléra-



teurs (notamment CERN, DESY, JPARC), d'astroparticules ou de cosmologie au sol. Un pôle CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et Câblage offre toute l'assistance nécessaire pour la réalisation de cartes d'électronique. Les électroniciens 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 collaborations 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, 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. Les différentes expériences font de plus appel à la qualité et à la gestion de projet. 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 Cadence, intelFPGA, Mentor-Graphics, Xilinx et des kits de conception de fondries. 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 *Printed Circuit Board*). Les experts CAO réalisent une vingtaine d'études par an, allant du PCB double face au PCB 14 couches avec micro-vias, de la classe 4 au hors classe 88 μm . 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



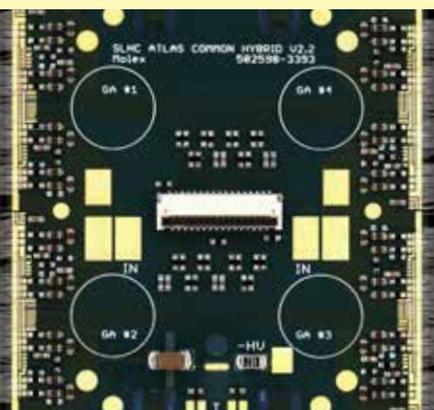
Détail de connexions de quad-module/substrat. Plusieurs types de boucles ont dû être définis.

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 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 dessouder 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.

Enfin, en novembre 2018, le laboratoire a fait l'acquisition d'une station de micro-câblage : machine de *wire-bonding* (connexion de fils d'aluminium de 25 μm par *wedge-bonding*) et machine de tests de traction de fils. Durant l'année 2019, un pôle de 4 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 (photo ci-dessus). Les efforts de l'équipe de micro-câblage, malgré les conditions de travail difficiles en 2020 et 2021 en raison de la crise sanitaire, ont permis d'atteindre un jalon majeur : le laboratoire a été officiellement qualifié pour la production d'assemblage des modules de détecteurs à pixels sur substrats pour l'upgrade de l'expérience LHC ATLAS-ITk. Le LPNHE prend notamment en charge le micro-câblage des capteurs à silicium sur substrat kapton (photo ci-après), à savoir plus de 600 fils de connexion par modules et de l'ordre d'un millier de modules à assembler de 2022 à 2025.



Prototype de 'quad-module' pour le détecteur ITk d'ATLAS assemblé (669 fils de connexion détecteur-substrat).

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 2019 à 2021, les principales réalisations de circuits intégrés ont été :

- pour l'expérience DAMIC-M, technologie 0,35 μm : CROC2 : circuit de lecture de CCD pour l'expérience de recherche de matière noire DAMIC-M, qui répond à un cahier des charges extrêmement sévère et devra fonctionner au froid très proche du détecteur (à 120 degrés Kelvin) et DCA (*Differential CCD Amplifier*), une version simplifiée de CROC ;
- développement de *building blocks* (entrées-sorties rapides au format Aurora) pour la série de puces RD53B de lecture de détecteurs à pixels des jouvences de détecteurs ATLAS et CMS du LHC.

CHIFFRES CLEFS

1 μV , c'est l'objectif de bruit rapporté à l'entrée du chip de lecture CROC de DAMIC

Équipe :

Philippe Bailly, Julien Coridian, Thibaud Carcone, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, Romain Gaior, Claire Juramy-Gilles, Olivier Le Dortz, Hervé Lebbolo, David Martin, Jean-Luc Meunier, Jean-Marc Parraud, Eric Pierre, Stefano Russo, Francois Toussenet, Alain Vallereau

Doctorante :

Latifa Khalil (jusqu'en juin 2020)

EXPERTISES

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, assemblage et intégration de modules électroniques).

Service informatique

Le service informatique est composé de 12 personnes : 7 ingénieurs de recherche, 4 ingénieurs d'étude et 1 technicien.



Le service est constitué de trois pôles :

- L'Administration Systèmes et Réseaux, qui garantit le bon fonctionnement et la sécurité de l'ensemble des systèmes d'information du laboratoire ainsi que le support aux utilisateurs. Ce pôle 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. L'activité d'assistance aux utilisateurs est assurée via un système de gestion de tickets ;
- La Grille de calcul et le Cloud ;
- Les développements spécifiques pour les expériences scientifiques sont explicités dans les différents chapitres relatifs aux équipes de recherche.

L'infrastructure serveurs et réseaux du service

Le LPNHE dispose de trois salles informatiques. Les deux salles principales de 65 m² 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 284 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 des laboratoires de l'APC (AstroParticule et Cosmologie), LPTHE (Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies) et LCQB (Laboratory of Computational and Quantitative Biology).

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 d'un hyperviseur, les serveurs virtuels qu'il héberge peuvent être transférés sur un autre hyperviseur ce qui permet de minimiser l'indisponibilité des services.

En plus des serveurs, 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. Le support aux utilisateurs est quant à lui réalisé avec l'outil de gestion GLPI.

La sécurisation des données des utilisateurs est assurée par un serveur de fichiers NetApp réalisant des « instantanés » des données utilisateurs (*snapshots*) organisés comme suit : 2 instantanés 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.

Il faut ajouter à cela deux autres serveurs de fichiers NetApp qui assurent la sauvegarde de fichiers jugés moins critiques.

Le système de stockage du laboratoire utilise CEPH. Il s'agit d'un système de stockage distribué robuste permettant de répartir de façon redondante les données sur différents serveurs. Pour prévenir l'éventualité de pannes (électriques, climatisations ...) et minimiser le risque de perte de données, le système est réparti sur 2 salles, une au sous-sol et une au 2^{ème} étage. Chaque donnée possède 3 copies sur 3 serveurs différents dont au moins une copie dans

chacune des deux salles. Il se compose de 7 serveurs de stockage pour un total de 1.12 Po (92 disques de 8 To et 24 disques de 16 To). De plus, 3 serveurs assurent l'administration, le contrôle et la gestion du stockage et 3 serveurs gèrent le système de fichiers. Le tout est interconnecté en fibre 10 Gbps.

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 2 x 100 Gbps pour les liens principaux et 2 x 10 Gbps pour les liens secondaires. Différents sous-réseaux permettent de sécuriser les activités les plus sensibles et d'augmenter la qualité de service.

CHIFFRES CLEFS

40 serveurs physiques, **6** serveurs de virtualisation (**256 cpu** et **812 GB** de mémoire)
800 To brut de données disponibles
300 To utilisés

Équipe :

Aurélien Bailly-Reyre, Jean-Marc Colley, Olivier Dadoun, Youssef Haddad, Trung Ho, François Legrand, Karine Marquois, Victor Mendoza, Eduardo Sepulveda, Diego Terront, Vincent Voisin, Patricia Warin-Charpentier

EXPERTISES

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 astro-particules et en cosmologie. Ces développements et réalisations sont menés dans le cadre de collaborations internationales.

En 2021, le service comprend 2 ingénieurs de recherche, 2 ingénieurs d'études, 4 assistants ingénieur dont 1 en CDD et 1 apprenti (photo ci-contre).

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 ser-



vice 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.

Le bureau d'études est équipé de logiciels de CAO (CATIA) et de calcul aux éléments finis performants



Pièce en cours d'impression dans la nouvelle imprimante 3D multi-matériaux. Elle a été mise en service au début de l'été 2021 après une phase de tests méticuleuse.

(ANSYS) et utilise les systèmes de gestions de données techniques (*Smarteam* et ATRIUM). L'atelier est équipé de machines-outils classiques et à commandes numériques qui sont programmées à l'aide d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (Alfacam). Le service dispose d'une salle de métrologie équipée entre autre d'une colonne de mesure et d'une machine de mesure tridimensionnelle, pour le contrôle des pièces. L'acquisition d'une deuxième imprimante 3D multi-matériaux (photo ci-dessus) utilisant la technique du fil fondu 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 réali-

ser 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 d'offre et en assurant le suivi jusqu'à la recette.

Le service fait profiter aux autres laboratoires du campus de ses compétences et savoir-faire. Par exemple, un IE du service collabore au projet BendiCam (caméra dédiée à l'analyse des fonds marins) avec les équipes de l'IMPMC et du laboratoire Boréa.

Par ailleurs, les membres du service sont impliqués dans des formations, dans des jurys de concours du CNRS, dans des groupes de travail (*Atrium*, *Smarteam*, Qualité, management de projet, ingénierie système, calculs, FAO, I3D) et plus largement dans des actions de présentation du service au grand public.

Équipe :

Kevin Biernacki, Yann Da Silva, Guillaume Daubard, Patrick Ghislain, Alexandre Lantheaume, Didier Laporte, Sébastien Lefèvre, Yann Orain, Julien Philippe, Philippe Repain, Ibrahima Sylla

EXPERTISES

Gestion de projet, ingénierie système et assurance produit.
 Etudes de faisabilité. Conception de mécanismes, de structures légères, de cryostats, de bancs de test et d'outillages d'assemblage, intégration d'instrument. Choix et intégration d'actionneurs et de capteurs (mécatronique).
 Calculs de structures et thermique, par éléments finis (linéaire et non-linéaire), de motorisation et d'engrenages, modélisation de mécanismes.
 Fabrication de prototypes grâce à l'impression 3D et la maîtrise de la FAO.
 Installation et maintenance sur sites.

CHIFFRES CLEFS

83 secondes : temps pour changer de filtre dans la caméra LSST grâce au système de changeur de filtres

8000 : nombres de détecteurs silicium à implanter pour le détecteur HGTD

Plateaux techniques

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 recherches et développements techniques à la frontière de l'état de l'art.

Il entretient ainsi des compétences en instrumentation et développe la technicité de ses équipes.

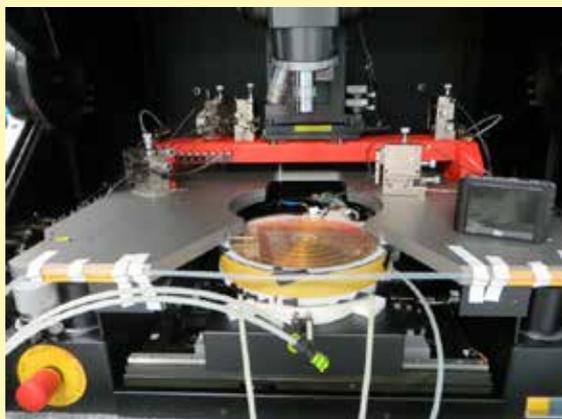
Évolution des capacités de caractérisation des détecteurs semiconducteurs

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 lectures (cas des CCD de LSST).

Ce plateau technique, situé en salle blanche, se compose

- d'un banc d'illumination et d'interfaçage avec les services (alimentation, système de lecture) en environnement cryogénique.
- d'une machine de test sous pointes semi automatique Cascade PA200 (photo ci-dessous), bientôt complétée par une machine plus performante, associée à des instruments de mesure performants : *source-meter* et analyseur de réseau Keysight B1505.



En 2020 le projet CLAP (Capteurs à LA Pointe) porté par le laboratoire a été sélectionné par la région Ile de France dans le cadre des appels à projet SESAME 2020 et s'est vu également soutenu par Sorbonne Université et par le CNRS. Ce projet permettra l'achat d'un système de test sous pointes de détecteurs semi-conducteurs, de micro-circuits et de circuits imprimés à très bas bruit, permettant des tests en température (-55 C / +250 C) sans problème de condensation et à des hautes tensions arrivant jusqu'à plusieurs kV. Cette machine semi automatique acceptera des *wafers* de diamètre jusqu'à 200 mm, elle sera équipée d'une micro chambre isolant ainsi (avec une atténuation supérieure à 30 dB) les éléments à caractériser des perturbations électromagnétiques. Les résolutions sur les mesures de courant et de capacité seront grandement améliorées par rapport aux dispositifs existants et nous permettront de mesurer dans la plage de centaines de pA et au niveau du pF.

Ce nouvel instrument s'intégrera dans le plateau technologique existant rendant celui-ci encore plus complet pour s'adapter aux besoins des expériences du laboratoire. Les performances de cet équipement seront d'une grande utilité pour les tests des capteurs à pixels du projet ITk qui doivent être caractérisés après irradiation et donc à basse température. Par ailleurs cet outil sera également précieux pour les développements de capteurs semi-conducteurs de future génération. Enfin, grâce à CLAP, le laboratoire s'ouvre aussi aux partenaires académiques et industriels d'Ile de France. En effet, la machine à test sous pointes fera partie d'une plateforme technique dont l'accès sera ouvert aux laboratoires partenaires sur ce projet dont l'APC, le GEEPS (Génie Électrique Électronique de Paris), le CEA/Irfu ainsi qu'aux entreprises désirant l'utiliser.

Intégration des détecteurs : machine de micro-câblage (wire-bonding) et assemblage par collage

Les installations pour l'intégration des détecteurs sont pour certaines installées aussi en salle blanche. Il s'agit notamment d'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 IDF 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

et d'un microscope numérique Keyence VHX-6000 permettant d'effectuer des contrôles visuels lors des opérations du bonding et des mesures en trois dimensions ayant une précision de quelques micromètres.

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 est développé dans le cadre de CALICE et 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. Le laboratoire s'est récemment doté d'une machine de métrologie Micro VU Inspec Vertex permettant une série de mesures automatisées de validation.

Métrologie mécanique

Plusieurs machines de métrologie mécanique sont associées à ce plateau technique afin de réaliser les contrôles qualité en amont, en cour 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 composant 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 Xeon-Phi et avec un processeur AMD EPYC.

GRIF/CLOUD

GRIF : Le projet 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 opérer une ressource unique de calcul et de stockage basée sur les technologies des grilles de calcul dans le cadre des collaborations « World LHC Computing Grid » (WLCG) et « European Grid Initiative » (EGI). Il est physiquement réparti sur plusieurs sites et géré par une équipe d'une dizaine de personnes appartenant aux laboratoires participants.

Les ressources à disposition au LPNHE sont de 131 nœuds de calcul permettant de traiter plus de 5 000 tâches simultanément et 3,2 pétaoctets de stockage utile sur disques accessibles à travers un système basé sur DPM (*Disk Pool Manager*). Le réseau consiste en un lien à 10 Gbit/s entre les membres de GRIF, vers le CCIN2P3 et les autres centres, à travers RENATER.

GRIF-LPNHE est un Tier 2, avec des ressources allouées, pour les expériences ATLAS, LHCb et CTA mais aussi pour des collaborations en dehors de notre discipline comme l'Institut des Systèmes Complexes (ISC-PIF). GRIF-LPNHE a contribué à 2,5 millions de jours de temps de calcul. Les ressources de stockage au LPNHE sont dédiées à 85% pour les expériences auprès du LHC (ATLAS, LHCb), le reste pour les collaborations H.E.S.S./CTA. Le taux de disponibilité du site grille 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.

Deux ingénieurs du service informatique assurent l'administration et l'exploitation des différentes ressources. Ils ont contribué au déploiement de l'intergiciel, 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

Chercheur :

Frédéric Derue

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reyre, Victor Mendoza

CHIFFRES CLEFS

2,5 millions
de jours de calcul

sites. L'opération des ressources des sites français est coordonnée par la direction de LCG-France et de France-Grilles-Cloud. Des réunions entre les différents sites ont lieu deux fois par an et des réunions de coordination par vidéo-conférence tous les mois.

CLOUD : La plateforme cloud est basée sur *Openstack* et consiste en 50 nœuds de calcul avec un espace de stockage de plusieurs téraoctets. Grâce aux financements du laboratoire et la fédération France-Grille Cloud, le site cloud se développe en acquérant du matériel performant et particulièrement adapté aux applications qui demandent beaucoup de ressources. En effet, les nœuds de calcul les plus puissants sont dotés de 64 cœurs et de 384 Go de mémoire vive. Le cloud permet aux utilisateurs de déployer des serveurs de calcul avec le système d'exploitation de leur choix, une adresse IP publique, un nombre de cœurs de calcul et une quantité de mémoire vive variant suivant les utilisations. Les utilisateurs peuvent ainsi créer et administrer des serveurs (virtuels) pour réaliser des tests et des déploiements de différents services ou logiciels, mais aussi d'accéder facilement à une grande puissance de calcul nécessaire par exemple pour des simulations ou des analyses de données.



Salle serveur du LPNHE.

Environnement des plateaux techniques

Salles blanches

Les salles propres du LPNHE sont en fonctionnement depuis 2010. Elles comportent quatre salles dédiées aux détecteurs 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 (CTA) 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, de l'hygrométrie de la pression de chaque salle a été mise en place. Les salles bénéficient depuis le local technique d'un approvisionnement 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 un pont roulant 2 t. 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 65 m² chacune, en sous-sol, hébergent l'essentiel de l'infrastructure et des matériels informatiques de calcul 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).



Le changeur de filtres de LSST dans la salle ISO8 pour les objets volumineux du LPNHE

Supports



Essentiels au fonctionnement du laboratoire, les services de l'administration comptent une dizaine de personnes. Les années 2020 et 2021 ont été fortement impactées par la pandémie de la COVID-19. Avec le confinement, le travail à distance a été imposé à tous. Cela nous a obligé à nous adapter et à repenser nos modes d'organisation et de travail, en incluant davantage d'échanges virtuels et numériques. En 2018, une personne du service avait demandé à télétravailler ; en 2021, la quasi-totalité du personnel de l'administration a demandé à bénéficier du télétravail.

Les services administratifs sont répartis en trois pôles : Ressources financière, Ressources humaines, et Communication (voir page 111).

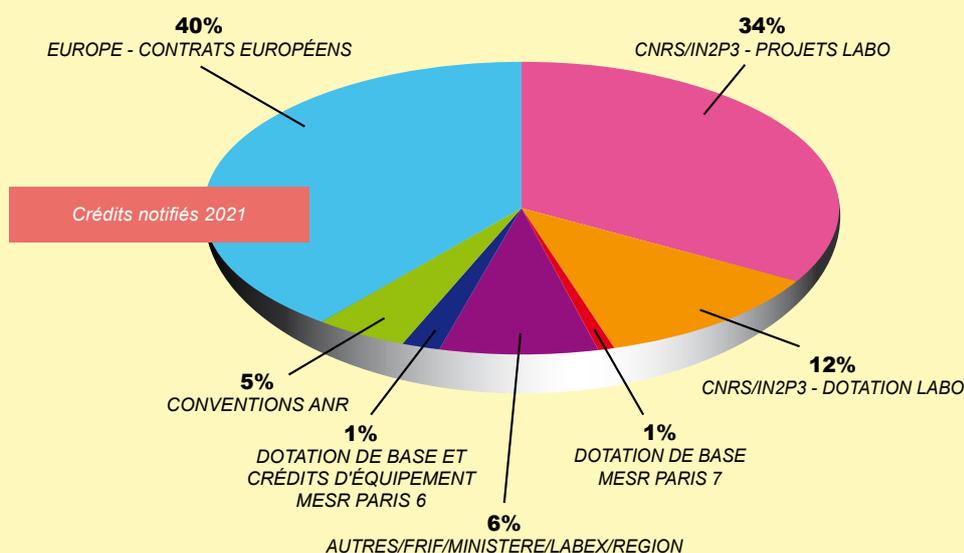
Ressources financières

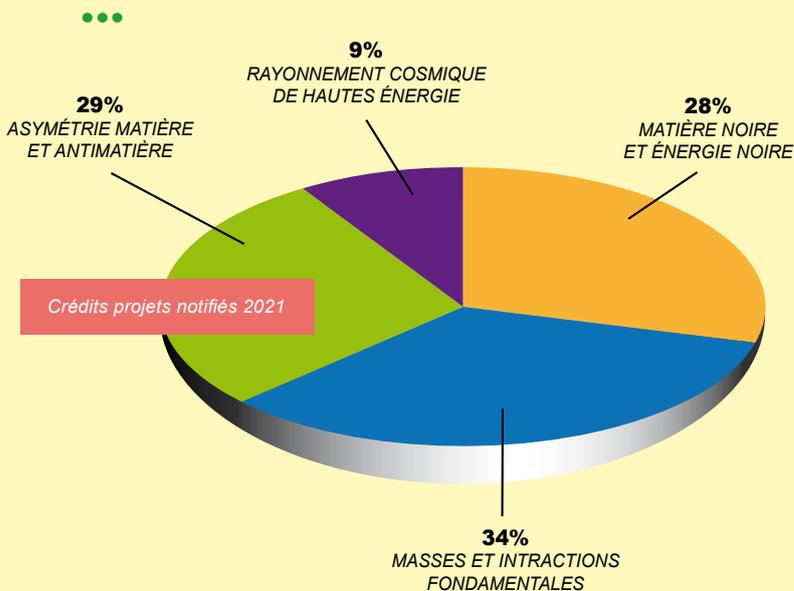
Le LPNHE dispose de ressources financières qui lui sont attribuées par ses trois tutelles, CNRS/IN2P3, les universités Sorbonne Université et Université de Paris, ainsi que de ressources propres représentant un budget global hors salaires d'environ 2 millions d'euros par an. Ces ressources sont gérées par le **pôle de gestion financière**, composée de 4 gestionnaires. Le pôle gère l'en-

semble 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 2021.

La notification des contrats est ramenée aux dépenses prévisionnelles de l'année.





En 2021, la dotation annuelle (soutien de base non affecté, SBNA) CNRS a représenté 12% du budget et celle des 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 missions, des colloques, écoles et conférences.

Le reste du budget, destiné aux projets du laboratoire, provenait, en 2020, du CNRS/IN2P3 (34%), de contrats ANR, Européens, Région et Labex (51%).

Affectations des ressources dans les projets

Thématiquement, le budget « Projets » s'est réparti en 2021 selon (graphique ci-dessus) :

- Masses et interactions fondamentales (34%)
- Asymétrie matière et antimatière (29%)
- Rayonnement cosmique de haute énergie (9%)
- Matière noire et énergie noire (28%)

Gestion des ressources financières

La gestion financière du LPNHE est assurée avec l'aide une application relativement récente appelée GESLAB. Il s'agit de la base commune de gestion des unités de recherche du CNRS.

SIFAC, l'application des deux universités tutelles, n'est plus utilisée depuis la mise en place, en 2010, de la Délégation Globale de Gestion financière par le CNRS.

Evolutions

Le budget projet CNRS/IN2P3 est apparu stable entre 2020 et 2021 par rapport aux années précédentes.

Depuis l'année 2017, on note un accroissement considérable des ressources propres avec pour conséquence une augmentation sensible de la charge de travail des gestionnaires car le volume des dépenses devient remarquable dans le domaine des Ressources Humaines, des missions mais encore plus pour l'achat d'équipements.

Ces nouvelles ressources proviennent des financements Labex, IPI ou de contrats ANR, de la Région, de l'Europe, avec notamment la gestion de deux ERC depuis l'automne 2017, un ERC Consolidator Grant et en 2018, un ERC Advanced Grant 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.

Après la GBCP (gestion budgétaire et comptable publique) et le SCTD (Service Central du Traitement de la Dépense), il a fallu s'adapter à la prise en compte de la vague 2 de Chorus pro pour la facturation, à l'évolution du traitement du service fait, à la nouvelle version de l'outil PUMA pour le passage de marché. Cela a entraîné pour les gestionnaires de grandes évolutions dans les méthodes de travail et dans l'acquisition de nouvelles compétences techniques et professionnelles.

A l'automne 2021, la dématérialisation du processus « Missions » a commencé avec la mise en place d'ETAMINE impactant tous les membres de l'unité.

Equipe pôle gestion :

Hager Baalouchi, Bernard Caraco, Carla Carvalhais, Véronique Criart, Abigaïl Joron, Evelyne Mephane, Yves-Patrick Tchuenbou

Ressources humaines

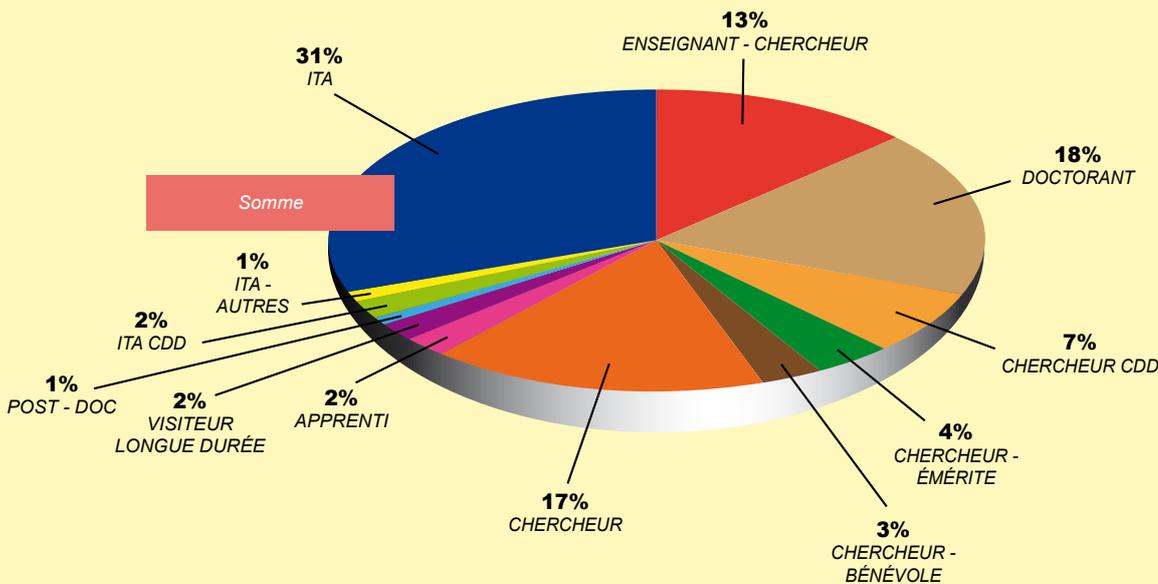
Le pôle RH assure la gestion administrative des personnels. Cette gestion consiste à réaliser le suivi d'environ 190 agents permanents et non permanents, auxquels il faut ajouter une cinquantaine de stagiaires par an qui séjournent au laboratoire pour des périodes allant d'une semaine à 6 mois. Le pôle est en charge des procédures de recrutement (concours, mobilité interne, auxiliariat), des procédures d'accueil des visiteurs étrangers, de stagiaires ou de doctorants (constitution des dossiers, aide dans les démarches auprès de nos tutelles, etc.). Il aide l'ensemble des personnels dans l'établissement des dossiers de carrières, de

concours et de formation. Il gère les congés, absences des agents et diffuse toutes les informations utiles aux agents de l'unité.

En 2021, le laboratoire comptait 45 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents, 10 chercheurs contractuels, 6 émérites et bénévoles, 26 doctorants et post-doctorants, 51 ingénieurs techniciens et administratifs (ITA) permanents et non permanents, 3 IT en alternance, et 34 stagiaires, soit un total de 188 personnes.

Pendant la période de la pandémie 2020-2021, le laboratoire a réussi à prendre en charge 59 stagiaires, malgré un contexte très compliqué.





Ces dernières années, le nombre de personnels permanents est en diminution, principalement dû à des départs en retraite non remplacés.

Le graphique, page précédente, montre la pyramide des âges des personnels permanents. On peut anticiper un nombre certain de départs à la retraite de personnel ITA dans les prochaines années.

Dans un processus de modernisation de la prise en charge des ressources humaines au CNRS avec l'objectif de la dématérialisation complète du dossier administratif de l'agent, de nombreux outils numériques, tels que AGATE, ARIANE, CANOPE, SIRHUS ont notablement modifié la gestion des RH en laboratoire.

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 obligatoirement 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 fonctions techniques et sur EURAXESS Jobs pour les postes scientifiques.

Equipe pôle ressources humaines :

Carla Carvahais, Véronique Criart, Martine Guy, Abigaïl Joron, Evelyne Mephane, Yves-Patrick Tchuenbou

Pôle logistique et maintenance (services généraux)

Les services généraux sont composés d'une seule personne depuis juillet 2021 suite à un départ (un assistant ingénieur sous la responsabilité de la direction technique). Les tâches se répartissent en activités courantes et en actions spécifiques d'aménagement ou de maintenance.

L'ensemble des procédures et pratiques a été revu afin de répartir les activités sur une personne 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, vidéo-conférence). Le service a débuté l'étude du remplacement du matériel de visio-conférence pour s'adapter aux évolutions des logiciels utilisés ;
- 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 dont l'éclairage a été entièrement refait par le service (photo ci-dessous), 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, un travail de réaménagement des salles de test et de stockage a été mené afin de répondre aux besoins des groupes de recherche.

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.

Equipe pôle ressources humaines :

Jean-Francois Goulian (jusqu'en septembre 2021),
 Michaël Roynel



Nouvel éclairage de l'amphithéâtre Charpak

CHIFFRES CLEFS

170 réservations de salle par an (hors demande LPNHE)

~55 m² de surface au sol libérés pour compléter l'aménagement de salles expérimentales

Création d'un groupe d'aide aux réponses aux appels à projet dit « cellule ANR » et premier bilan

Répondre à des appels à projets pour obtenir des financements de tous ordres (financement de thèse, de post-doctorats, d'aide à l'achat de matériel, etc ...) fait maintenant partie du quotidien des chercheur.euse.s et s'est imposé avec la multiplication des guichets. Par exemple, parmi les 8 financements de thèse obtenus au LPNHE pour la rentrée 2021, seuls deux financements ont la même origine (2 financements de Sorbonne Université via l'école doctorale STEP'UP et deux financements de l'IN2P3).

En juin 2020, Marco Zito propose de réunir quelques personnes pour réfléchir à optimiser l'effort du laboratoire afin de maximiser les chances des chercheur.euse.s en visant d'abord l'ANR dont le financement doit monter en puissance à partir de 2021. Cette proposition avait été faite lors de la biennale 2019 du laboratoire.

Le constat est simple. Il y a toujours un pourcentage d'échec lors d'un appel à projets mais cela n'est pas forcément lié à la qualité du projet mais à différentes contingences extérieures comme le nombre de participants, l'équilibre thématique, l'équilibre entre structures, etc..... Il est donc indispensable de dépersonnaliser au maximum les réponses aux appels à projets pour que l'échec ne soit pas vécu comme un échec personnel mais collectif invitant simplement à représenter le projet lors de l'appel suivant.

Aussi plusieurs initiatives ont été prises par la cellule ANR :

- Au niveau de la direction,
 - solliciter les personnes susceptibles de candidater en fonction des appels,
 - publiciser les appels et proposer des bilans, notamment avec des présentations aux réunions du vendredi, qui réunissent l'ensemble du personnel ou en réunions de coordination qui réunissent les représentants des projets,
 - apporter des réponses à toutes les questions techniques et notamment faire l'interface avec le service de valorisation et partenariat de la délégation régionale ;
- Au niveau des membres de la cellule, proposer une relecture et des commentaires des projets même

en étant sollicité par plusieurs personnes dans des délais très courts.

Dans le même temps, l'IN2P3 a mis en place un groupe de correspondants ANR par laboratoire qui permet des échanges d'information sur le fonctionnement de l'ANR apportant un éclairage très intéressant. Il faut également noter que des aides au montage de projet sont très répandues à tous les niveaux (universitaires pour les 2 tutelles, institut ou CNRS) mais ne sont pas forcément très suivies peut-être à cause de ce foisonnement.

Il est possible de tirer un bilan, forcément provisoire, de ce fonctionnement car la cellule n'a que 18 mois d'existence. Le groupe initial est composé de peu de personnes ce qui a permis un démarrage rapide mais avec la multiplication des relectures, il faudrait sans doute l'étoffer. Pour cela, pour l'appel à projet 2022 de l'ANR, une demande de contribution ponctuelle a été faite aux lauréats de l'année 2021.

Pour l'ANR, sur l'appel à projets génériques 2021, 8 réponses ont été proposées par des membres du LPNHE avec 3 projets dont le porteur n'était pas au laboratoire, et 1 réponse à un appel à projet spécifique a été faite (appel à projets bilatéral franco-allemand en intelligence artificielle). Parmi les 8 réponses évoquées précédemment, il y avait 2 instruments jeunes chercheurs, 5 PRC (projets de recherche collaborative entre des entités publiques dans un contexte national) et un PRCI (projets de recherche collaborative dans un contexte international) avec l'Allemagne. Seuls 2 projets PRC ont été éliminés après la première phase et 5 financements ont été obtenus à l'issue des 2 phases de sélection sur l'appel générique (deux jeunes chercheurs, deux PRC et le PRCI). Le LPNHE est porteur pour 4 financements obtenus. Le financement sur appel spécifique a lui aussi été obtenu. Tous les financements obtenus ont pour finalité d'embaucher du personnel en CDD (thèse ou post-doctorat) et relèvent tous de l'axe scientifique CE31 - Physique subatomique et astrophysique.

On peut comparer ces résultats aux résultats de l'IN2P3 qui a obtenu un taux de succès en CE31, où la très grande majorité des projets de l'IN2P3 est évaluée, de 47% après les 2 étapes de sélection pour l'instrument jeune chercheur, et de 23% pour l'instrument PCR en 2021. Comme cela a été annoncé, l'instrument jeune chercheur a été très revalorisé

par rapport aux années passées. Ce sont de bons résultats même s'il n'est pas possible de conclure sur une seule année. On note également et c'est heureux, une sélection moindre entre la première et la deuxième étape. Le dossier demandé à la deuxième étape est très conséquent contre 3 pages de projet à la première étape.

Pour l'appel à projet générique 2022, le laboratoire s'est emparé du nouvel instrument proposé PRME (Projet de Recherche Mono-Equipe) avec deux réponses à cet appel, une réponse pour l'appel jeune chercheur dont les critères d'éligibilité ont été resserrés, et trois réponses PRC dont une seule pour laquelle le LPNHE est porteur. L'ensemble des réponses a été soumis au CE31. Les résultats de la première étape de sélection ne sont pas encore connus. Comme précédemment, il s'agit de

demandes de financement de CDD. Au niveau de l'IN2P3, la même baisse du nombre de demandes est à noter.

Enfin, même si la cellule s'appelle cellule ANR, des réponses sont apportées à toutes les personnes qui la sollicitent quel que soit l'appel à projet. Le projet lauréat d'un contrat post-doctoral de l'appel 2021 de l'Initiative Physique des Infinis a été relu et commenté par un membre de la cellule.

Chercheur.euse.s :

Depuis la création, Frédéric Derue, Vladimir Gligorov, Mélissa Ridel, Marco Zito

Avant mars 2021, Giovanni Marchiori

Communication et documentation

Le pôle « Communication et Documentation » du LPNHE est composé de trois personnes permanentes : une responsable de communication, une technicienne et une secrétaire rattachée à l'Association ARISF-Rencontres de Moriond, hébergée au LPNHE.

L'ensemble du personnel du laboratoire renforce ponctuellement le pôle dans ses activités, au sein de comités d'organisation ou éditorial, groupes de travail ou comme chargés de mission. Un plan de communication pluriannuel élaboré avec le directeur du laboratoire assure la mise en œuvre de ses missions : d'une part la diffusion des activités et des résultats scientifiques et techniques du LPNHE, d'autre part la promotion auprès des divers publics de la recherche scientifique en physique des particules, astroparticules et cosmologie.

Accompagner l'animation scientifique

Le pôle organise ou participe à toutes les manifesta-



Etudiants des journées de Rencontres Jeunes Chercheurs réunis à La Rochelle du 17 au 23 octobre 2021.

tions scientifiques nationales ou internationales du laboratoire, dont voici des exemples les plus significatifs.

Organisées avec la SFP - Société Française de Physique, les JRJC - Journées de Rencontres Jeunes Chercheurs - sont des rencontres récurrentes qui s'adressent à tous les étudiants en thèse, pour développer leurs sentiments d'appartenance aux communautés de chercheurs, dans tous les domaines de

●●●

l'IN2P3, des noyaux et de leurs constituants jusqu'aux particules considérées comme élémentaires. Du 17 au 23 octobre 2021, les JRJC ont rassemblé plus de 80 étudiants à La Rochelle (17 - Charente Maritime). En parallèle aux présentations scientifiques, une conférence grand public et une rencontre avec les journalistes locaux donnent traditionnellement l'occasion de marquer et animer l'actualité locale.

Chaque année, le pôle contribue aux « Rencontres de Blois » en organisant des échanges entre les étudiants (INSA et IUT de Blois) et les scientifiques participant à la conférence. La 32^e édition a eu lieu du 17 au 22 octobre 2021, en partenariat avec la ville de Blois, pour réunir 116 physiciens de renommée internationale.



Le pôle assure l'organisation des « Rencontres de Moriond », qui rassemblent chaque année à La Thuile en Italie environ 400 physiciens du monde entier. En raison de la pandémie de COVID-19, les 55^e rencontres de Moriond initialement prévues en 2020, ont été totalement reportées en 2021 où elles se sont entièrement déroulées en ligne, sous forme virtuelle sur les 3 thèmes suivants : **Gravitation du 9 au 11 mars 2021** - Cette édition *online*, conçue autour du logiciel *Gather*, a mélangé ainsi visio-conférence et sessions de posters, avec déplacement dans un univers virtuel en 2D. Ainsi, chaque jour s'articulait autour de deux sessions de 90 minutes, chacune avec un exposé introductif de 30 minutes suivi de 60 minutes ouvertes à la visite et aux discussions en direct des 124 physiciens composés principalement de jeunes thésards et post-doctorants.

Electroweak, Interactions & Unified Theories du 20 au 27 mars - Cette édition de Moriond@home a rassemblé 216

participants selon un format se déroulant en deux temps : Jour J publication du matériel ; jour J+1 discussion en direct animée par des modérateurs et concentrée dans une session *live* de 3h.

QCD and High Energy Interactions du 27 mars au 3 avril

- Les sessions virtuelles ont eu lieu par zoom pour 120 inscrits, selon le schéma classique de Moriond alternant présentations et discussion dans l'espace convivial de *Gather*.

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 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.

Les liens tissés entre le LPNHE et le milieu éducatif se manifestent également par l'organisation régulière de Master Classes, 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.

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 :

- avec un comité éditorial, la rédaction et l'iconographie du rapport d'activité (bisannuel), document institutionnel diffusé à l'ensemble de la communauté scientifique et administrative ;
- avec un comité, l'organisation de la biennale, quatre jours de réflexion autour d'ateliers et de présentations pour étudier le bilan & les perspectives des activités scientifiques et techniques du LPNHE ; initialement prévue en 2021, elle est reportée en 2022 suite à la pandémie de COVID-19 ;
- l'organisation logistique des séminaires hebdomadaires, avec des chargés de mission ;
- la mise à jour *on-line* des actualités du laboratoire sur le site web, les supports multimédia, avec un comité éditorial chargé du contenu et de la mise en ligne, ainsi que l'animation des réseaux sociaux (*Facebook & Twitter*) ;
- des listes de diffusion et la page web « vie du labo » dont le contenu est relayé sur des écrans plats dispo-

sés dans les deux cafétérias du laboratoire, assure la communication interne du LPNHE.

Enfin, à propos de la documentation au LPNHE, le personnel 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*. Cette collection des monographies s'est enrichie d'une cinquantaine d'ouvrages, grâce à des dons organisés par Isabelle Cossin. Ces livres ont pour la plupart été intégrés dans la section "vulgarisation", mais il y a aussi des ouvrages de référence, notamment en relativité, que nous n'avions pas.

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

Conjointement organisée avec la Bibliothèque Nationale de France et la Société Française de Physique, le pôle participe aux rencontres «Physique et Interrogations Fondamentales». Ce rendez-vous récurrent est l'occasion pour un public averti d'environ 350 personnes, de dialoguer avec des spécialistes de champs disciplinaires différents, intervenant sur un sujet commun. Le thème choisi pour la dix-septième rencontre, présidée par Roland Lehoucq et qui a eu lieu le 27 novembre 2021, était « Fictions scientifiques : et si la Terre tournait autour du Soleil ? ». Ce fut l'occasion de questionner le rôle des différentes formes de fictions dans l'histoire des théories physiques et, aujourd'hui, dans les champs scientifiques en général.

Equipe :

Isabelle Cossin, Frédéric Derue, Jacques Dumarchez, Laurent Le Guillou, Laurence Marquet, Mélissa Ridet, Vera de Sá-Varanda

Comité web :

François Legrand, Mélissa Ridet, Vera de Sá-Varanda, Sophie Trincaz-Duvoid

Prévention des risques professionnels Radioprotection - Rayonnements optiques artificiels

Un des enjeux majeurs dans le monde du travail actuel réside dans la prévention des risques professionnels et l'optimisation des conditions de travail. La crise actuelle de la COVID-19 en est un exemple marquant. En s'appuyant sur les directives du CNRS et de l'établissement hébergeur (Sorbonne Université) le directeur du LPNHE est assisté dans cette mission par deux Assistants de Prévention (AP) placés sous sa responsabilité directe. Un ingénieur d'études et une assistante-

ingénieure assurent cette fonction, depuis 2005 pour le premier, depuis 2020 pour la deuxième. Les AP entretiennent 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 du travail. Concernant le suivi des risques particuliers que sont les risques aux rayonnements ionisants et ceux liés aux rayonnements optiques artificiels, deux personnes « référentes » complètent le dispositif de prévention : un Conseiller en Radioprotection (CRP) et un Référent Sécurité Laser (RSL).



Le Comité Local d'Hygiène, Sécurité, et Conditions de Travail (CLHSCT) du LPNHE, constitué notamment par les responsables des services de prévention de chacune de nos tutelles, les médecins du travail et la direction du laboratoire, 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 tenues le 2 décembre 2020 et le 6 décembre 2021.

Ces deux années 2020 et 2021 ont été marquées par la pandémie de la COVID-19. La vie et l'activité au LPNHE en ont été fortement impactées, notamment par les confinements successifs décrétés par le gouvernement. Le télétravail a été largement déployé parmi l'ensemble du personnel pour maintenir l'activité scientifique. Trois plans de continuité d'activité (PCA) ont été instaurés suite aux confinements et des mesures de prévention ont été mises en place pour faire face à l'épidémie : restriction de présence dans les locaux et lors de réunions (jauges maximales), distribution de masques (photo ci-



Distributeurs de gel hydroalcoolique dans nos locaux.



Masques lavables Catégorie 1 - labellisés LPNHE

dessous) et de gel hydroalcoolique (photo ci-dessus), consignes de respect des gestes barrières.

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 des produits présentant un risque (emploi d'appareillages laser, de liquides cryogéniques, de gaz comprimés, ...). Une commission de sécurité dédiée à chaque expérience présentant des risques 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 1^{er} secours, le laboratoire s'est équipé de 3 défibrillateurs cardiaques automatiques et de 3 armoires de 1^{er} secours, desservant les différents secteurs du LPNHE. 9 agents ont reçu la formation de secouristes.

Depuis 2011, le LPNHE s'est pourvu de dispositifs de protection pour travailleurs isolés : 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 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 » organisées 2 fois par an par le CNRS et Sorbonne Université. En interne, un accueil des nouveaux entrants au laboratoire a été institué annuellement, incluant un volet d'information et de sensibilisation « Santé et Sécurité ». Des sessions supplémentaires sont organisées en fonction des arrivées saisonnières de personnels temporaires.

Concernant les questions de sécurité liées spécifiquement à l'exposition aux rayonnements ionisants, un enseignant-chercheur assure les missions de Conseiller en Radioprotection (CRP). En charge depuis 2016, il s'assure du respect de la réglementation en vigueur, en tenant compte de ses évolutions. Il réalise les différents contrôles périodiques réglementaires sur les sources et les installations. Il supervise toutes les actions liées à l'utilisation de sources radioactives au laboratoire en lien avec les personnes concernées : stockage sécurisé, suivi des mouvements des sources pour les besoins des expériences, suivi dosimétrique des agents utilisant les sources. Le suivi dosimétrique, assuré en relation avec le service de prévention des risques professionnels de Sorbonne Université, concerne également les personnels se rendant en zones sur-

veillées lors de leurs missions auprès des accélérateurs de particules, au CERN ou ailleurs.

Concernant les questions de sécurité liées aux rayonnements optiques artificiels, qui incluent le risque laser, un ingénieur de recherche, nommé en 2019, assure les missions de Référent Sécurité Laser (RSL). Une installation autour d'un télescope optique, utilisée sur un banc d'essai pour l'expérience StarDice, a notamment conduit à la mise en sécurité d'une salle où est exploité un appareil laser à impulsion accordable de classe 4.

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 janvier 2021.

Pour conclure, l'adhésion de chacun à la politique de prévention est essentielle. Ainsi les acteurs de la prévention du LPNHE comptent sur l'implication de l'ensemble du personnel afin de réussir dans une démarche de sécurité et de conditions de travail optimales.

Personnels Hygiène et Sécurité - Laser - Radioprotection :

AP du LPNHE : Carla Carvalhais, Jean-Marc Parraud

CRP : Julien Bolmont

RSL : Francesco Crescioli

CHIFFRES CLEFS

1200 masques en tissu lavables de catégorie 1 distribués au personnel du LPNHE, pour répondre à une protection sanitaire dans la crise de Covid-19.

3 plans de continuité d'activité (PCA) ont été appliqués pour la continuité de service durant toute la période de crise sanitaire.

9 agents du laboratoire sont secouristes.

Feuille de route sur l'IA (Intelligence Artificielle)

Aujourd'hui l'IA propose des algorithmes réputés capables de découvrir des relations et des motifs dans des données complexes même quand les théories scientifiques ne nous donnent pas de forts a priori pour structurer l'analyse. De tels outils offrent des opportunités et des défis aux équipes du LPNHE pour mener à bien leurs objectifs scientifiques et techniques. Il convient donc de considérer le possible impact de telles innovations sur les questions scientifiques travaillées au LPNHE et d'identifier le type de problèmes scientifiques et techniques qui peuvent être mieux résolus avec ces nouveaux outils.

Au-delà des importants progrès méthodologiques apparus dans les dix dernières années (réseaux de convolution, réseaux antagonistes génératifs (GAN), *graph-nets*...), il faut souligner que l'accélération rapide des développements en IA dans les années 2010 est fortement liée au développement des architectures de calcul parallèles, notamment les GPU mais aussi à la diffusion de bibliothèques en libre accès fournies par les chercheurs en IA et les ténors de l'internet (*Tensor flow*, *pytorch*, ...). Ces architectures sont très bien adaptées pour effectuer rapidement les calculs matriciels utilisés dans les réseaux de neurones et sont à la base de l'utilisation massive des réseaux de neurones profonds (*Deep Neural Networks*, DNN). Réciproquement, l'importance des applications utilisant des DNN gourmands en calcul a poussé les constructeurs à améliorer les GPUs en priorité pour répondre aux besoins des algorithmes d'IA. Ce lien entre le développement des algorithmes d'IA et des architectures de calcul suggère que la définition d'une stratégie IA pour le LPNHE impose de réfléchir à une stratégie pour le service informatique et pour l'infrastructure de calcul au LPNHE et à l'IN2P3.

La physique bénéficie déjà de ces progrès technologiques mais constitue aussi un terrain de jeu d'intérêt pour ces technologies du fait des énormes volumes de données expérimentales disponibles dans nos expériences, de notre maîtrise des théories statistiques sous-jacentes aux algorithmes proposés, de notre besoin vital de contrôler les incertitudes de mesures

et de notre habitude de lier données et modèles explicatifs.

Le groupe de travail a mené plusieurs réunions avec les différentes équipes du laboratoire pour établir leurs intérêts, leurs besoins et leurs ambitions dans ce domaine. Il en ressort un clair intérêt des équipes de LPNHE pour mieux maîtriser ces sujets mais également pour que des compétences internes se développent pour nous permettre d'être d'ores et déjà présents sur ces sujets au niveau international. Néanmoins, des mesures structurelles nous semblent nécessaires pour permettre d'aller plus loin et de transformer les essais déjà réussis :

1. Réfléchir à la mise en place de formations adaptées aux besoins, intérêts et compétences existantes des différents membres du laboratoire. Il faudra notamment veiller à ce que ces compétences en IA soient développées dans les différentes équipes aussi bien au niveau des ITA que des chercheurs ou enseignants-chercheurs. Le développement d'une documentation commune et participative semble être un outil utile à considérer.
2. Développer des partenariats aussi bien locaux qu'internationaux dans le domaine de la formation en IA mais aussi du développement et de la mise en œuvre de techniques IA pour nos projets spécifiques.
3. Renforcer nos liens avec le SCAI, le DIIP, le LIP6, et éventuellement la chaire IA du collège de France autour de projets communs, y compris liés à la mise en place de programmes d'enseignement interdisciplinaires au niveau des masters et de la formation doctorale. Il conviendra d'identifier deux ou trois projets spécifiques pour focaliser les discussions ; l'initiative SMARTHEP qui vient d'être lancée entre le LIP6 et le LPNHE, avec le partenariat d'IBM France et des nombreux partenaires internationaux, peut être un bon point de départ.
4. Renforcer les liens entre nos équipes de recherche et d'informatique et faire un inventaire de nos moyens de calcul locaux et de leur utilisation afin de rationaliser le temps passé par l'équipe informatique dans l'entretien des systèmes.
5. Faire de la veille scientifique et technique sur le sujet. Il semblerait utile de monter un journal club auquel les étudiants de tous les groupes seraient très fortement incités à participer mais qui pourrait aussi accueillir chercheurs et ITA intéressés par le

sujet. L'animation tournante de ce type de structure comme c'est la norme pour la réunion du vendredi et les séminaires aiderait à maintenir cet effort dans la durée.

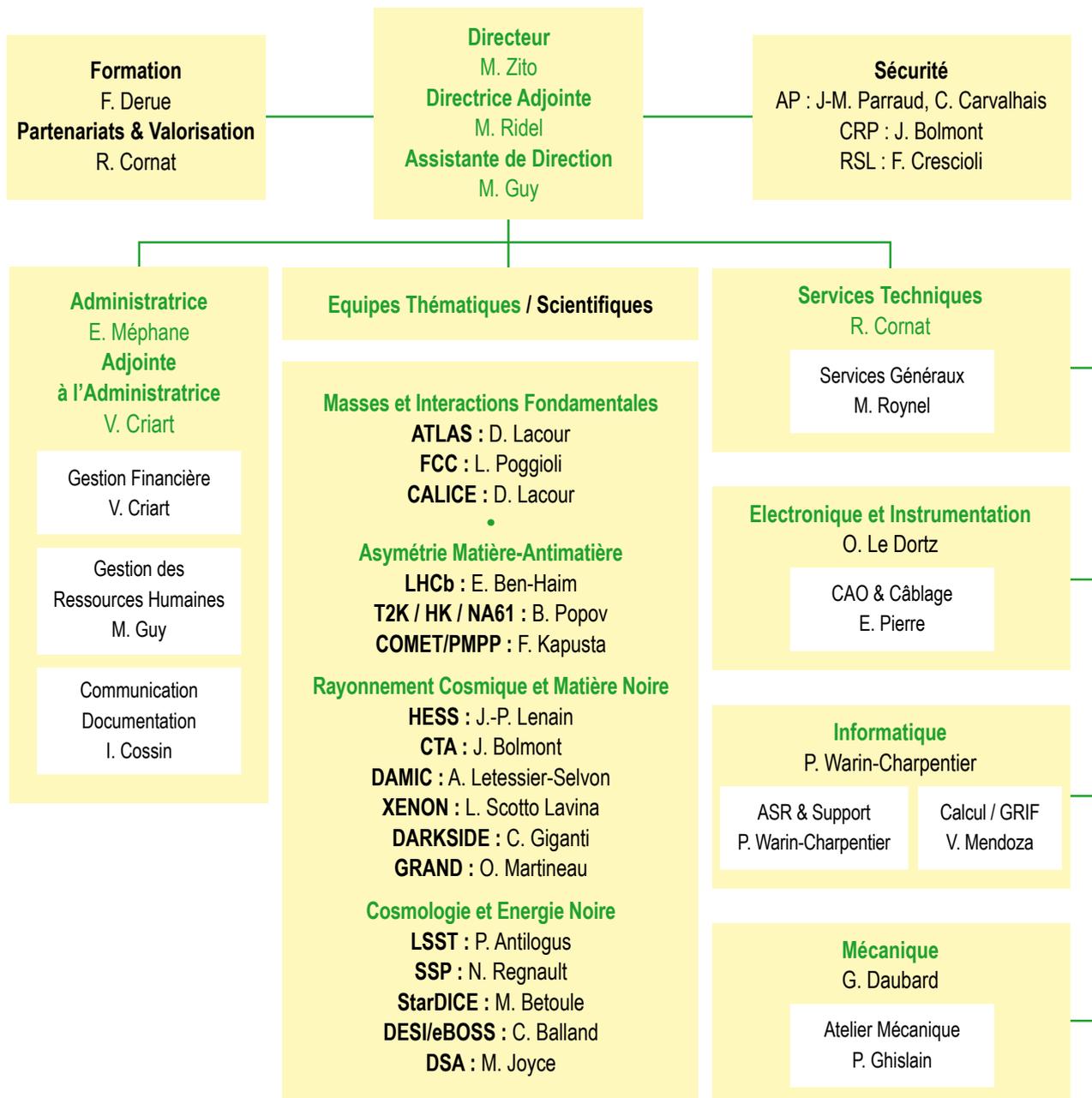
- Mettre en place des containers permettant d'installer rapidement les outils IA dont les équipes ont besoin pour mettre en oeuvre des méthodes IA. Partager des scripts et des exemples réussis de configuration customisée de certaines ressources de calcul ou de mises en oeuvre de certains algorithmes (accès GPU sur serveur distant, mise en oeuvre d'auto-en-

codeurs ou de GAN, mise en place d'algorithmes sur des ordinateurs quantiques afin de remplacer la descente de gradients par une résolution basée sur des systèmes de spins plus rapide...).

Membres du groupe de travail :

Rémi Cornat, Frédéric Derue, Vladimir Gligorov, Laurent le Guillou, Bertrand Laforge, Mélissa Ridel, Eduardo Sepulveda, Marco Zito

ORGANIGRAMME



Voir l'index des acronymes page 136.

Personnel du laboratoire au 31/12/2021

Chercheur.euse.s CNRS

Directeur.trice.s de recherche

ANTILOGUS Pierre
ASTIER Pierre
CALDERINI Giovanni
DERUE Frederic
KRASNY Mieczyslaw
LACOUR Didier
LETESSIER SELVON Antoine
POGGIOLI Luc
POPOV Boris
REGNAULT Nicolas
ROOS Lydia
ZITO Marco (CEA/Irfu)

Chargé.e.s de recherche

ANDRIEU Bernard
BETOULE Marc
BONGARD Sébastien
CAMACHO TORO Reina
DEL BUONO Luigi
GIGANTI Claudio
GLIGOROV Vladimir
KAPUSTA Frederic
LENAIN Jean-Philippe
MALAESCU Bogdan
POLCI Francesco
SCOTTO LAVINA Luca
ZARROUK Pauline

Chercheurs émérites et bénévoles

BARRELET Etienne
BENAYOUN Maurice
BLONDEL Alain
DUMARCHEZ Jacques
LEVY Jean-Michel
LOISEAU Benoit

Enseignant.e.s-chercheur.euse.s Sorbonne Université

Professeur.e.s

BALLAND Christophe
BEN-HAIM Eli
HARDIN Delphine
JOYCE Michael
LAFORGE Bertrand
VINCENT Pascal
TRINCAZ-DUVOID Sophie

Maître de conférences

BAUMONT Sylvain
BOLMONT Julien
CHARLES Matthew
DA SILVA Wilfrid
GUIGUE Mathieu
LE GUILLOU Laurent
MARTINEAU Olivier
RIDEL MéliSSa

Enseignants-chercheurs émérites et bénévoles

BILLOIR Pierre
CHAUVEAU Jacques
KRIVINE Hubert

Enseignant.e.s-chercheur.euse.s Université de Paris

Professeur

OCARIZ José

Maître de conférences

BEAU Tristan
NIKOLIC Irena
SCHAHMANECHE Kyan

Enseignant.e.s-chercheur.euse.s émérites et bénévoles

VANNUCCI François
PONS Yvette

Maitres de conference accueillis sur convention

NEVEU Jérémy
MARTINI Marco

Doctorant.e.s (2018-2021)

AHMED MAOULUD Sid El Moctar (2019-2022)
AMALRIC Renaud (2021-2024)
AUGARDE Guy (2019-2022)
CALEFICE Lukas (2019-2022)
CORDEIRO-OUDOT-CHOI Artur (2021-2024)
EMERY Gabriel (2017-2020)
FULGHESU Tommaso (2021-2024)
GINABAT Louis (2020-2023)
GRAMMATICO Thomas (2018-2021)
GROLLERON Guillaume (2021-2024)
HE Yajun (2019-2022)
KHALIL Latife (2017-2020)
LACROIX Leander (2021-2024)
LEOPOLD Alexander (2017-2020)
LEVY Christelle (2018-2021)
MALEUBRE Sara (2019-2022)
MATALON Ariel (2018-2021)
MELLETT Lucie (2020-2023)
NGUYEN Quoc Viet (2019-2022)
PAPADOPOULOS Georgios (2019-2022)
PASCUAL DOMINGUEZ Luis (2017-2020)
POHAN Azrul (2019-2022)
RASKINA Valentina (2020-2023)
REISS Florian (2017-2020)
RODE Julie (2019-2022)
SCARABOTTO Alessandro (2020-2023)
SOVERIN Thierry (2021-2024)
STERMER Julianna (2018-2021)
TAIBAH Reem (2018-2021)
TAN Ting (2020-2023)
TOU Da Yu (2017-2020)
TRAINA Michelangelo (2019-2022)
TRUSOV Svyatoslav (2021-2024)
VAN DEN ABEELE Enya (2021-2024)
WANG Yufeng (2017-2020)
YEVAROUSKAYA Uladzislava (2020-2023)
ZAHREDDINE Jad (2017-2020)
ZOPOUNIDIS Jean-Philippe (2017-2020)

Apprenti.e.s (2018-2021)

BIERNACKI Kévin (2019-2020)
CARCONE Thibaud (2021-2023)
DA SILVA Yann (2020-2022)
NOMOKO Modibo (2020-2021)
SYLLA Ibrahima (2018-2020)

Chercheur.euse.s CDD et post-doctorant.e.s (2018 - 2021)

AGAPOPOULOU Christina (2020-2022)
BLANCHET Adrien (2020-2022)
CANGEMI Floriane (2020-2022)
CAROFF Sami (2018-2020)
FONTANA Marianna (2020-2022)

KHANDOGA Mykola (2020-2022)
LE COZ Sandra (2021-2023)
LEGET Pierre-François (2018-2021)
MASSON Erwann (2021-2023)
NOMIDIS Ioannis (2018-2020)
PEREZ RAFOL Ignasi (2019-2021)
PRIVITERA Paolo (2018-2021)
QUAGLIANI Renato (2017-2020)
SUJOROV Sergey (2020-2022)
VOM BRUCH Dorothea (2017-2020)
WEBBER Steffen Georg (2019-2021)
ZOPOUNIDIS Jean-Philippe (2020-2023)

Ingénieur.e.s, technicien.ne.s, administratif.ve.s

Ingénieur.e.s de recherche

COLLEY Jean-Marc
CORNAT Rémi
CRESCIOLI Francesco
DADOUN Olivier
DAUBARD Guillaume
GAIOR Romain
GARROUM Nabil
JURAMY-GILLES Claire
LAPORTE Didier
LE DORTZ Olivier
LEBBOLO Hervé
LEGRAND François
MENDOZA Victor
MEPHANE Evelyne
MEUNIER Jean-Luc
RUSSO Stefano
SEPULVEDA TAUJIS Eduardo
TOUSSENET François
WARIN Patricia

Ingénieur.e.s d'études

CORONA Pascal
COSSIN Isabelle
GHISLAIN Patrick
MARTIN David
MARQUOIS Karine
PHILIPPE Julien
PARRAUD Jean-Marc
REPAIN Philippe
TERRONT Diego Fernando
VALLEREAU Alain
VOISIN Vincent

Assistant.e.s ingénieur.e.s

BAILLY Philippe
CARVALHAIS Carla
CRIART Véronique
DHELLOT Marc
LANTHEAUME Alexandre
ORAIN Yann
PIERRE Eric
ROYNEL Michael
TCHUENBOU Yves-Patrick

Technicien.ne.s de recherche

CARACO Bernard
CORIDIAN Julien
DELAMOUR Brigitte
HO Tan Trung

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 ou mission (2018-2021)

JORON Abigaïl (2021-2022)

LEFEVRE Sébastien (2020-2022)

SPIGA Olivier (2021-2022)

Instances du laboratoire

Conseil du laboratoire (2021)

Président ex-officio

ZITO Marco

Membres nommés

BEAU Tristan

CARVALHAIS Carla

REGNAULT Nicolas

Représentant des étudiant.e.s

AUGARDE Guy

Membres élu.e.s

BOLMONT Julien

DAUBARD Guillaume

GUIGUE Mathieu

HARDIN Delphine

JURAMY-GILLES Claire

LEGRAND Francois

LENAIN Jean-Philippe

MEUNIER Jean-Luc

Membres invité.e.s ex-officio

CORNAT Rémi

MEPHANE Évelyne

RIDEL Mélissa

Conseil scientifique (2021)

Membres extérieur.e.s nommé.e.s

CIRELLI Marco

UNAL Guillaume

Membres nommé.e.s

ASTIER Pierre (président)

HARDIN Delphine

RUSSO Stefano

Membres élus

CHARLES Matthew

GIGANTI Claudio (secrétaire)

LAPORTE Didier

LENAIN Jean-Philippe

SEPULVEDA Eduardo

TRINCAZ-DUVOID Sophie

Membres invité.e.s ex-officio

CORNAT Rémi

RIDEL Mélissa

ZITO Marco

Comité local hygiène et sécurité et conditions de travail (2021)

Président

ZITO Marco

Directrice adjointe

RIDEL Mélissa

Directeur technique

CORNAT Rémi

Administratrice

MEPHANE Evelyne

Assistant.e.s de prévention

CARVALHAIS Carla

PARRAUD Jean-Marc

Conseiller Radioprotection

BOLMONT Julien

Représentant.e.s du personnel

BEAU Tristan

DAUBARD Guillaume

JURAMY-GILLES Claire

LENAIN Jean-Philippe

Responsable du service hygiène et sécurité

de Sorbonne Université

NEBBACHE Soraya

Responsable du Département Transverse de Prévention

des Risques Professionnels de l'Université de Paris

COUTARD Yann

Ingénier.e 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 du travail de Sorbonne Université

HERIN Laurent

Médecin de travail du CNRS

VASSEUR Arnaud

Commission des personnels du laboratoire (2021)

Membres nommé.e.s

LEGRAND Francois

JURAMY-GILLES Claire

Membres élus

CORIDIAN Julien

CRIART Véronique

LAPORTE Didier

Chargé.e.s de mission

Bibliothèque

LE GUILLOU Laurent

Comité Biennale 2021 (reportée à 2022)

CARVALHAIS Carla

COSSIN Isabelle

HARDIN Delphine

MALAESCU Bogdan

MARQUET Laurence

MARTINEAU Olivier

NEVEU Jérémy

RIDEL Mélissa

TOUSSENEL Francois

ZITO Marco

Formation

DERUE Frédéric

Partenariats et valorisation

CORNAT Rémi

Masters 2

BEN-HAIM Eli

HARDIN Delphine

VINCENT Pascal

Réunion du vendredi (2020-2021)

BAILLY-REYRE Aurélien

CAMACHO TORO Reina

JOYCE Michael

JURAMY-GILLES Claire

Sécurité

Assistants de Prévention

CARVALHAIS Carla

PARRAUD Jean-Marc

Conseiller Radioprotection

BOLMONT Julien

Référent protection laser

CRESCIOLI Francesco

Séminaires (2020-2021)

GUIGUE Mathieu

POGGIOLI Luc

Stages, Thèses, Écoles Doctorales, Nouveaux/elles Entrant.e.s (2019)

Suivi des doctorant.e.s du laboratoire

TRINCAZ-DUVOID Sophie

Stages

TRINCAZ-DUVOID Sophie

École Doctorale

JOYCE Michael

NIKOLIC Irena

RIDEL Mélissa

TRINCAZ-DUVOID Sophie

Nouveaux/elles entrant.e.s

MEUNIER Jean-Luc, JORON Abigaïl

Structures partenaires (Labex, DIM, Initiative, etc)

Initiative Sorbonne Université Physique des infinis

BALLAND Christophe

TRINCAZ-DUVOID Sophie

ACAV +

BOLMONT Julien

IDPASC

LAFORGE Bertrand

PNGC

REGNAULT Nicolas

LA-CoNGA-Physics

CAMACHO TORO Reina

OCARIZ José

Cellule ANR

DERUE Frédéric

GLIGOROV Vladimir

RIDEL Mélissa

Correspondante ANR auprès de l'IN2P3

RIDEL Mélissa

Correspondant projets européens

DERUE Frédéric

Référente égalité professionnelle

RIDEL Mélissa

Référents développement durable pour Sorbonne Université

CORNAT Rémi

WARIN Patricia

Référent Science ouverte

POLCI Francesco

Web

DE SÁ-VARANDA Vera

LEGRAND François

RIDEL Mélissa

TRINCAZ-DUVOID Sophie

Vie du laboratoire

- 2021 : le LPNHE fête ses 50 ans !
- Le LPNHE au temps de la pandémie de COVID-19
 - Production d'un respirateur mécanique simple et abordable pour les patients du COVID-19
 - PyCoA : Python pour comprendre la COVID-19
- Partenariats scientifiques
- Vers un bilan des gaz à effet de serre du LPNHE avec les outils de Labos1point5
- Animation scientifique
 - Les séminaires
 - Liste des séminaires
 - La réunion du vendredi : au cœur de la vie du laboratoire
- La formation permanente



Vie du laboratoire

La vie scientifique du LPNHE s'articule à travers les activités et les projets que nous avons décrits précédemment mais aussi grâce à plusieurs événements incontournables qui ponctuent la semaine.

Les séminaires du lundi permettent de recevoir un collègue d'un autre laboratoire et donnent un large panorama de la recherche contemporaine, dans la discipline et au-delà, comme montré par la liste des ceux qui ont eu lieu ces deux années. Entre autre, les séminaires permettent aux étudiants et jeunes post-doctorants de compléter leur formation par la recherche et de rentrer en contact avec les dernières avancées dans des expériences parfois éloignées de leur activité de thèse. Par ailleurs, cet aspect est complété par le journal-club des doctorants qui a été relancé à l'automne 2021.

La réunion du vendredi, une véritable tradition du laboratoire, est consacrée aux informations, aux discussions de sujets d'intérêt général et plus largement à la communication interne. Une présentation d'une demi-heure assurée par un membre du laboratoire complète l'ordre du jour et permet de mettre sous le projecteur les activités et les compétences de tous/toutes. La nouvelle organisation de la réunion, avec un binôme chercheur-IT à la coordination, permet de mieux prendre en compte les activités techniques. Après avoir connu pendant plusieurs années une baisse du nombre de participants, la participation est répartie à la hausse : plus de 90 participants pendant les périodes de confinement et cela continue après le retour en présentiel au laboratoire.

Un autre rendez-vous incontournable est la biennale où le laboratoire 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 et ne s'est pas tenue en 2021 à cause de la COVID-19 : l'échéance est reportée à mai 2022.

En 2021, le LPNHE a fêté ses 50 ans en plusieurs occasions. Ce rapport revient sur ces événements mais est également un événement en soi marquant les 50 ans du laboratoire. On notera également une nouvelle plaquette, une frise très grand format reprenant la chronologie du laboratoire, affichée en rotonde de la tour 12, qui se trouve également dans ce rapport en 3 endroits pages 77, 93 et 136, une affiche contribuant à l'exposition des 50 ans de l'IN2P3 qui se trouve coïncider avec les 50 ans du LPNHE et une chronologie sur le site web dédié au 50 ans de l'IN2P3 (<https://50ans.in2p3.fr/>). Cet ensemble d'éléments pérennes et/ou festifs a permis de mettre en lumière la riche contribution du laboratoire à la physique des hautes énergies et de replonger dans nos archives.

La fête de la science est un autre moment fort de l'année qui permet de toucher différents public et de les sensibiliser à nos activités. La participation, toujours de bon niveau, montre l'attachement du public et du personnel du laboratoire à ces initiatives ce que nous avons pu constater en 2021 après une année blanche en 2020.

De plus, le laboratoire s'inscrit dans son époque. Il a subi la crise du COVID-19 durant les deux années couvertes par ce rapport d'activité. Cette crise a également donné lieu à des initiatives qui sont exposées dans ce chapitre. Comme dans d'autres laboratoires, après une discussion en conseil du laboratoire, un bilan des gaz à effet de serre s'engage.

Animations des réseaux métier, formations à tous les niveaux permettent de préserver et enrichir le niveau de compétence. Il serait trop long de résumer ici toute une série d'autres initiatives, comme la journée projets, la journée support à la recherche, les réunions IT, les réunions ressources, les revues des projets qui structurent tout le long de l'année notre vie scientifique et technique.



2021: le LPNHE fête ses 50 ans !

En 2021, le LPNHE a fêté ses 50 ans et les célébrations ont été encore plus belles parce que notre Institut tutelle du CNRS, l'Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire (IN2P3), fêtait aussi ses 50 ans.

Si on compare l'état actuel de la discipline et du LPNHE, avec les années de la création du laboratoire par des équipes de spécialistes des chambres à bulles de l'IPN d'Orsay et de l'Institut Curie, on mesure le chemin parcouru. Le LPNHE a pendant toutes ces années apporté des contributions de premier plan à la définition du Modèle Standard de la Physique des Particules. On peut ainsi citer les expériences des années 1970-1980 à DESY en Allemagne qui ont permis de mieux comprendre l'interaction forte et à l'autre bout de notre histoire la découverte du boson de Higgs au CERN de Genève en 2012. Pendant ces décennies le LPNHE a aussi constamment redéfini ses axes de recherches, en étudiant la physique des neutrinos, puis les rayons cosmiques, en s'ouvrant à la cosmologie et encore plus récemment en développant des expériences à la recherche de la matière noire. Tous ces axes de recherche enrichissent notre environnement scientifique et sont encore aujourd'hui très actifs. Par ailleurs, une frise historique très détaillée a été préparée à l'occasion de ces célébrations pour rappeler les grandes dates et les découvertes marquantes : elle figure dans ce rapport d'activité et s'affiche dans la rotonde de la tour 12 (pages 77, 93 et 136 et photo ci-contre en bas).

La célébration des 50 ans du LPNHE et de l'IN2P3 a eu lieu le 19 juin 2021 dans notre bel amphithéâtre Charpak, avec la présence de haut niveau de nos tutelles universitaires Sorbonne Université (Stéphane

Régnier, doyen de la faculté des sciences et ingénierie a pris la parole, photo ci-contre en haut, après Jean Chambaz, président de Sorbonne Université) et Université de Paris (représenté par Thomas Patzak, vice-doyen recherche de la faculté des sciences). Cela a été l'occasion de reparcourir cette riche histoire, faite de découvertes mais aussi des personnalités remarquables, en particulier dans les présentations de Reynald Pain, directeur de l'IN2P3, et de Lydia Roos, directrice adjointe scientifique de l'IN2P3, tous les deux des anciens du laboratoire. La présentation de Pauline Zarrouk, chargée de recherche CNRS au LPNHE depuis 2020, a permis d'esquisser le panorama de nos interrogations actuelles sur l'infiniment grand, en particulier les recherches portant sur la matière noire et l'énergie noire. Deux prix Nobel de Physique, Saul Perlmutter et Takaaki Kajita, nous ont envoyé des messages de congratulations, et Ursula Bässler, présidente du Conseil du Cern et ancienne du LPNHE, a transmis ses salutations amicales. Michel Spiro, ancien directeur de l'IN2P3 et président de la SFP, a lui aussi envoyé un message de salutations et de soutien. Qu'ils soient tous ici remerciés !



Ces messages ont été une façon de rappeler que le LPNHE fait partie d'un réseau étroit et dense de collaborations scientifiques qui s'étendent sur cinq continents. Dans ce réseau, nous sommes fiers de représenter une riche tradition scientifique qui remonte au Moyen Age, avec l'école de Paris et notamment Jean Buridan. Plus proche de nous, Henri Becquerel a découvert la radioactivité des sels d'uranium dans son laboratoire du Muséum, à une encablure de notre campus, et Marie Curie, ancienne étudiante puis professeure à la Sorbonne, a effectué ses recherches dans des locaux à peine plus éloignés. Naturellement la célébration des 50 ans a été l'occasion de faire le point sur nos recherches



mais aussi de nous retrouver tous en présentiel après de longs mois de confinement et d'accès restreint au laboratoire. Le personnel du LPNHE, qui constitue le sel du laboratoire, a participé en nombre, des jeunes étudiants et post-doctorants jusqu'aux retraités qui ont tenu à être présents. C'est avec l'énergie de la jeunesse, mais aussi dans l'atmosphère conviviale et l'esprit collégial qui caractérisent notre laboratoire, que nous entamons avec brio les recherches de cette nouvelle phase de la vie du LPNHE !



Le LPNHE au temps de la pandémie de COVID-19

Les années 2020 et 2021 ont été aussi celles de la pandémie de la COVID-19. Comment préserver les liens et les activités des équipes dans ces circonstances ? En effet, le laboratoire a été confronté à plusieurs difficultés liées à cette situation exceptionnelle. Pendant les confinements, l'accès au laboratoire a été très restreint, avec seulement une dizaine de personnes autorisées à se rendre dans nos locaux. Une bonne partie de l'activité technique (atelier mécanique et câblage, montages et tests) mais aussi administrative a été fortement impactée. De plus, l'activité de recherche, faite d'originalité, d'idées nouvelles, de *brainstorming*, jaillit de l'interaction dans les équipes et ne peut pas se contenter d'un isolement forcé.

Le laboratoire a su réagir face à ces difficultés avec une excellente capacité d'initiative et d'esprit collectif. Des détails sur les aspects sanitaires sont donnés dans la partie Organisation du laboratoire dans l'article Prévention des risques professionnels - Radioprotection - Rayonnements optiques artificiels page 115. Tout le personnel est passé rapidement au télétravail. Une série de réunions par visioconférence a été rapidement mise en place et chaque membre du personnel était en liaison régulière avec son équipe ou son responsable au moins une fois par semaine. Un effort particulier a permis d'équiper la plupart des personnes avec le nécessaire pour le télétravail et les visio-conférences. Signalons en particulier la réunion du vendredi, réunion qui a pour vocation de rassembler tous les personnels et qui a dépassé régulièrement les 90 participants connectés. Un suivi régulier avec les étudiants en thèse a permis de les aider dans leur parcours de formation par la recherche.

Rapidement, là où c'était possible, certains bancs de tests électroniques ont été installés ailleurs pour être accessibles. La base de tout cet effort, l'infrastructure informatique du laboratoire (serveurs, stockage, grille de calcul), a été mise à rude épreuve mais a continué à fonctionner grâce à l'assiduité du service informatique.

En plus des activités de recherche dans la discipline, le personnel a répondu présent pour aider à l'effort national et international pour faire face à l'épidémie. Des masques, blouses et autres EPI ont été donnés aux services hospitaliers par une action en commun avec les autres laboratoires de l'UFR de physique de SU. En collaboration avec l'APC, nous avons contribué à un projet de respirateurs précisé ci-contre. A l'initiative de l'expérience ATLAS, la grille de calcul a contribué au projet *Fold@home* de calcul de la structure tri-dimensionnelle de protéines pour la biologie et la médecine. Il était facilement compatible avec l'infrastructure en place. ATLAS l'a directement intégré dans son système de production, permettant de tourner sur les sites de la grille de manière centralisée. Ainsi, d'avril à octobre 2020, 17% des ressources de calcul du site ont été utilisées pour des applications de recherche sur le COVID-19. Les machines du cloud et les cartes GPU ont elles aussi reçues des tâches par cette application. PyCoA, décrit ci-après, a aussi contribué à cet effort de science participative.

Une des priorités, bien identifiée par tout le personnel, a été celle de garder les liens qui font du laboratoire un collectif uni et cohérent. Nous avons ainsi mis en place une « journée des projets du LPNHE » qui a permis de partager les avancées de chaque équipe, ainsi qu'une demi-journée « support à la recherche », focalisée sur les activités techniques et administratives qui sont si précieuses pour mener nos recherches.

En conclusion, c'est grâce aux efforts de chacun que le laboratoire a pu continuer avec une belle énergie à progresser dans ses activités malgré les difficultés dues à la période. Sans doute nous allons garder tous ces acquis, les déployer et les enrichir dans les prochaines années de la vie du laboratoire.



Production d'un respirateur mécanique simple et abordable pour les patients du COVID-19

À l'occasion du premier confinement, la collaboration MVM (*Mechanical Ventilator Milano*) est née de la *Global Argon Dark Matter Collaboration*, dont l'expérience DarkSide (décrit dans la partie Activités Scientifiques et Techniques page 39) fait partie, au début de la crise mondiale de COVID-19. Son but était de pallier la pénurie de respirateurs mécaniques nécessaires au traitement des patients atteints du virus en en produisant un nouveau, simple et abordable. Ce projet initié à Milan a pour nom MVM. L'effectif de la collaboration s'est ensuite étendu à la fois dans le monde académique, industriel et médical. Durant un gros mois, se relayant 24h sur 24 (grâce à la multiplicité des créneaux horaires) les équipes techniques de la collaboration ont pu concevoir, tester et produire les premières unités de ce respirateur mécanique (photo ci-contre). Les phases d'approbation des différentes instances gouvernementales ainsi que la documentation du projet ont quant à elles pris plus de temps, la dernière approbation arrivant environ 1 an après le début du projet (Europe). Un article a été également publié consultable sous la référence doi 10.1063/5.0044445.

Les membres du LPNHE impliqués dans ce projet ont principalement contribué à la documentation, tâche nécessaire à sa diffusion.

La collaboration MVM n'a aujourd'hui plus d'activité ayant rempli son objectif.



Equipe :

Julie Rode

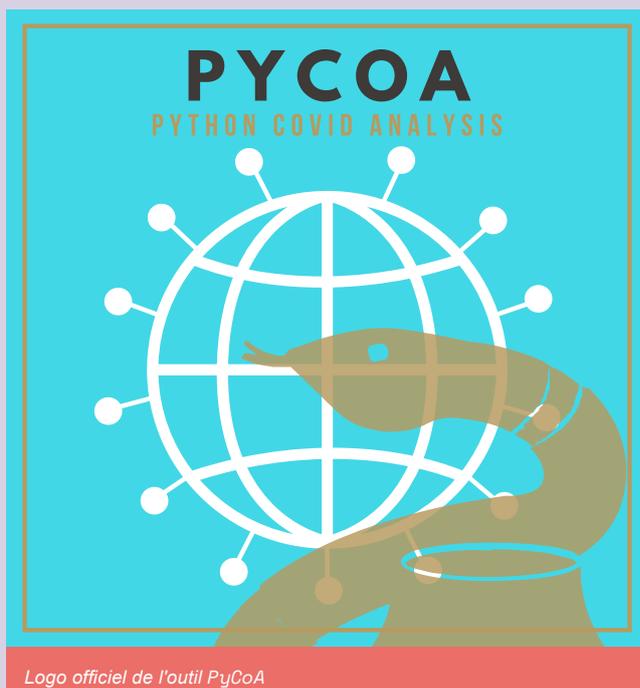
CHIFFRES CLEFS

73 instituts de recherche et entreprises impliqués dans le monde

Développement **24h sur 24** grâce aux différents créneaux horaires

PyCoA : Python pour comprendre la COVID-19

À l'occasion du premier confinement, deux membres du laboratoire, Tristan Beau et Olivier Dadoun, ainsi que Julien Browaeys (Université de Paris, laboratoire MSC), ont initié le projet PyCoA (*Python Covid Analysis*) (image ci-dessous). Initialement désigné sous



le nom de CoCoA (pour *Collaborative Covid Analysis*), le projet a vu le jour à partir de la participation en avril 2020 à l'hackathon organisé par UltraHack.org : <https://ultrahack.org/covid-19datahack>. Retenu en phase finale mais non sorti vainqueur, le projet se veut *free* et *opensource*. Il a continué d'évoluer depuis et a subi une mise à jour majeure lors du Hackathon COVID-19 animé par la Direction interministérielle de la transformation publique en avril 2021. Son code est public ainsi que les *notebooks* qui servent de référence et d'exemples d'utilisation.

PyCoA est un ensemble de code Python™ qui fournit :

- un accès simple aux bases de données sur la COVID-19 ;
- des outils pour analyser les données de la COVID-19 ou les représenter sous forme de séries temporelles, d'histogrammes, de cartes (figures ci-après).

Cet environnement est pensé pour être accessible à des non-spécialistes : des lycéen.ne.s qui apprennent Python™, des étudiant.e.s, des journalistes scientifiques, voire même des chercheurs et chercheuses qui ne sont pas familier.e.s avec l'extraction de données, des analystes stratégiques. Des analyses simples peuvent être directement effectuées et des analyses plus poussées peuvent être produites par les personnes habituées à programmer en Python™.

L'outil PyCoA assure l'accès à plusieurs bases de données (internationales comme celle de la *Johns Hopkins University* ou nationales comme celle de Santé Publique France, ou d'autres bases équivalentes en Italie, Allemagne, Espagne, États-Unis, etc.). Il fournit un format standardisé pour les données. Il assure par ailleurs une jointure transparente avec des bases de géo-localisation (gestion des noms de pays ou de régions, possibilité de jointures sur des bases avec des descriptions différentes, création de cartes). Ces informations de géolocalisation peuvent par ailleurs être utilisées pour d'autres applications en dehors des aspects COVID-19.

L'outil PyCoA est pensé pour être utilisé dans un environnement jupyter, installé localement ou bien-sûr un serveur distant (comme le propose par exemple google colab ou mybinder.org). Cela en simplifie l'installation et assure des sorties graphiques performantes avec très peu de lignes de code pour l'utilisateur.

Le projet a été développé à l'origine pour des études épidémiologiques liées à la COVID-19. Il pourra cependant être utilisé pour d'autres types d'études. Ainsi, des analyses comportant des données avec des séries temporelles associées à des variables numériques et géographiques, pourront utiliser PyCoA. Leurs études seront grandement simplifiées et pourront profiter de représentations graphiques claires et précises.

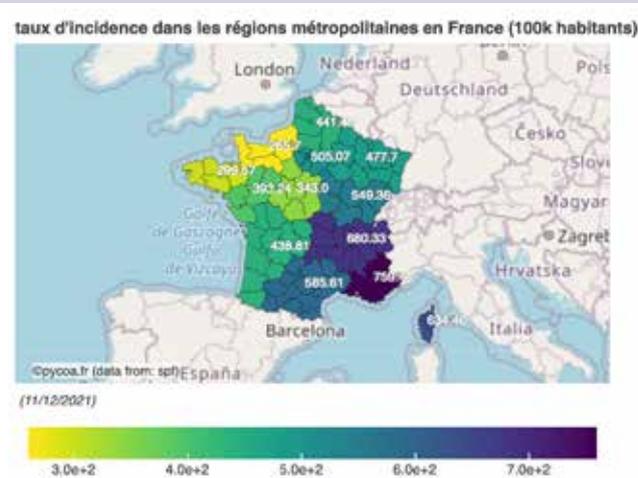
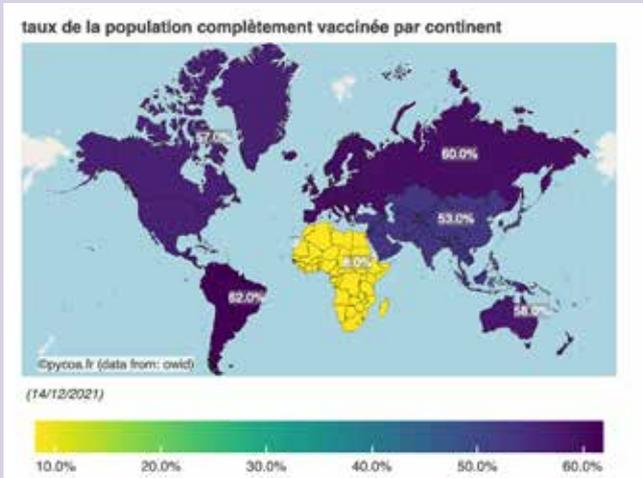
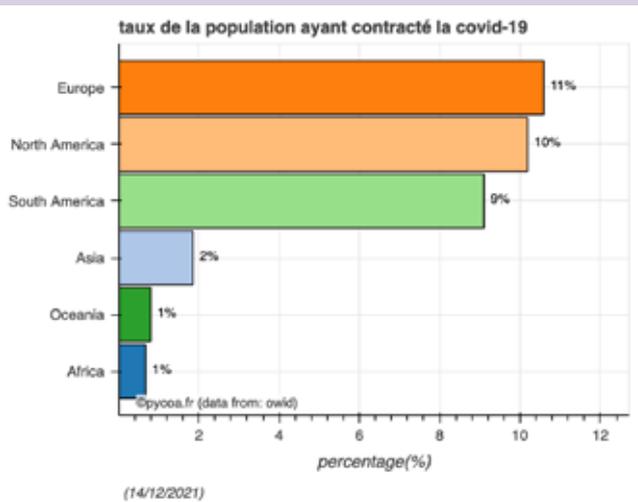
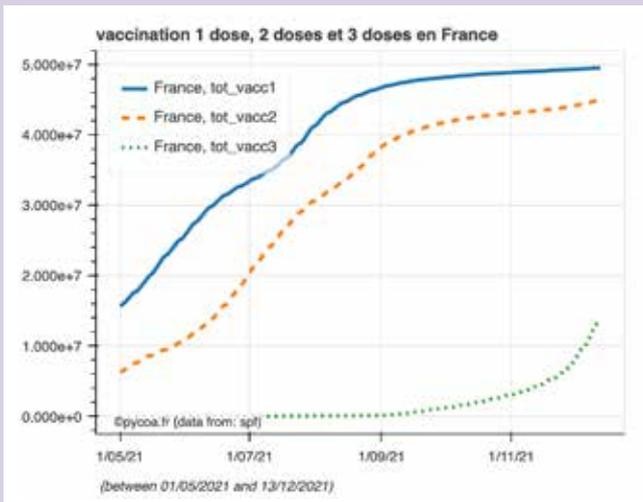
Pour retrouver l'outil :

Page web : www.pycoa.fr

Dépôt Git : https://bit.ly/git_pycoa

Twitter : [@pycoa_fr](https://twitter.com/pycoa_fr)

Data.gouv : <https://www.data.gouv.fr/en/reuses/pycoa-python-covid-analysis/>



Illustrations de représentations graphiques de PyCoA des données liées à la COVID-19, données mondiales issues de la base OWID "Our World In Data", données françaises issues de SPF "Santé Publique France".

Equipe :

Tristan Beau, Julien Browaeÿs (Université de Paris, laboratoire MSC), Olivier Dadoun

CHIFFRES CLEFS

- 6200** lignes de code
- 15 500** mots de documentation
- 17** bases de données différentes, jointure de **9** sources rien que pour les données Santé Publique France

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 l'Initiative de la Physique des Infinis (IPI) de l'Alliance Sorbonne Université, dont le cœur est constitué de 9 laboratoires de physique internationalement reconnus (LPNHE, LPP, IAP, LPTHE, LULI, LPENS, LESIA, LERMA et INSP). C'est un programme de recherche et de formation par la recherche destiné à rapprocher chercheurs, enseignants et étudiants autour de deux axes de recherche intensive : la Physique des Plasmas et la Physique de l'Univers. Un des deux directeurs de cette initiative est issu du LPNHE.

Le LPNHE est aussi membre de la Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales (FRIF), qui regroupe, sous la tutelle de Sorbonne Université, les chercheurs du LPNHE et les théoriciens du LPTHE, du LPTENS et de l'APC. Le Collège de France est également associé à la FRIF via la Chaire de Marc Henneaux (Champs, cordes, gravité). L'affiliation à la fédération a permis de développer les interactions avec théoriciens 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.

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 (Irfu, LAL, IPN, LLR) de moyens de calculs 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 et une demande de renouvellement de ce réseau avec un nouveau format est actuellement en cours.

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). Grâce entre autres aux liens tissés dans le passé par le LPNHE, deux nouveaux laboratoires de l'IN2P3/CNRS ont été créés : le Centre Pierre Binetruy basé à Berkeley aux Etats-Unis et le laboratoire ILANCE à Tokyo. Ces structures offrent les meilleures conditions pour des séjours de chercheurs du LPNHE dans ces 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 est impliqué dans le programme EPLANET d'échanges scientifiques avec l'Amérique latine qui vise 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. Depuis, deux membres du laboratoire participent au programme *Latin-American Alliance for Capacity building in Advanced Physics* (LA-CoNGA Physics) qui est un projet lauréat en 2019 du programme ERASMUS+ pour le développement de master en physique des hautes énergies en Amérique latine.

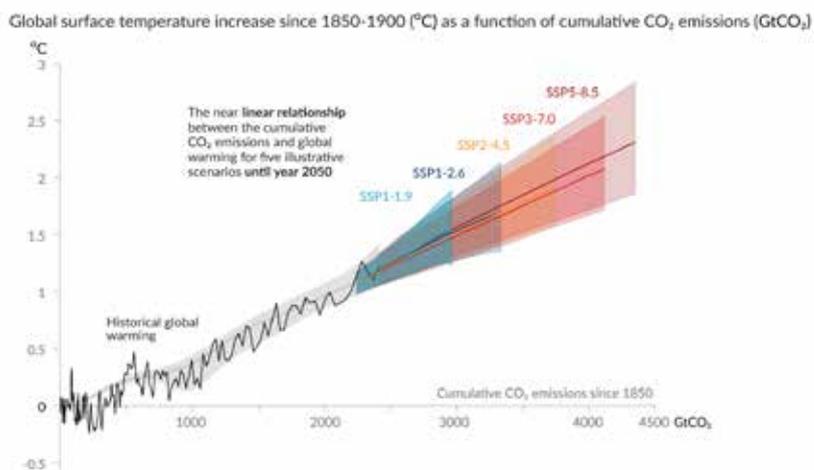


Vers un bilan des gaz à effet de serre du LPNHE avec les outils de Labos1point5

Un ensemble de chercheuses et chercheurs de laboratoires français de tous les horizons a créé un collectif depuis plusieurs années qui a pour dessein de mieux comprendre et réduire l'impact des activités de recherche scientifique sur l'environnement et en particulier sur le climat. Il s'agit du collectif labos1point5 que l'on retrouvera sur le site internet <https://labos1point5.org>. Ce collectif prend désormais la forme d'un GDR, soutenu notamment par le CNRS, qui a été lancé en novembre 2021 pour une période de 5 ans. Tout membre du monde académique, temporaire ou permanent, peut devenir membre de ce GDR. Ce dernier s'articule autour d'un conseil de direction, d'un conseil scientifique et de plusieurs équipes : Organisation, Empreinte, Expérimentation, Enseignement, Communication, Technique. Chaque membre du GDR s'engage à consacrer au moins 5% de son temps de travail au sein d'une ou plusieurs équipes. Il s'agit d'un choix individuel. Certains membres du LPNHE sont désormais membres de ce GDR.

Plus spécifiquement pour le LPNHE, à compter de 2022, après validation auprès du conseil de laboratoire et approbation par la direction, il a été choisi de participer à la phase de bilan de gaz à effet de serre du laboratoire en utilisant l'outil GES de labos1point5 (ce qui ne requiert pas nécessairement de figurer au sein du GDR par ailleurs). Le LPNHE rejoint ainsi les 300 laboratoires qui ont réalisé ce bilan ou sont en train de le réaliser. Ce bilan s'appuie sur un outil web gratuit et *open-source* pour les laboratoires, conforme à la réglementation française et dont les périmètres actuels sont la prise en compte des bâtiments (électricité, chauffage, réfrigération), les dépla-

cements (missions et trajets domicile-travail), le matériel informatique et bientôt les achats et les infrastructures de recherche. En partageant une méthodologie commune, il est possible d'estimer et analyser l'empreinte carbone de la recherche française, permettant alors d'identifier les niveaux d'émission pour les différentes sources (et envisager des expérimentations pour les réduire) mais aussi de sensibiliser et impliquer les personnels face à l'urgence climatique (figure ci-dessous).



Corrélation entre la température terrestre et les émissions de CO₂ (figure SPM.10, IPCC, groupe de travail I, <https://www.ipcc.ch>). Les courbes de couleur au delà de 2022 correspondent à différents scénarii d'émission.



Animation scientifique

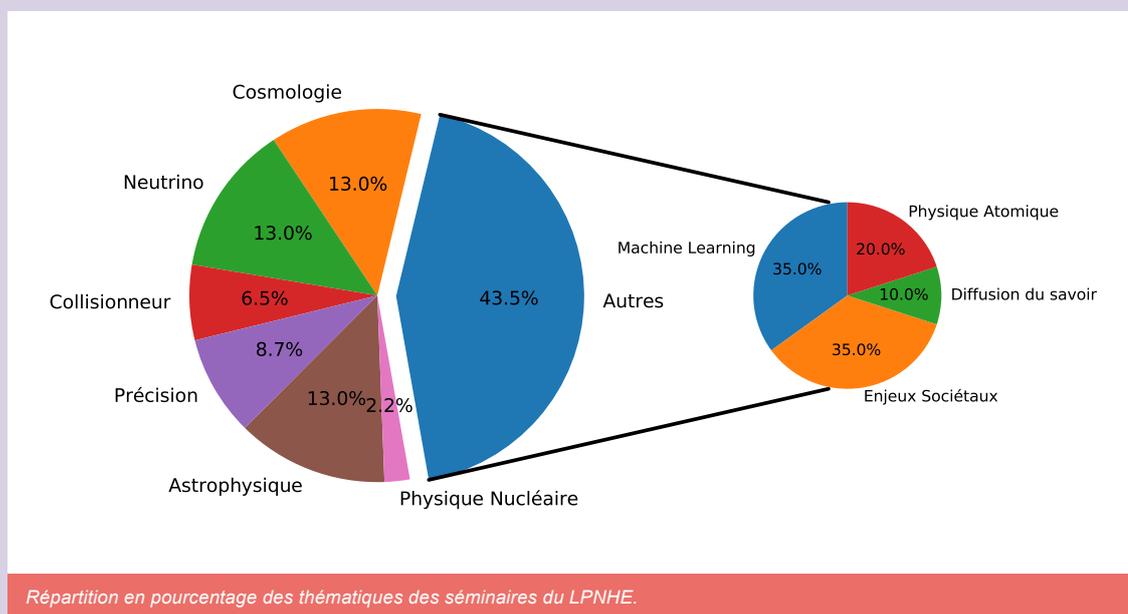
Les séminaires

Le LPNHE organise régulièrement le lundi un séminaire ouvert à tous, tout en visant plus particulièrement les étudiants, stagiaires et postdoctorants à des fins de formation, mais également les personnes plus expérimentées. Cette période a été naturellement marquée par la pandémie liée au COVID-19. Les séminaires ont été maintenus durant cette période difficile, via connexion à distance, en mode hybride et en présentiel dès que cela a été possible et ont ainsi fourni un taux de remplissage du calendrier de 66%.

Comme on peut le voir dans le diagramme ci-dessous, les thématiques du laboratoire

(collisionneur, astroparticule, cosmologie, neutrinos) ont été bien représentées durant cette période. Volontairement, la moitié des séminaires environ a porté sur des thématiques extérieures, répondant en cela à une demande du laboratoire, en mettant notamment l'accent sur les aspects de *Machine Learning* en pleine expansion actuellement, ainsi que de la diffusion du savoir.

Les thématiques comme Physique de Précision et Physique atomique permettent de maintenir des rapports étroits avec les laboratoires impliqués, en particulier ceux du campus.



Liste des séminaires

2020

06/01/2020 : Satya GONTCHO (Rochester U), "The Dark Energy Spectroscopic Instrument and Intergalactic Medium-based Cosmology"

14/01/2020 : Jacques Pienaar (Chicago U), "Dark Matter Searches in using Ionization Signal in XENON1T"

20/01/2020 : Mathieu Bongrand (LAL - Université Paris-Sud 11), "Recherche de neutrinos stériles avec l'expérience SoLid auprès du réacteur SCK-CEN BR2"

27/01/2020 : Dorothea vom Bruch (LPNHE), "Allen: A high level trigger on GPUs for LHCb"

10/02/2020 : Emille Ishida (LPC-UCA), "Machine Learning in Astronomy"

17/02/2020 : Vincent Vennin (APC Paris), "Primordial Black Holes from Quantum Diffusion during Cosmic Inflation"

02/03/2020 : Pierre Cristofari (GSSI), "Supernova remnants with the Cherenkov Telescope Array"

09/03/2020 : Pascale Senellart-Mardon (C2N), "The emergence of quantum computing: principles, implementations, challenges"

21/04/2020 : Carla MARIN BENITO (CNRS) UMR8607, "Lepton Universality measurements at LHCb"

27/04/2020 : Yolanda Prezado (IMNC), "Spatial fractionation of the dose in Radiation Therapy: from photons to charged particles"

04/05/2020 : Pierre Cladé (LKB), "Towards a determination of the fine-structure constant below 0.1 parts-per-billion : test of the Standard Model using the electron magnetic moment"

11/05/2020 : François Piuze (CEA/Irfu/Physique sans Frontières), "La commission Physique sans Frontières et son action pour les sciences expérimentales dans les pays à faibles ressources"

18/05/2020 : Pascal Yiou (LSCE), "Physical, mathematical and statistical challenges for the study of extremes in a changing climate"

08/06/2020 : Pierre DELAHAYE (GANIL), "Search for CP violation in nuclear beta decay: the MORA project"

15/06/2020 : Misha Haywood (Observatoire de Paris), "How Gaia unveils the formation and evolution of the Milky Way"

22/06/2020 : Jean Jacquinet (ITER), "ITER: an unprecedented international collaboration for developing fusion energy"

06/07/2020 : Jean-Pierre Briot (LIP6), "Apprentissage profond : fondations, succès et défis"

20/07/2020 : Alessandro Minotti (LAPP), "Neutrino oscillation from reactor experiments, the reactor anomaly, and light sterile neutrinos"

28/09/2020 : Louise Breuval (Observatoire de Paris, LESIA), "The Cepheid distance ladder: from the local Gaia calibration to distant galaxies."

12/10/2020 : Marc Moniez (IJCLAB), "Baryon Acoustic Oscillations"

02/11/2020 : Sonia El Hedri (LLR), "The Diffuse Supernova Neutrino Background in Super-Kamiokande"

09/11/2020 : David Rousseau (IJCLab, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay), "Recent advances on applying Machine Learning to High Energy Physics"

07/12/2020 : Pascale Braconnot (LSCE-IPSL), "Climate simulations to understand climate changes and anticipate future"

2021

11/01/2021 : Stephanie Roccia (Institut Laue Langevin), "Particle Physics with Ultracold Neutrons at the Institut Laue-Langevin"

18/01/2021 : Fabricio Jimenez Morales (LLR - École polytechnique, CNRS/IN2P3), "Two Machine Learning techniques for Model Independent New Physics searches at the LHC"

25/01/2021 : Andrea de Gouvêa (NWU), "Looking for More New Physics in Neutrino Experiments (with LLR)"

08/02/2021 : Silvia Galli (IAP), "The status of cosmological tensions after Planck"

15/02/2021 : Felipe Pedreros Bustos (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille), "Laser guide stars for astronomy adaptive optics"

22/02/2021 : David Sarrut (CNRS), "Artificial Intelligence approaches for Monte Carlo simulation"

08/03/2021 : Denis LACROIX (Institut de Physique Nucléaire), "Description des systèmes quantiques complexes sur les ordinateurs quantiques (with LLR)"

22/03/2021 : Marc VERDERI (LLR), "Geant4, boîte à outils logicielle de transport de particules dans la matière."

29/03/2021 : Fabrice Jammes (CNRS), "Écoresponsabilité et informatique"

12/04/2021 : Anja Butter (ITP), "Simulating and unfolding LHC events with generative networks"

03/05/2021 : Andre Schoening (Heidelberg U), "The Mu3e Experiment: A new search for muon \rightarrow eee (with LLR)"

10/05/2021 : Lee Roberts (Boston U), "Exploring Terra Incognita with the World's Largest Penning Trap"

17/05/2021 : Chiara Ferrari (Lagrange, OCA), "Towards the construction of the Square Kilometre Array (with LLR)"

31/05/2021 : Claude Vallee (Centre de Physique des Particules de Marseille), "Physics Beyond Colliders reloaded: post-EPPSU mandate and prospects"

14/06/2021 : Marco CIRELLI (LPTHE Jussieu CNRS), "Dark Matter candidates circa 2021: the WIMPs and beyond the WIMPs"

21/06/2021 : Franziska Riedel (Observatoire de Paris), "Progress in techniques for optical clock comparisons"

28/06/2021 : Julien Bobroff (Université Paris Saclay), "Enseigner ou vulgariser la physique à l'heure du covid"

12/07/2021 : Saida Guelatti (LKB), "Measuring the fine-structure constant to refine Standard Model predictions"

27/09/2021 : Thierry Lasserre (Saclay), "Latest results from KATRIN on neutrino mass and the search for sterile neutrinos"

04/10/2021 : Alessia Ritacco (IAP), "High-accuracy polarization measurements at millimeter and sub-millimeter wavelengths from ground and space"

11/10/2021 : Nancy Paul (Laboratoire Kastler Brossel), "Probing Strong-field QED with Highly Charged Ions and Exotic Atoms"

22/11/2021 : Nelson Christensen (Artemis, Observatoire de la Côte Azur), "Gravitational Waves: Past, Present and Future"

13/12/2021 : David Sanchez (LAPP/IN2P3), "Centaurus A, notre proche voisine"

La réunion du vendredi : au cœur de la vie du laboratoire

La réunion du vendredi est un forum hebdomadaire auquel l'ensemble du laboratoire est convié, permettant une communication directe entre tous les personnels du laboratoire. Elle débute par une séance de partage d'informations diverses et de nouvelles diffusées par la direction. Un compte rendu de cette séance

est produit en français et anglais, afin qu'il soit accessible à tous les membres du laboratoire. Elle se poursuit par un ou plusieurs exposés sur un thème de physique, une réalisation technique, ou un sujet plus général. En particulier, les doctorants de deuxième année et les post-doctorants ont l'occasion d'y présenter leurs travaux devant un public extérieur à leur équipe. La période 2020-2021 a bousculé fortement les usages de la réunion, mais son format a été adapté. Entièrement en ligne aux périodes de confinement, puis en mode 'mixte' combinant diffusion en ligne et présentiel, la réunion du vendredi a été un rendez-vous incontournable pour préserver le collectif de travail du laboratoire.



Une réunion du vendredi en présence au laboratoire.



La dernière réunion du vendredi de 2020 qui était en ligne avec une thématique sur Noël.

CHIFFRES CLEFS

Jusqu'à
90 personnes
présentes
en ligne

Organisation et animation :

Actuellement : Aurélien Bailly-Reyre, Michael Joyce

Précédemment : Reina Camacho Toro, Claire Juramy-Gilles

La formation permanente

La formation permanente des personnels s'inscrit dans les orientations scientifiques du laboratoire, les évolutions liées aux collaborations existantes et aux nouveaux projets. Elle répond 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 agents tout au long de leur carrière.

Un total de 126 actions de formation ont été réalisées pour un total d'environ 300 jours. Une grande partie de ces formations ont pu être effectuées en visio-conférence durant

cette période liée à la pandémie. Environ trente cinq agents ont suivi une formation chaque année, principalement des personnels ITA ou IATSS, mais aussi quelques chercheurs. 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'une formation en langue française dès leur arrivée dans le laboratoire. L'autoformation des agents est importante, notamment grâce à *e-learning*. Enfin, les étudiants 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", "Rencontres de Moriond" et "Ecole de Gif" et des formations en gestion financière pour les gestionnaires de la DR2.

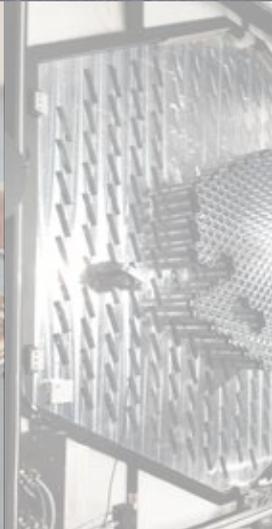
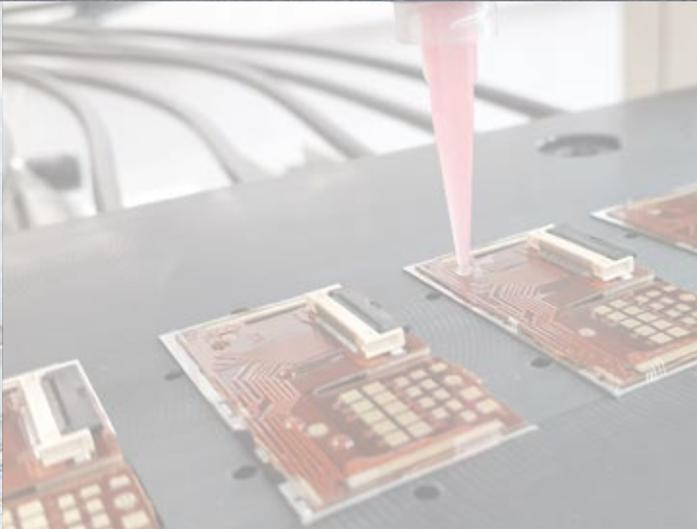
Correspondant formation :

Frédéric Derue



CHIFFRES CLEFS

300 jours de formation en 2020 et 2021, dans le détail, **58** actions de formation et **46** stages soit **144** jours de formation au bénéfice de **38** agents d'août 2020 à juillet 2021



2009

2009

Prise de données de physique du collisionneur LHC - Run 1

Run de prise de données de physique du collisionneur Tevatron

2011

2009

Le LPNHE et l'IN2P3 rejoignent le projet LSST de l'observatoire Vera C. Rubin

Après plusieurs années de R&D sur la caméra de LSST (Large Synoptic Survey Telescope), le LPNHE s'est engagé sur l'évaluation des CCD, l'électronique de lecture des CCD et la mécanique du changeur de filtres, qui place les filtres en 120s devant la caméra. Il a été livré en 2020.



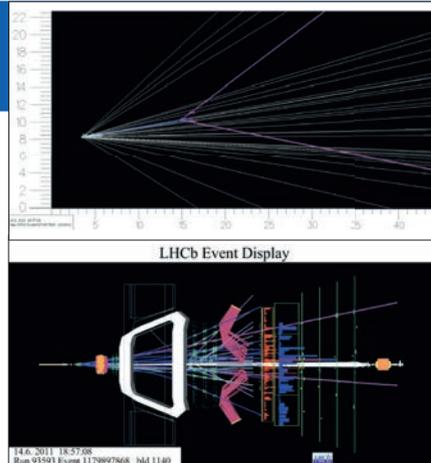
© Photothèque IN2P3 / CNRS

Tests du changeur de filtres dans les locaux du LPNHE.

2010

Première observation de la violation de CP dans les désintégrations des mésons charmés par LHCb

L'expérience LHCb sur l'accélérateur proton-proton LHC a annoncé la découverte de la violation de CP dans les mésons charmés. Elle était attendue après celle observée dans les kaons et les hadrons beaux.

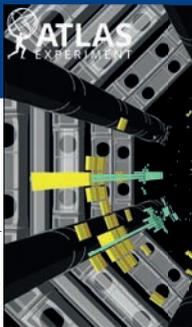


Vue d'un événement LHCb qui est compatible avec la désintégration rare $B_c \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Le point d'interaction se situe sur la gauche des deux images.

Les deux muons, matérialisés en violet, traversent tout le détecteur. Sur l'image du bas, on identifie de gauche à droite les différentes composantes du détecteur : le détecteur de vertex près du point d'interaction, le premier compteur RICH, l'aimant en blanc, et de ses deux cotés les stations du trajectographe. En aval de ce dernier, se trouve le second compteur RICH, suivi par le calorimètre électromagnétique, le calorimètre hadronique et le détecteur de muons. L'image du haut est un agrandissement autour du point d'interaction proton-proton, duquel une grande quantité de traces émerge. Le méson B_c se désintègre à environ 1 cm du point de collision des protons.

Découverte du boson de Higgs

Le 4 juillet 2012 est annoncée la découverte du boson de Higgs par les expériences ATLAS et CMS au LHC au cours d'un séminaire à la conférence ICHEP en Août 2012. Peter Higgs et François Englert ont reçu le prix Nobel de physique en 2013 pour la génération de la masse des particules.



© CERN / Photothèque IN2P3

2009

2009 : Observatoire Vera C. Rubin

Prise de données de rayons cosmiques de l'observatoire Pierre Auger

Construction du télescope LSST

2010 : Laboratoire Souterrain du Gran Sasso

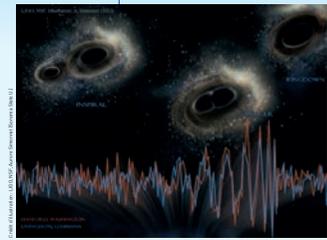
Construction

Participation du LPNHE

Prise de données de neutrinos de l'accélérateur J-PARC

2013 Jouvence du collisionneur

2015 Pr



LIGO détecte des ondes gravitationnelles provenant de trous noirs en fusion.

■ Première observation des ondes gravitationnelles

Suite à cette observation près de 100 ans après leur prédiction, le prix Nobel de physique de 2017 a couronné l'observation des ondes gravitationnelles. Depuis de nombreuses observations supplémentaires ont été effectuées par les expériences LIGO/Virgo.

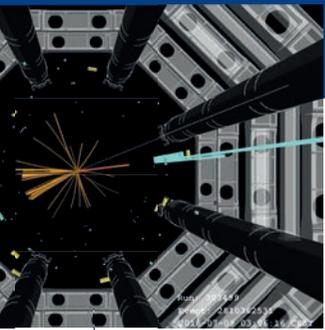
2012

2013

2015

■ Higgs

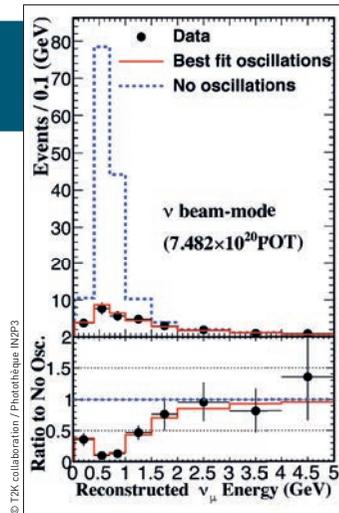
annoncée la découverte du boson de Higgs par les CMS placées sur le collisionneur proton-proton circulaire exceptionnel au CERN en duplex avec l'expérience ATLAS. Le Prix Nobel 2013 sera attribué à Peter Higgs et François Englert pour leur invention du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible des particules, près de 50 ans auparavant.



Un candidat boson de Higgs dans l'expérience ATLAS.

■ Première observation des oscillations de neutrinos par disparition dans l'expérience T2K au Japon

T2K est la première expérience d'oscillations de neutrinos à mettre en évidence l'apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau de neutrinos muoniques.



© T2K collaboration / Photothèque IN2P3

Histogramme montrant la disparition des neutrinos muoniques due aux oscillations dans l'expérience T2K. La courbe bleue est ce qu'on attend sans oscillation et la courbe rouge est ce qu'on observe.

■ Début de l'activité de recherche de matière noire au LPNHE

La recherche de matière noire est initiée au LPNHE dans 3 directions exploratoires : avec la participation à l'expérience DAMIC, avec l'entrée d'un groupe dans la collaboration XENON et avec la contribution à l'expérience DarkSide.



© Collaboration Xenon / Photothèque IN2P3

Vue de l'intérieur du détecteur Xenon (TPC à Xenon liquide) installé au laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie.

■ Début du Run 2 du LHC

Après deux ans d'interruption pour travaux de maintenance et d'amélioration, l'énergie de collision au redémarrage du LHC est de 13 TeV.

■ GRAND : un nouveau radio télescope en projet en Chine

Un groupe du LPNHE participe à la R&D pour définir et prototyper GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection), un réseau de centaines de milliers d'antennes destiné à détecter des neutrinos d'énergie extrême.

... Les grandes dates de physique de l'observatoire H.E.S.S.

... Les grandes dates de physique de l'observatoire H.E.S.S.

... Les grandes dates de physique de l'observatoire H.E.S.S.

... Les grandes dates de physique de l'observatoire H.E.S.S.

2015

2016

Participation du LPNHE

2013

... Les grandes dates

2020

Prise de données de physique du collisionneur LHC - Run 2

2018

Jouvence du collisionneur

2017

2018

2020

■ Un groupe du LPNHE rejoint la collaboration DESI

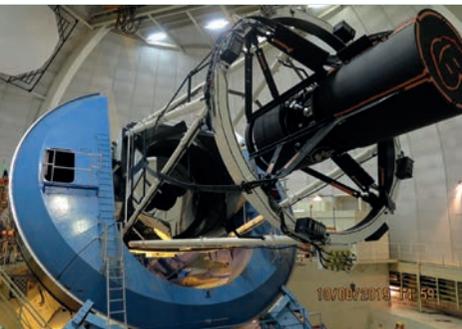
Prolongeant les recherches sur les oscillations acoustiques de baryons menées avec eBOSS, le groupe s'intègre au Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) avec une contribution instrumentale (calibration) et d'analyse sur les forêts Lyman-alpha des quasars.

■ Un groupe du LPNHE rejoint la collaboration COMET au Japon

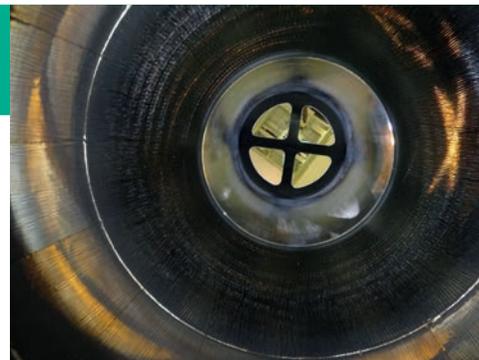
L'expérience COMET va rechercher la transition cohérente de muon en électron assistée par un noyau. Événement extrêmement rare dans le Modèle Standard de la physique des particules, son observation pourrait être le signe d'une physique au delà du Modèle Standard.

■ Construction de la caméra de LSST

La plus grande caméra au monde pour la cosmologie observationnelle des 20 prochaines années est assemblée à Stanford. Le système de changeur de filtre, fourni par les équipes françaises, a été livré en 2020.



Vue du télescope Mayall (Kitt Peak, Arizona) avec les 4 boîtiers de calibration du LPNHE sur l'anneau supérieur, et l'écran d'illumination du laboratoire en arrière-plan.



La chambre à Dérive Centrale (CDC) de l'expérience COMET lors de son installation.



© LSST / Photothèque IN2P3

■ Un groupe du LPNHE rejoint l'activité ZTF

Pour accéder à un échantillon de supernovae proches de très haute luminosité, nécessaire pour préparer les analyses de LSST, ZTF (Zwicky Transient Facility) s'est révélé être le seul survey accessible dans les années qui viennent. De même pour préparer la calibration photométrique de la caméra LSST, le projet StarDICE utilisant une étoile artificielle ultra-stable permettant un étalonnage en flux avec une précision supérieure au millième est initié au laboratoire.

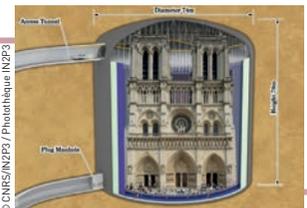
■ Un groupe du LPNHE rejoint l'activité FCC, projet de collisionneur géant au CERN

À la lumière des récentes recommandations de la Stratégie Européenne pour la physique des particules, le projet de futur collisionneur circulaire (FCC) de 100 km de circonférence au CERN est une option très attractive et un groupe du LPNHE a décidé de s'impliquer dans ce projet.

■ Début du projet Hyper-Kamiokande au Japon pour l'étude des neutrinos

Le projet Hyper-Kamiokande sur l'accélérateur J-Parc a été approuvé par le Ministère de la recherche et de l'enseignement japonais (MEXT).

2018 : Observatoire CTA



© CHRES/IN2P3 / Photothèque IN2P3

Construction

Coupe schématisée à l'eau de Hyper-Kamiokande montrant les dimensions et la façade de Nishino

Prise de données de physique de l'expérience Xenon 1T

2018

Construction de l'expérience Xenon 1T

2021

2023

Prise de données de neutrinos de l'accélérateur J-PARC

2023

Prise de données de physique du collisionneur LHC - Run 3

2025

Jouvence du collisionneur

2027

Prise de données de physique du collisionneur LHC - HL - LHC

2026

Construction et mise en route de la prochaine génération d'observatoires : réseaux de télescopes pour les rayons gamma et détecteur souterrain pour les neutrinos

Les nouveaux observatoires comme le réseau de télescope CTA et l'expérience Hyper-Kamiokande sont mis en route, après plusieurs années de construction. Ces nouvelles installations sont le prolongement d'expériences passées que sont H.E.S.S. et T2K. Chaque nouvelle expérience est le fruit d'une longue maturation et d'un travail de préparation et de construction conséquent qui s'appuie sur l'expérience précédente.



Vue d'artiste qui illustre les 3 classes de télescopes de l'expérience CTA prévues pour le site de l'ESO dans l'hémisphère sud à l'Observatoire du Paranal, au Chili.

2028

R&D pour la prochaine génération de détecteurs en physique des particules à installer sur les futurs accélérateurs

Des projets d'accélérateurs de particules pour succéder au LHC se sont dessinés dans les années précédentes et leurs caractéristiques extrêmes notamment en énergie imposent une R&D importante pour la conception des futurs détecteurs qui collecteront leurs données de collisions.



Vue d'artiste d'un accélérateur du futur.

Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire ? D'où viennent les rayons cosmiques de très haute énergie et comment sont-ils accélérés ? Pourquoi l'Univers actuel est dominé par la matière et non par l'antimatière ? Est-ce qu'il y a de nouvelles particules élémentaires et de nouvelles interactions fondamentales au-delà des celles décrites par le Modèle Standard de la Physique des Particules ? Voilà les grandes questions de la physique des deux infinis. Les personnels du LPNHE y travaillent en construisant de nouvelles expériences et observatoires, notamment au CERN, dans les laboratoires souterrains, ainsi que des puissants télescopes, et en analysant toutes ces données avec des moyens informatiques innovants.

2024

Construction de l'observatoire

2025

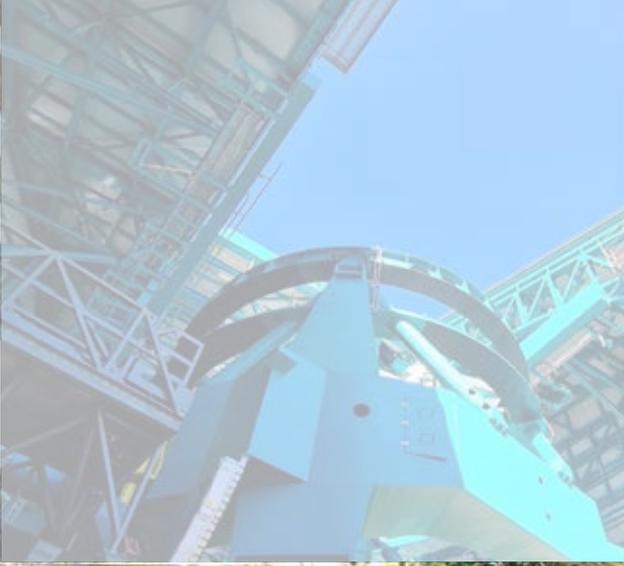
Prise de données de physique de l'observatoire CTA

2023

Prise de données de physique du télescope LSST à l'observatoire Vera C. Rubin

Prise de données de physique de l'expérience Xenon nT

infinis ...



A

ACAV : Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie
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
AP : assistant.e de prévention
APC : Laboratoire Astroparticule et Cosmologie
ARIS : *Argon Response Ionization and Scintillation*
ASIC : *application-specific integrated circuit*, circuit intégré propre à une application
ASR : Administration des Systèmes en Réseaux
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
BGS : *Bright Galaxy Survey*, sondage des galaxies brillantes
BNL : *Brookhaven National Laboratory*, ou laboratoire national de Brookhaven aux États Unis
BSM : *Beyond the Standard Model*, au delà du Modèle Standard (de la physique des particules)

C

CA : Conseil d'Administration
CALICE : *Calorimeter for Linear Collider Experiment*, calorimètre pour une expérience sur un collisionneur linéaire
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CBP : *Collimated Beam Projector, projecteur de faisceau colimé*
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
CDD : Contrat à Durée Déterminée
CEA/Ifu : 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 on décrit le mélange des quarks dans le Modèle Standard via la matrice qui porte désormais leurs noms
CLAP : Capteurs à LA Pointe (pour l'étude de galettes de silicium)
CLHSCT : Commission Locale d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail
CMB : *Cosmic Microwave Background*, fond diffus cosmologique
CME : Contrat de missionnaire d'enseignement
CMOS : *Complementary metal oxide semi-conductor*, semi-conducteur à oxyde métallique complémentaire
CMS : *Compact Muon Solenoid*, un des 2 détecteurs généralistes du LHC
CNES : Centre National d'Études Spatiales
CNU : Conseil National des Universités
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
CPPM : Centre de physique des particules de Marseille
CPU : *Central Processing Unit*, i.e. micro-processeur
CR : Chargé de Recherche
CRP : Conseiller en Radio-Protection
CS : Conseil scientifique
CSI : Conseil scientifique de l'IN2P3
CTA : *Cherenkov Telescope Array*, futur observatoire pour l'astronomie gamma au Chili et aux Îles 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 permettent 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
DES : *Dark Energy Survey*, sondage pour l'énergie noire
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
DM : Dark Matter, matière noire
DR : Directeur de Recherche
DIM : Domaines d'Intérêt Majeur
DRIM : Domaines de Recherche et d'Innovation Majeurs (qui succèdent aux DIM)

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)
EC : Enseignant.e chercheur.se
ED : École Doctorale
EDM : *Electric Dipole Moment*, moment dipolaire électrique
ENS : École Normale Supérieure
ERASMUS : *European Action Scheme for the Mobility of University Students*, programme d'échange d'étudiants et d'enseignants entre les universités, les grandes écoles européennes et des établissements d'enseignement à travers le monde entier
ERC : *European Research Council*, Conseil Européen de la Recherche
ESO : *European Southern Observatory*, organisation européenne pour la recherche astronomique dans l'hémisphère sud
ESPCI Paris : École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris
ETP : Equivalent Temps Plein
EW : *ElectroWeak*, domaine de la physique électro-faible

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
FNAL : *Fermi National Accelerator Laboratory*, laboratoire de l'accélérateur national de Fermi (aux États-Unis)
FRIF : Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales

G

g-2/EDM : expérience en projet au J-PARC au Japon
GDR : Groupement De Recherche
GPU : *Graphics Processing Unit*, 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
GRIF : Grille (de calcul) en Île-de-France

H

H.E.S.S. : *The High Energy Stereoscopic System*, observatoire pour l'astronomie gamma installé en Namibie
HCD : *High Column Density*, grande densité de colonne
HCERES : Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
HDR : Habilitation à diriger des recherches
HEP : *High Energy Physics*, physique des hautes énergies
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
HSC : *Hyper Suprime-Cam*, caméra numérique gigantesque pour le télescope Subaru de 8,2m
HST : *Hubble Space Telescope*, télescope spatial Hubble
HVP : *Hadronic Vacuum Polarization*, polarisation hadronique du vide

I

IA : Intelligence Artificielle
IAP : Institut d'Astrophysique de Paris
IceCube : *South Pole Neutrino Observatory*, observatoire neutrino au Pôle Sud
ICRC : *Internation Cosmic Ray Conference*, conférence internationale sur les rayons cosmiques
IDEX : *Initiative D'EXcellence*, qui est un programme d'investissement de l'État français
IHEP : *Institute of High Energy Physics*, un centre de recherche de la Chinese Academy of Sciences à Beijing (Chine)

ACRONYMES

IJCLab : Irène Joliot Curie Lab, réunion du LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire), de l'IPNO (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay), du CSNSM (Centre de Sciences Nucléaires et de Science de la Matière), du LPT (Laboratoire de Physique Théorique) et de l'IMNC (Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie)

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

IPi : Initiative « Physique des Infinis », programme de recherche et de formation par la recherche dans le domaine de la physique des deux infinis

IRAP : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie à Toulouse

ISCD : Institut des Sciences du Calcul et des Données

IT : au CNRS personnels Ingénieurs et Techniciens

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

IUT : Institut Universitaire de Technologie

J

J-PARC : *Japan Proton Accelerator Research Complex*, complexe japonais d'accélérateurs de protons, à Tokai au Japon

JCJC : Projet de recherche pour les Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs

L

Labex : Laboratoire d'excellence Institut Lagrange de Paris

LBC : *Low Background Chamber*, chambre à bas bruit de fond

LCG : *Worldwide LHC Computing Grid*, grille de calcul mondiale pour le LHC

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

LOC : *Local Organization Committee*, comité local d'organisation (d'une conférence)

LPC : Laboratoire de Physique de Clermont

LPNHE : Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies

LPTHE : Laboratoire de Physique Théorique des Hautes Énergies

LSM : Laboratoire Souterrain de Modane

LST : *Large Survey Telescope*, télescope de sondage de grande dimension

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

MCF : Maître.sse de conférences (à l'université)

MST : *Medium Survey Telescope*, télescope de sondage de moyenne dimension

N

NA61/SHINE : expérience de hadroproduction au CERN

ND280 : *Near Detector*, détecteur proche placé à 280m de la cible et qui mesure le flux de neutrinos dans l'expérience T2K

NIST : *National Institute of Standards and Technology*, Institut des standards américain

NEPAL : Noyaux et Particules au Lycée ; il s'agit de conférence de vulgarisation pour les élèves du secondaires dans le domaine de la physique des particules et de la physique nucléaire

NPAC : Master Noyau Particules Astroparticules et Cosmologie

NTT : *New Technology Telescope*, télescope installé au Chili en 1989, pionnier dans l'ingénierie et la conception des télescopes modernes

O

OHP : Observatoire de Haute Provence

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*, circuit imprimé

PMT : *Photo-Multiplier Tube*, photodétecteur

PUMA : avis de publicité pour les marchés à procédure adaptée

R

R&D : Recherche et Développement

R&T : Recherche et Technologie

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 Cherenkov émise

RSL : Référent Sécurité Laser

RTA : *Real Time Analysis*, analyse en temps réel.

S

SALT : *Southern African Large Telescope*, grand télescope de l'Afrique du Sud

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, SDSS à l'observatoire du mont Apache depuis les années 2000

SDSS-DR : *Sloan Digital Sky Survey-Data Release*, mise à disposition des données de SDSS

SESAME : dispositif francilien de soutien aux projets de recherche nécessitant l'achat de matériel

SFP : Société Française de Physique

SIFAC : Système d'Information Financier Analytique et Comptable

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

SN : SuperNova, Supernovæ

SOC : *Scientific Organization Committee*, comité d'organisation scientifique (d'une conférence)

SPI : *Serial Peripheral Interface*, interface série pour les périphériques très usuelle pour les microcontrôleurs

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 Supernovæ à très grande distance

SST : *Small Survey Telescope*, télescope de sondage de petite dimension

StarDICE : système de calibration photométrique pour LSST

STEP'UP : École Doctorale Sciences de la Terre et de l'Environnement et Physique de l'Univers de Paris

SU : Sorbonne Université

Subaru : télescope japonais installé à Hawaï

T

T2K : le nom de cette expérience de physique des neutrinos 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

TDR : *Technical Design Report*, rapport sur la conception technique

TGIR : Très Grandes Infrastructures de Recherche

TPC : *Time Projection Chamber*, chambre à projection temporelle.

TREND : *TianShan Radio Array for Neutrino Detection*, expérience de détection de neutrinos par un réseau d'antennes radio à TianShan, en Chine

U

UE : Unité d'Enseignement

UFR : Unité de Formation et de Recherche

UP : Université de Paris (suite à la décision du conseil d'état du 29 décembre 2021, annulant la dénomination Université de Paris, toutes les mentions Université de Paris de ce rapport d'activité se réfèrent à la nouvelle dénomination Université Paris Cité – Décret N°2022-327 du 4 mars 2022)

UPC : Université Paris Cité

V

VERITAS : *Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System*, observatoire d'astronomie gamma installé aux États-Unis

VHDL : *VHSIC Hardware Description Language*

VHSIC : *Very High Speed Integrated Circuit Program*, circuit intégré ultra-rapide

VIRGO : détecteur d'ondes gravitationnelles européen, installé en Italie

VSL : Violation de la Symétrie de Lorentz

W

WEAVE : Instrument spectroscopique multi-objet installé sur le télescope William Herschel de 4.2m aux îles Canaries

WG : *Working Group*, groupe de travail

WIMP : *Weakly Interactive Massive Particle*, particule massive interagissant faiblement

X

XENON : *XENON Dark Matter Search Experiment*, expérience de recherche de matière noire à base de xénon liquide, installée au Gran Sasso

Z

ZTF : *Zwicky Transient Facility*, relevé astronomique du ciel à grand champ

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 Betoule, Jean-Philippe Lenain,
Olivier Dadoun, Romain Gaior, Francesco Polci,
Mélissa Ridel, Marco Zito

Remerciements à

Jacques Dumarchez, Vera de Sá-Varanda

Conception graphique

Jean-Jacques Daigremont

Crédits photos

Collaboration XENON ; CERN ; NOIRLab, Rubin Obs/SLAC ;
Archive Cie Française d'Entreprises Métalliques, CC-IN2P3 et
Sorbonne Université (collection UPMC/ formation supérieure :
900 ans d'histoire) ; collaborations ATLAS, CALICE, CTA,
DAMIC, DESI, GRAND, H.E.S.S., LHCb, LSST, StarDICE, T2K,
TREND, XENON ; Tristan Beau, Isabelle Cossin, Frédéric Derue,
Vera de Sá-Varanda, Sune Jakobsen, Pierre Kitmacher,
Didier Laporte, Laurence Marquet, Valentina Raskina,
Mélissa Ridel, Simon Rubet, Patrick Sizun, Marco Zito ;
photothèque des laboratoires de l'IN2P3 dont LPNHE
(Vera de Sá-Varanda)

Publié par

Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies.

Ce document est consultable sur le site du laboratoire :

<https://lpnhe.in2p3.fr>

Impression

COPYMÉDIA

Parc activité du Courneau

33610 Canejan

1^{er} trimestre 2022

2020•2021

RAPPORT D'ACTIVITÉ

LPNHE

PARIS

Laboratoire de
Physique Nucléaire et
de Hautes Énergies

4, place Jussieu • 75005 Paris

Tél. : 33 (1) 44 27 63 13

<https://lpnhe.in2p3.fr>

<https://twitter.com/LPNHEIN2P3CNRS1>

50
ans

