

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022
2023

LPNHE
PARIS

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022
2023


LPNHE
PARIS

En 2022-2023, le LPNHE a poursuivi avec enthousiasme ses recherches fondées sur les grandes interrogations fondamentales de la physique des deux infinis : quels sont les constituants ultimes de la matière ? De quoi est fait l'Univers et quelles sont son histoire et son évolution depuis le Big Bang ? Bien d'autres questions sont liées à celles-ci, comme la nature du boson de Higgs découvert au CERN avec une forte participation des équipes du laboratoire, la compréhension de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers, les propriétés des neutrinos... Récemment, le laboratoire a développé de nouveaux domaines de recherche, qui portent sur la matière noire et l'énergie noire. Ces recherches s'appuient sur des instruments de pointe, développés au laboratoire grâce à nos compétences dans la photométrie, les capteurs silicium, la mécatronique et bien d'autres. Bénéficiant d'une solide ferme de calcul, nos équipes sont spécialisées dans l'analyse des big data, ces grandes bases de données qu'elles passent au crible fin à l'aide des technologies les plus avancées de l'intelligence artificielle et notamment du deep learning.

L'année 2022 a été marquée par la biennale du laboratoire, une retraite de quatre jours hors les murs afin de discuter du bilan et encore plus des perspectives. Cette édition a été un vrai succès, tant par le nombre de participants que par la qualité de la participation de chacun. Nous avons toutes et tous envie de se retrouver après les années difficiles de la COVID19 ! Deux sessions poster ont permis à chacun de s'emparer de toute la diversité des sujets de recherche et de développement technique menés au laboratoire. Deux tables rondes, l'une sur la R&D et l'autre sur les projets futurs, ont été l'occasion de débattre de l'avenir du laboratoire, discussion qu'on va poursuivre en 2024.

L'année 2023 a été celle des multiples évaluations du laboratoire, notamment par la section 01 du CoNRS (le « tourniquet ») et par le HCERES. Celle-ci a fait l'objet des travaux d'un comité qui a élaboré puis rédigé un document d'auto-évaluation, ainsi qu'une plaquette, le « portfolio », qui a reçu les appréciations très positives de nos tutelles. La visite du tourniquet a eu lieu en septembre 2023 et a été un véritable galop d'essai pour la visite HCERES de décembre 2023. Au cours de celle-ci, le laboratoire a montré tous ses succès techniques et scientifiques, y compris lors de la visite des locaux ainsi que de deux sessions posters. Le LPNHE est fier de ses réalisations pendant la période en question (2017-2022) et se tourne avec beaucoup de confiance vers les défis de la prochaine période. Cette phase d'introspection et d'auto-évaluation sera certainement précieuse pour nourrir la réflexion sur les axes de développement du laboratoire dans les prochaines années, notamment à approfondir lors de la biennale 2024.

Parmi les faits marquants de 2023, le laboratoire peut s'enorgueillir aussi de deux prix de physique, le Prix Joliot-Curie de la SFP pour Matthew Charles, le Prix Jaffé de l'Institut de France pour Bogdan Malaescu. Le premier vient récompenser une carrière consacrée à l'étude du quark charmé, qui l'a conduit entre autre à être nommé « coordonnateur des analyses » de l'expérience LHCb. Matthew est un des rares enseignants-chercheurs lauréat de ce prix. Bogdan voit primé ses études liées à la QCD, débutées avec sa thèse de doctorat, qui ont permis de mesurer avec grande précision certains effets quantiques qui jouent un rôle important dans la mesure du moment magnétique anomal du muon ($g-2$). Cette mesure de précision montre une déviation significative entre la théorie et l'expérience, qui pourrait indiquer l'existence de secteurs encore inconnus de la physique des particules.

Un autre développement récent est la création d'une commission Développement Durable qui a établi deux bilans carbone, relatifs à 2019 et 2022, et a lancé une réflexion et des recommandations afin de nous engager dans une trajectoire vertueuse. Sur le front « science et société », le laboratoire a poursuivi une activité art-science qui a permis de faire connaître dans le milieu artistique et du grand public nos techniques de détection et en particulier la chambre à brouillard. Une déclaration d'invention a été déposée en 2023 pour une visière transparente, qui pourra être utilisée dans de nombreux domaines : médical, protection individuel dans des secteurs industriels, et autres.

Le laboratoire compte environ 50 chercheur.es et enseignant.es-chercheur.es, et une quarantaine de doctorant.es, post-doctorant.es, chercheur.es 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 en fait 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 en particulier avec l'IAP et l'Observatoire de Paris (SYRTE).

Une réalisation marquante de ces deux dernières années est la préparation et le démarrage du relevé de Star-DICE. Il s'agit du projet ambitieux d'une calibration photométrique au pour mille d'objets célestes, des naines blanches qui servent aujourd'hui de référence dans le domaine. Pour ce faire, une chaîne d'étalonnage a été mise en œuvre afin d'arrimer ces mesures photométriques aux standards de laboratoire les plus précis, en l'occurrence le watt électrique défini par le NIST. Le dispositif est complété par une « étoile artificielle » composée de LED et par un télescope robotisé installé à l'Observatoire OHP près de Manosque. Les observations ont démarré en 2023 et les premiers résultats sont attendus en 2024/2025. Un équipement de calibration, le Collimated Beam Projector, qui servira aussi pour la calibration de LSST, est financé par un contrat ANR.

Quant à LSST, destiné à effectuer un relevé du ciel profond qui pourrait révolutionner notre connaissance de l'Univers, il sera installé au Chili en 2024, et les équipes, qui ont conçu et réalisé l'électronique de la plus grande caméra CCD jamais réalisée (3,2 milliards de pixels) ainsi que le changeur de filtres du télescope, sont à pied d'œuvre pour la mise en service de ce grand instrument.

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, avec des premiers résultats attendus en avril 2024. 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. En conjuguant les observations de ZTF et celles de HSC (un télescope de 8 m à Hawaï), le but est de produire un diagramme de Hubble pre-LSST de grande précision, capable de contraindre le modèle Λ CDM. 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 est très actif dans l'étude des rayons cosmiques, ces particules, à l'origine encore largement inconnue, qui bombardent l'atmosphère terrestre et atteignent des énergies hors de portée pour nos accélérateurs. Après une série d'importantes découvertes astrophysiques (notamment la découverte de l'émission de photons de très haute énergie par les sursauts gamma) avec H.E.S.S., un télescope pour l'astronomie gamma situé en Namibie, une grande collaboration internationale s'attelle à la construction de CTA, qui prendra la relève à partir de 2024, 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 : l'équipe bénéficie d'un nouveau chargé de recherche CNRS recruté en 2023. 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 particule de matière noire de faible masse. Le détecteur sera basé au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM). Après avoir déployé un premier détecteur appelé Low Background Chamber (chambre à bas bruit de fond) au LSM, l'équipe s'apprête à mettre en service le détecteur complet. 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 le système cryogénique XeLab situé dans nos locaux, qui se met en service en 2024. 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. Le recrutement d'un.e maître de conférences de SU renforcera cet axe de recherche.

L'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers est une énigme qu'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. Pour ce faire, elle est confrontée au défi de sélectionner quelques particules intéressantes au milieu d'un grand nombre d'autres interactions. L'équipe a finalisé une première jouvence du détecteur qui permettra d'en améliorer les performances. L'équipe a notamment conçu et réalisé le système 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. Il faut signaler l'étroite collaboration avec le LIP6 pour ce projet. La forte augmentation du taux et du volume des données 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 afin de mettre des contraintes fortes sur les paramètres d'oscillation, notamment la phase delta de violation de la symétrie Charge-Parité. L'équipe a finalisé une jouvence majeure du détecteur proche : des détecteurs innovants et très performants ont été déployés au Japon en 2023 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. Le laboratoire est chef de file pour la contribution française à la construction de ce détecteur. L'équipe a en effet conçu et est en train de réaliser le système de synchronisation d'horloge, qui sera 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 des supernovas, et permettra d'étendre considérablement les activités de l'équipe.

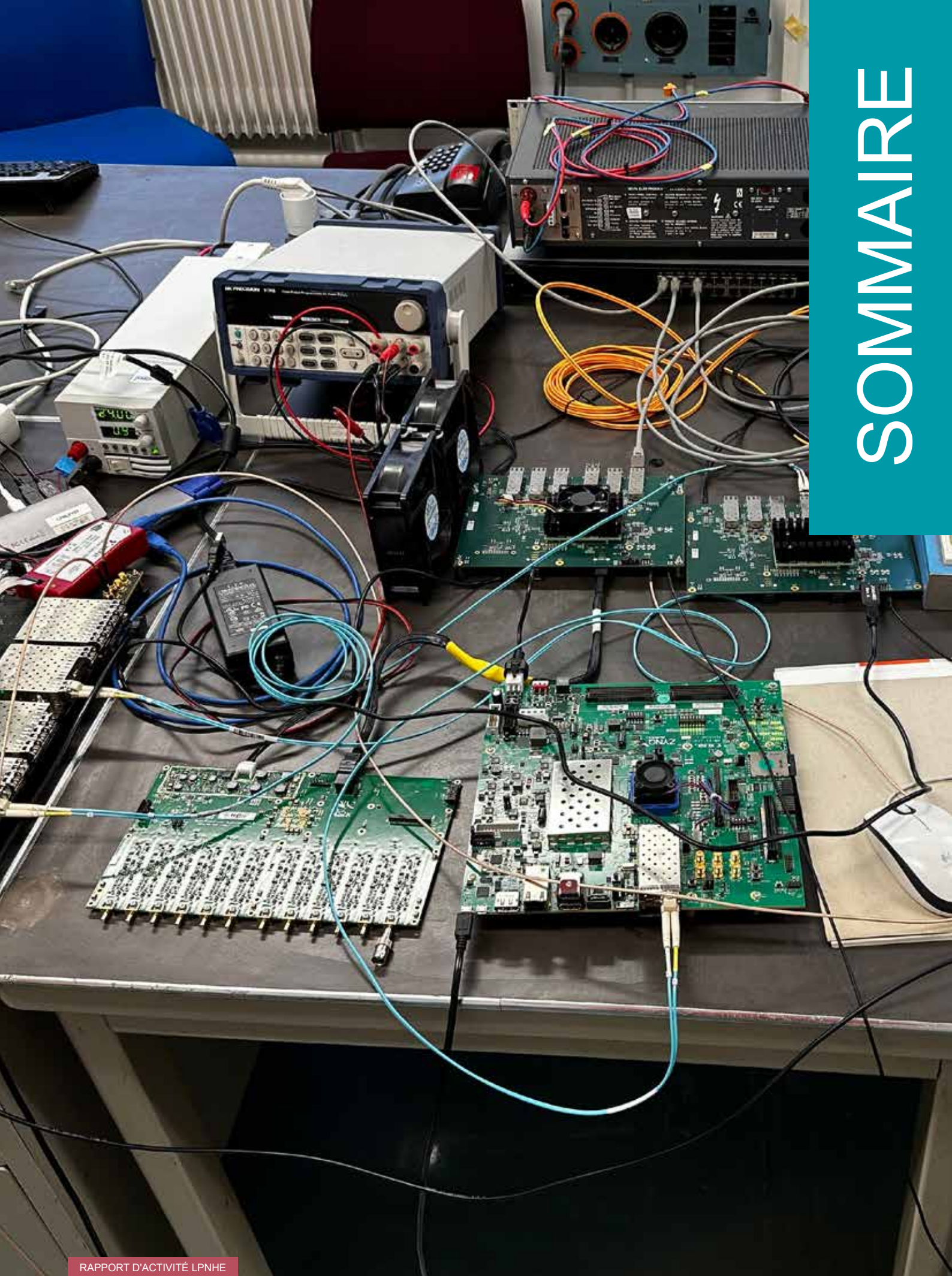
L'expérience ATLAS, au LHC du CERN, est à l'avant-garde de l'exploration de la frontière de la haute énergie. Grâce à la découverte du boson de Higgs, le tableau du Modèle Standard est désormais complet, mais de nombreuses interrogations demeurent. Est-ce que le boson de Higgs est une particule élémentaire 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, 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 techniques d'avant-garde. Un deuxième projet, HGTD, vise à l'amélioration des performances du trajectographe, 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 avec des études sur le potentiel de physique du futur collisionneur du CERN « Future Circular Collider » (FCC) 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 Île-de-France par un contrat Sésame nous sommes équipés d'une nouvelle machine de test sous pointes pour la filière des détecteurs semi-conducteurs au sein de la nouvelle plateforme de SU appelé CLAP, aux autres laboratoires du périmètre. Nos salles serveurs font partie d'une deuxième nouvelle plateforme de SU, la Plateforme de Calcul et Stockage, où nous hébergeons les serveurs de plusieurs laboratoires du site.

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 Tristan Beau 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.



AVANT-PROPOS	3
---------------------------	---

FAITS MARQUANTS	8
------------------------------	---

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	10
--	----

Masses et interactions fondamentales ..	12
Asymétrie Matière/Anti-matière	32
Rayons Cosmiques et Matière Noire	46
Cosmologie et Énergie noire	62

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET RESPONSABILITÉS	74
--	----

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	85
Les stages au laboratoire	87
Stagiaires accueilli.es au laboratoire (hors élèves du secondaire) sur la période 2022-2023	89

ORGANISATION DU LABORATOIRE	90
--	----

Services techniques	92
Plateaux techniques et plateformes	95
Support à la recherche	100
Organigramme	109
Personnels au 31 décembre 2023	110
Instances du laboratoire	111
Chargé.es de mission	111

VIE DU LABORATOIRE	112
---------------------------------	-----

2022 : une biennale réussie !	114
Partenariats scientifiques	114
Les vendredi du LPNHE	116
Développement durable et enjeux environnementaux	117
Chargée de mission égalité discrimination	119
Les séminaires	120
Le journal club	121
Valorisation de la recherche	122
Science ouverte	123
Le projet ADOCO (Analyser les DONnées du COvid), partie intégrante de l'outil Pycoa	124
La formation permanente	125
Ikigai : gamification des formations, médiation scientifique et culturelle	126
Revalorisation du patrimoine	127

INDEX DES ACRONYMES	129
----------------------------------	-----

2022

JANVIER



- Étalonnage des équipements GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) grâce à une collaboration étroite avec le laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris et l'équipe T2K du laboratoire, pour préparer le système de base de temps de HyperKamiokande.
- Le pipeline de simulation et de reconstruction pour l'étude de la variabilité des noyaux actifs de galaxies est lancé, il est officiellement utilisé dans le consortium CTA.

FÉVRIER



- Finalisation de l'installation de la LBC (low background chamber) à Modane dans le cadre du projet DAMIC-M : bientôt la prise de données.

MARS

- Publication du White Paper XLZD sur la prochaine génération de détecteurs à projection temporelle au xénon liquide.
- Première observation d'une accélération record de particules cosmiques dans une nova avec H.E.S.S.
- Première réunion annuelle projet AIDA-Innova (Advance and Innovation for Detectors at Accelerators), projet européen financé par l'ERC.

MAI



- 6 mai 2022, le rapport d'activité 2020-2021 des 50 ans du LPNHE est imprimé et les exemplaires sont arrivés au laboratoire.
- Du 9 au 13 mai 2022 : la "ZTF collaboration week" se tient au laboratoire.



- Du 17 au 20 mai 2022 : biennale du laboratoire à Saint-Brevin-les-Pins, avec 85 participantes et participants.

JUIN

- Du 13 au 17 juin 2022, organisation du meeting de la collaboration H.E.S.S. au laboratoire.

JUILLET



- Le 4 juillet 2022, célébration des 10 ans de la découverte du boson de Higgs.
- Premières prises de données DAMIC-M pour la recherche de la matière noire.



- Installation du nouveau *firmware* complet pour l'électronique de lecture du nouveau trajectographe SciFi de LHCb avant redémarrage du LHC.

AOÛT

- Amélioration de la mesure de la double capture électronique du ^{124}Xe avec Xenon1T.

SEPTEMBRE

- Pour DESI, fin de la prise de données de l'échantillon 1 an qui a commencé en mai 2021. Les résultats cosmologiques seront publiés courant 2024.



- Meilleures limites mondiales pour la recherche de WIMP de basse masse avec l'expérience DarkSide-50.



- Du 5 au 9 septembre 2022, l'école de GIF sur la physique des neutrinos se tient au laboratoire.

FAITS



- Les 13 et 14 septembre 2022, la conférence internationale Higgs Hunting se tient au laboratoire.

OCTOBRE

- Première prise de données avec le nouveau système de déclenchement basé sur des GPU (projet Allen) pour l'expérience LHCb.



- Du 13 au 16 octobre, fête de la science.
- Du 14 au 16 octobre, dernière mission technique sur le site du réseau de télescopes gamma H.E.S.S. en Namibie.

NOVEMBRE

- Déploiement d'un réseau de 4 antennes GRAND@Nancay dans le cadre du projet NUTRIG, pour l'étude d'un déclenchement autonome d'antennes radio pour des événements de gerbes de particules cosmiques.



- Premier bilan, pour l'année 2019, d'émission des gaz à effets de serre (BEGES) du LPNHE, présenté au conseil du laboratoire, qui servira de base pour des actions visant à réduire l'impact carbone de nos activités.
- Le 28 novembre 2022, Conseil Scientifique du LPNHE consacré à la matière noire.
- Du 28 au 30 novembre 2022, réunion de la collaboration LSST France au laboratoire.

2023

JANVIER



- Première lumière de l'instrument optique de StarDICE qui cherche à mesurer le flux lumineux de quelques dizaines d'étoiles standard avec une précision 5 à 10 fois meilleure que celle atteinte jusqu'à présent.

MARQUANTS

- Labélisation de PCS (la Plateforme Calcul et Stockage) du LPNHE par Sorbonne Université.

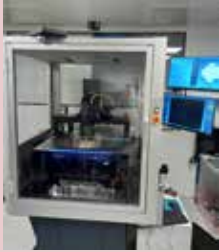
- LHCb présente les mesures simultanées des rapports RK et RK* permettant de tester l'universalité leptonique.

- Publication du livre "Étonnants infinis", qui compte Vladimir Gligorov, Reynald Pain et Marco Zito parmi les auteurs.

FÉVRIER

- Début de la Phase-α de l'expérience COMET au Japon.

- Arrivée au laboratoire des premiers modules pour le futur détecteur en temps HGTD qui s'insérera dans ATLAS auprès du LHC.



- Mise en service de la plateforme silicium CLAP (Sésame IdF).

- Premiers résultats de l'expérience DAMIC-M avec le prototype LBC.

MARS



- Déploiement des 13 premières antennes de détection de GRANDProto300 dans le désert de XiaoDushan, Dunhuang, Chine.

- 17 mars, journée de perspectives techniques du laboratoire.

AVRIL

- Premières collisions à 13,6 TeV avec champ magnétique actif dans ATLAS pour 2023.

MAI



- Soumission du document d'auto-évaluation de l'unité pour la période 2017-2022 à l'HCERES.

JUIN



DARK ENERGY SPECTROSCOPIC INSTRUMENT

- Publication des premières données de DESI, « Early Data Release » prises pendant la période de validation du relevé.

- Fin de la période de "commissioning" et début du pré-relevé pour l'instrument StarDice.

- Migration des données de conception assistée par ordinateur (CAO) mécanique de CATIA V5 / Smarteam vers CATIA V6 / 3DEXperience, ce qui représente une évolution logicielle majeure.

- Du 12 au 14 juin : réunion du consortium CTA/NectarCAM au laboratoire

- 28 juin, journée consacrée à la discussion du programme de R&D européen sur les futurs détecteurs en physique des particules (DRD).

JUILLET

- Première campagne de mesure de réception GNSS à Kamioka et J-PARC pour HyperKamiokande.



- Assemblage au laboratoire de la première unité de détection de HGTD pour le démonstrateur, et livraison au CERN.

- Premier changement avec des vrais filtres dans la camera LSST, mettant en œuvre le carousel réalisé au laboratoire.



- Le 13 juillet, l'ordinateur historique Chadac du LPNHE arrive définitivement au centre de calcul de l'IN2P3 pour rejoindre le musée de l'informatique.

AOUT

- Déploiement de GRAND@Auger, réseau de 10 antennes de détection des gerbes atmosphériques sur le site de l'Observatoire Pierre Auger en Argentine.



- Installation des nouveaux détecteurs de ND280 (détecteur proche de T2K) au Japon.

SEPTEMBRE

- ATLAS, toute première mesure de VH, H→bb et V→qq dans le régime boosté à grand moment transversal.

- Arrivée des 100 premiers wafers silicium de production de la puce ITk, ce qui marque le début de la production pour le futur détecteur de vertex de ATLAS.

- Du 11 au 13 septembre : nouvelle édition de la conférence internationale Higgs Hunting

- Du 18 au 20 septembre, le "tournoi" de la section 01 du CNRS visite le laboratoire.

- Du 25 au 29 septembre, le LPNHE héberge la réunion de collaboration XENON.

OCTOBRE

- Première analyse combinée entre T2K et Super-Kamiokande.

- Première mise sous vide du dispositif mReStoX de XeLab, qui continue son installation au laboratoire pour tester de nouvelles électrodes pour des détecteurs à base de Xenon.

- Publication du FCC Feasibility study Mid-term Report pour un futur collisionneur au CERN



- Bogdan Malaescu reçoit Le Prix Jaffé/Fondation 2023 de l'Institut de France.

- Du 12 au 15 octobre, fête de la science.



- 20 octobre, prêt de la chambre à brouillard pour l'exposition "Chambre à brouillard" qui se tient à l'Ahah - Paris 11^{ème} - jusqu'en décembre.

NOVEMBRE

- 23 novembre, Conseil Scientifique consacrée à la cosmologie.

- Du 22 au 24 novembre, l'école d'été consacrée aux détecteurs silicium SIMDET 2023 se tient au LPNHE.

DÉCEMBRE

- Publication de la data release ZTF DR2, le plus grand lot homogène de supernovas proches de qualité cosmologique.



- Matthew Charles est lauréat du prix Joliot-Curie 2023.

- Les 4 et 5 décembre, visite du comité HCERES d'évaluation de l'unité.

- Du 11 au 15 décembre, tenue au laboratoire de la 3^{ème} Network School de LA-CoNGA physics (alliance latino-américaine et européenne en physique avancée).



ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Masses et Interactions Fondamentales

- **La beauté du boson de Higgs**
- **Traquer la matière noire et de nouvelles résonances**
 - Diversifier la recherche de sources possibles de matière noire
 - Rechercher des paires de photons boostées
- **Physique du quark top dans l'expérience ATLAS**
- **Études de physique, performance de calibration et étiquetage des jets**
 - Calibration en énergie des jets
 - Étiquetage des jets
- **ATLAS ITk : développement de la technologie et construction d'un trajectographe de nouvelle conception**
 - Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk
 - Solutions R&T innovantes : films conducteurs pour les interconnexions et microcanaux pour le refroidissement
 - Puces de Front-End pour l'ITk
- **Un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision : HGTD**
 - Conception et Design
 - Assemblage et tests
 - Etudes des performances
- **FCC - Groupe d'étude sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs**
 - Contexte
 - Études de physique
 - Développements détecteurs
- **Le moment magnétique anomal du muon**
 - Prédications du $(g-2)$ du muon par des approches dispersives
 - L'approche (E)BHLS2
 - L'expérience muon $g-2/EDM$ à J-PARC
- **Activités de « machine learning » pour la simulation et l'analyse**
 - Génération d'événements et simulations de détecteurs
 - Calibration des données
 - Analyse des données

Asymétrie Matière/Anti-matière

- **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)
 - Le projet d'analyse en temps réel (RTA)
- **Préparer le futur de la physique des neutrinos : de T2K à Hyper-Kamiokande**
 - T2K-II : Installation de la mise à jour de ND280
 - Produire et distribuer l'étiquetage en temps Hyper-Kamiokande
- **Expérience COMET à J-PARC**

Rayons Cosmiques et Matière Noire

- **L'observatoire gamma de très hautes énergies Cherenkov Telescope Array (CTA) en construction**
 - Prospectives sur la variabilité des noyaux actifs de galaxie avec CTA
 - Effets temporels intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxie et violation de l'invariance de Lorentz
 - Production et développement pour les cartes *Front End Board* pour NectarCAM
 - Calibration de la caméra NectarCAM
- **Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec l'expérience H.E.S.S.**
 - Études astrophysiques des noyaux actifs de galaxies
 - Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux AGN
 - Un dernier tour de vis – la fin des activités techniques sur le projet H.E.S.S.
- **Premier résultats de DAMIC-M sur la recherche de matière noire**
 - Technique
 - Science
- **Les premières données GRAND**
 - Les prototypes GRAND
 - R&D GRAND10k
- **Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENON**
 - Calcul et traitement des données
 - Analyse
 - Simulation
 - Futurs projets et l'R&T avec XeLab

Cosmologie et Énergie Noire

- **Cartographier les grandes structures de l'univers avec DESI pour contraindre l'énergie noire et la gravité**
 - Mesure du taux d'expansion de l'univers avec les forêts Lyman-alpha des quasars
 - Contraindre l'énergie noire et la gravité avec le clustering des galaxies de DESI
- **Préparation des futurs grands relevés de l'énergie noire**
 - Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP
 - Mesure du cisaillement gravitationnel
 - Réalisations techniques
- **Diagramme de Hubble des supernovas de type Ia avec Subaru, Hubble et ZTF**
 - Subaru/HSC
 - ZTF
 - Cosmologie avec les SN Ia de Subaru/HSC et ZTF : le projet LEMAITRE
 - Vers LSST
- **Théorie de la formation des structures cosmologiques**

Masses et Interactions Fondamentales

- **La beauté du boson de Higgs**
- **Traquer la matière noire et de nouvelles résonances**
 - Diversifier la recherche de sources possibles de matière noire
 - Rechercher des paires de photons boostées
- **Physique du quark top dans l'expérience ATLAS**
- **Études de physique, performance de calibration et étiquetage des jets**
 - Calibration en énergie des jets
 - Étiquetage des jets
- **ATLAS ITk : développement de la technologie et construction d'un trajectographe de nouvelle conception**
 - Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk
 - Solutions R&T innovantes : films conducteurs pour les interconnexions et microcanaux pour le refroidissement
 - Puces de Front-End pour l'ITk
- **Un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision : HGTD**
 - Conception et Design
 - Assemblage et tests
 - Études des performances
- **FCC - Groupe d'étude sur la physique et les détecteurs auprès des futurs collisionneurs**
 - Contexte
 - Études de physique
 - Développements détecteurs
- **Le moment magnétique anomal du muon**
 - Prédications du $(g-2)$ du muon par des approches dispersives
 - L'approche (E)BHLS2
 - L'expérience muon $g-2$ /EDM à J-PARC
- **Activités de « machine learning » pour la simulation et l'analyse**
 - Génération d'événements et simulations de détecteurs
 - Calibration des données
 - Analyse des données



Masses et Interactions Fondamentales

Le Modèle Standard des interactions fondamentales et de la matière est la description de référence pour l'ensemble des phénomènes physiques 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 Modèle Standard : 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 Modèle Standard contient également le champ de Higgs. Celui-ci est à l'origine 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 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. Il existe maintenant des mesures directes de la quasi-totalité des paramètres du Modèle Standard liés au secteur électrofaible, avec une exception significative : l'auto-couplage du champ de Higgs. Des premières contraintes sur celui-ci commencent à apparaître, mais la mesure de précision relèvera de la phase Haute Luminosité du LHC, HL-LHC, et au-delà. De plus, le Modèle Standard laisse sans réponse des questions fondamentales, comme par exemple la hiérarchie des couplages de Yukawa ou l'origine de la brisure de symétrie électrofaible. Par ailleurs, le Modèle Standard n'explique pas pourquoi la gravitation est beaucoup plus faible que les trois autres interactions ; il n'apporte pas d'explication sur la nature de la matière noire ou de l'énergie noire ; enfin, les prédictions concernant l'asymétrie matière-antimatière à l'échelle subatomique ne permettent pas de comprendre l'absence d'antimatière observée à très grande échelle.

L'équipe Masse et Interaction Fondamentales mène ses activités dans ce contexte général et sur plusieurs fronts : étude des propriétés du Higgs ; mesures de précision des paramètres électrofaibles du Modèle Standard ; recherche de signaux expérimentaux ; recherche directe de nouvelles particules.

En outre, les études des performances du détecteur ATLAS, l'amélioration et l'élaboration d'algorithmes de reconstruction et de sélection des événements sont des activités essentielles de l'équipe pour renforcer la qualité des mesures expérimentales. Elles sont fondamentales pour mener à bien le programme de recherche présenté dans ce rapport : identification, étalonnage et isolation des photons, estimation du taux de faux leptons, étalonnage des jets, identification de jets provenant de quarks b ou de bosons électrofaibles, reconstruction de jets, compréhension de l'énergie manquante dans le détecteur.

Au cours de la période couverte par ce rapport, les activités d'analyse de physique ont porté sur l'ensemble des données enregistrées au LHC pendant le Run 2 ainsi qu'à l'exploitation de celles du Run 3 qui a démarré à l'été 2022.

L'équipe a notamment étudié le canal de désintégration du boson de Higgs en paires de quarks b avec un rapport d'embranchement important (58%), mais un niveau de bruit de fond élevé au LHC. La principale méthode pour améliorer le rapport signal sur bruit est de rechercher les événements VH où le boson de Higgs est produit en association avec un boson V (V=W ou Z) se désintégrant en leptons. L'équipe a entamé aussi une recherche de la production conjointe de deux bosons de Higgs pour accéder au paramètre d'autocouplage du champ de Higgs.

Les études de précision du Modèle Standard sont effectuées à travers des mesures de sections efficaces inclusives de jets pour tester les prédictions de celui-ci, et l'obtention de contraintes sur les fonctions de distribution des partons dans le proton. Celle-ci a été complétée par une étude détaillée de l'impact des incertitudes sur les corrélations expérimentales et théoriques. Le groupe a aussi poursuivi sa participation à l'amélioration de la calibration des jets.

L'exploration du secteur du quark top s'est poursuivi, en particulier la mesure de sa masse, en utilisant des jets de quark b contenant des états liés avec charme (J/ψ ou mésons D). Les données du Run 2 ont été analysées et les études se poursuivent pour diminuer les erreurs systématiques.

Le programme de recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard a avancé sur plusieurs axes complémentaires, avec la recherche de nouvelles particules et l'étude d'un possible couplage du champ de Higgs à des processus de production de matière noire.

Ces dernières années, le « Machine Learning » est devenu un atout essentiel pour l'analyse des données, améliorant non seulement l'efficacité des techniques existantes, mais ouvrant de nouvelles perspectives dans le traitement des données. En commençant par des discriminateurs de signaux par rapport au bruit de fond, les réseaux neuronaux sont devenus une composante centrale à tous les stades de l'expérience. L'équipe est donc impliquée dans le développement de nouvelles méthodes de Machine Learning à différents niveaux, de l'étalonnage des données, à l'analyse, en passant par les simulations de détecteurs et la génération d'événements.

En plus des activités déjà évoquées, le groupe participe 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.

Finalement, la préparation du futur de la discipline auprès du LHC et au-delà fait également partie des travaux menés par l'équipe. En premier lieu, la jouvence du détecteur ATLAS en vue de la phase de Haute Luminosité du LHC est une activité majeure de l'équipe. Elle contribue à la conception et à la réalisation de deux nouveaux sous-détecteurs, l'Inner Tracker (ITk) et le High Granularity Timing Detector (HGTD).

L'activité principale au laboratoire pour ITk est centrée sur le développement des capteurs à pixels en silicium et la construction des modules qui feront partie du nouveau détecteur. La construction en France des modules de l'ITk se fait dans le cadre d'un regroupement parisien avec le LPNHE, l'IJCLab et le CEA/Irfu. L'infrastructure du laboratoire a été renforcée en vue de cette construction. Une machine à bonder a été installée dans la salle blanche d'ATLAS ainsi que d'autres instruments, comme un microscope pour la métrologie à haute résolution ou CLAP.

Le futur détecteur HGTD complétera les performances d'ITk pour les jets à grande impulsion transverse et permettra d'affiner les associations de traces de particules chargées aux vertex primaires. L'équipe est fortement impliquée dans ce projet approuvé par la collaboration en 2020, en particulier dans les tests en faisceau (à DESY et au CERN) de prototypes, les études de simulations et de performances de la reconstruction des traces. C'est au niveau mécanique qu'une partie importante des forces du groupe HGTD du laboratoire se situe : structure et design des unités de détection composées de modules, choix des matériaux et collages et montage des premiers démonstrateurs.

De plus, l'équipe s'intéresse aux possibilités post-HL-LHC pour la suite de la discipline en participant aux discussions en lien avec le futur collisionneur FCC, en étudiant les types de détecteurs possibles et les cas de physiques envisageables.

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, le Futur Circular Collider (FCC), un projet proposant de repousser la frontière en énergie à des collisions de l'ordre de 100 TeV contre 14 TeV actuellement. Une première étape possible serait une machine e^+e^- , usine à Higgs et pour la physique électrofaible. 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, dans la phase e^+e^- .

Enfin, des activités hors ATLAS sont effectuées par des membres du groupe, notamment des études pour déterminer la contribution hadronique au moment magnétique anomal du muon ($g-2$) comme membre de l'équipe "DHMZ" qui joue un rôle de leader dans la combinaison des spectres hadroniques mesurés par différentes expériences, pour la prédiction théorique du ($g-2$) du muon.

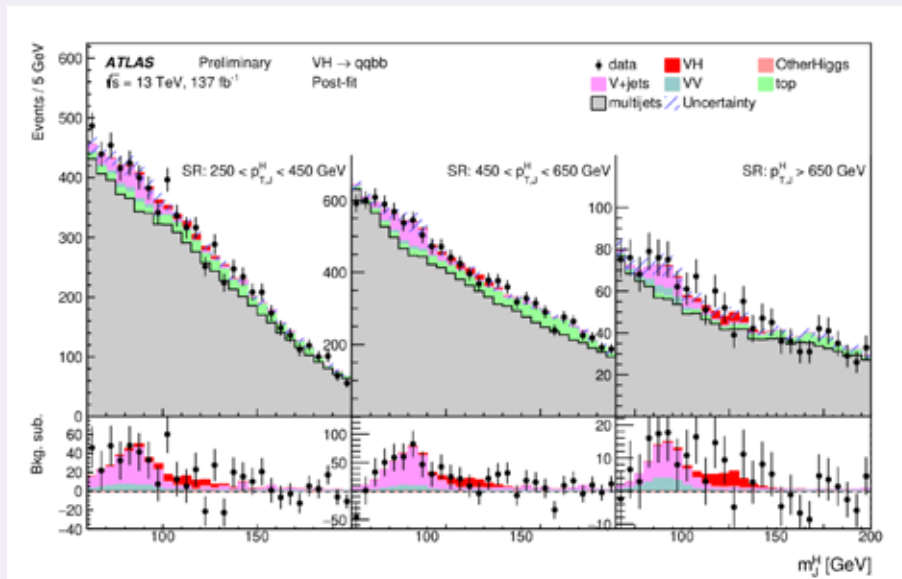
La beauté du boson de Higgs

La découverte d'un boson scalaire compatible avec le boson de Higgs (H) prévu par le Modèle Standard (MS) des particules est un succès expérimental majeur du modèle. L'étude des propriétés du boson de Higgs est une étape nécessaire pour comprendre la brisure de la symétrie électrofaible et vérifier si le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (BEH) est effectivement réalisé dans la nature. L'équipe a apporté des contributions essentielles aux analyses de la découverte du boson de Higgs et à l'exploitation des données de précision apportées par le Run 2 du LHC afin de réaliser des mesures de précision des propriétés du boson de Higgs pour différents modes de désintégration et de production.

Grâce à l'expérience du groupe en matière de performance des jets, d'étalonnage et d'identification des jets provenant des quarks b et des jets provenant de bosons se désintégrant de manière hadronique à haut moment transverse, p_T (appelés boosted boson jets), nous sommes très bien placés pour exploiter nos compétences afin d'étudier des topologies comme la désintégration du boson de Higgs en quarks. En particulier, la désintégration du boson de Higgs en bb , avec un rapport d'embranchement de 58 %, est le canal sur lequel nous nous sommes concentrés.

En 2022 et 2023, l'équipe a étendu l'analyse de la mesure de $H \rightarrow bb$, où le boson de Higgs est produit en association avec un boson vecteur (W ou Z). Dans le passé, l'équipe a travaillé sur la version de l'analyse où le W ou Z se désintègre en leptons et $H \rightarrow bb$, ce qui a permis d'observer ce canal de désintégration pour la première fois. Plus récemment, nous avons étudié pour la première fois le processus VH, $H \rightarrow bb$ et avec le boson vecteur se désintégrant en quarks aussi. Cette nouvelle analyse rendue publique à l'été 2023 utilise l'ensemble des données du Run-2 (2015-2018) :

137/fb. Les bosons vecteurs et les bosons de Higgs sont reconstruits à l'aide de jets à grand rayon et identifiés à l'aide de techniques de sous-structure de jet (*voir figure ci-dessous*). La section efficace de production de VH est mesurée inclusivement pour des bosons de Higgs avec un $p_T \geq 250$ GeV et différenciellement dans plusieurs bins de p_T du Higgs : $250 \leq p_T < 450$ GeV, $450 \leq p_T < 650$ GeV, et $p_{T_H} \geq 650$ GeV, atteignant des moments transverses de bosons de Higgs à l'échelle du TeV. Le processus a été rapporté avec une signification de 1,7 écarts-types (σ) et le rapport du signal par



Distributions des masses des jets candidats au boson de Higgs pour différentes régions de moment transverse pour la mesure de la production du boson de Higgs en association avec un boson vecteur ($V = W$ ou Z) dans l'état final entièrement hadronique. En utilisant des données enregistrées par le détecteur ATLAS au LHC dans les collisions proton-proton entre 2015 et 2018.

rapport à l'attente du modèle standard est estimé à $\mu = 1,4^{+1,0}_{-0,9}$.

En parallèle, l'équipe poursuit son implication dans l'étude de la production de paires de bosons de Higgs, en particulier dans la production de Vector Boson Fusion (VBF). 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. En outre, la production de paires de bosons de Higgs (HH) VBF offre un accès essentiel aux propriétés fondamentales du boson de Higgs. Elle implique à la fois les interactions HHH, VVH et VVHH (avec

$V=W,Z$), et présente une annulation entre les amplitudes impliquant VVH et $VVHH$ avec des bosons vecteurs polarisés longitudinalement qui est une conséquence directe de la structure en doublet du champ de Higgs postulée dans le mécanisme BEH. L'équipe étudie le processus rare dans lequel les deux bosons de Higgs se désintègrent en deux quarks b ($HH \rightarrow bbbb$) en utilisant l'ensemble de données Run-2 et Run-3 (2022-en cours). Nous nous concentrons uniquement sur le régime de masse élevée des di-Higgs, où la sensibilité est maximale et où les techniques de sous-structure des jets sont nécessaires. Ces recherches ont bénéficié du projet de collaboration entre IJCLab,

LPNHE et CPPM-Marseille que nous menons depuis le début de 2023, financé par l'ANR "Exploitation Scientifique des données des Infrastructures de Recherche".

La beauté des bosons de Higgs est mise en évidence par des techniques d'analyse innovantes et l'amélioration des performances des détecteurs.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Christophe Roland, Giovanni Calderini,
Reina Camacho Toro, Yajun He, Thiziri Amezza

Traquer la matière noire et de nouvelles résonances

On dispose aujourd'hui de trois méthodes pour rechercher l'existence de particules de Matière Noire. Elles pourraient être mises en évidence dans des expériences où l'on traque son interaction rare avec les atomes de détecteurs de grand volume, dans la recherche des traces de leur annihilation dans les rayons cosmiques qui arrivent sur Terre ou sur des satellites instrumentés, mais aussi par la mise en évidence de leur production directe dans les accélérateurs de très grande intensité comme le Large Hadron Collider (LHC) du CERN.

Pendant longtemps, il a semblé théoriquement extrêmement motivé que la matière noire puisse être composée de particules très liées à des théories électrofaibles comme la supersymétrie. En effet, des particules de type WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) sont prédites par des modèles décrivant la densité relique de matière noire mesurée dans l'univers avec des sections efficaces typiques de la physique électrofaible et des particules de matière noire ayant une masse de l'ordre de l'échelle électrofaible. Cependant après plusieurs décennies dédiées à la recherche de telles particules, aucun signe de leur existence n'a été mis au jour et il est donc fondamental de diversifier

les recherches de matière noire et d'exclure tout modèle expliquant la matière noire par des mécanismes gravitationnels impliquant des objets astrophysiques, notamment des trous noirs primordiaux, seuls objets macroscopiques qui pourraient encore constituer une fraction importante de la matière noire.

Diversifier la recherche de sources possibles de matière noire

Sachant que des modèles théoriques tout à fait cohérents avec nos connaissances expérimentales actuelles peuvent prédire des candidats matière noire ayant une masse allant d'une fraction d'eV à plusieurs centaines de GeV, il faut diversifier les expériences et envisager des phénoménologies plus exotiques qui peuvent nécessiter de repenser les techniques de déclenchement et de reconstruction actuelles. Certains modèles prédisent notamment la production de particules de longue durée de vie qui, si elles étaient produites au LHC, ne seraient pas reconstruites par les algorithmes de reconstruction usuels conçus sous l'hypothèse de

particules produites dans la région de collision des faisceaux.

Parmi ces modèles, certains donnent au secteur de Higgs, découvert en 2012 et encore connu de manière incomplète, un rôle de portail entre le secteur sombre (les particules de matière noire) et le secteur standard (les particules du Modèle Standard). Cependant rien n'interdit l'existence d'autres approches impliquant des candidats matière noire comme des particules de type axion (ALP) a pouvant se désintégrer en deux photons, soit de manière prompte, soit de manière beaucoup plus lente si elles ont une grande durée de vie

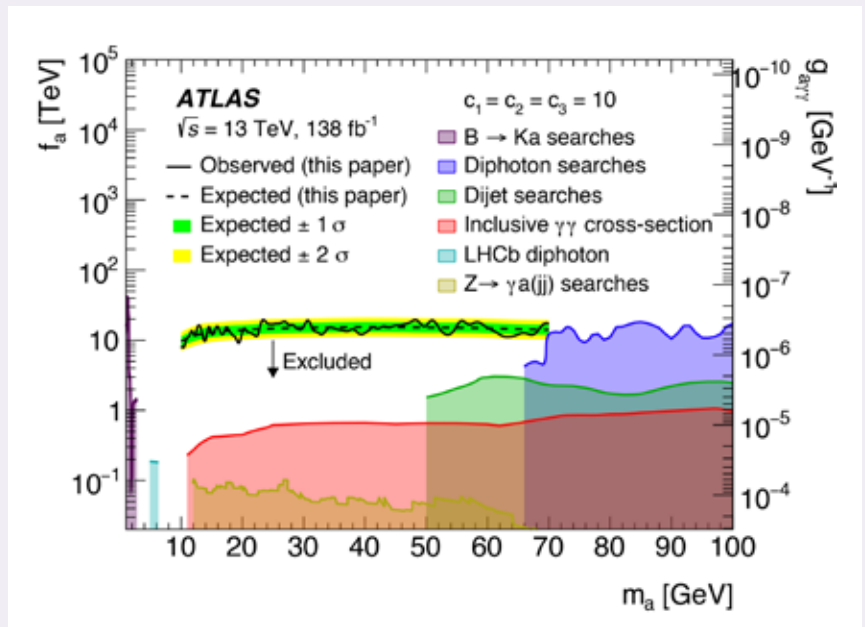
Rechercher des paires de photons boostées

Dans ces deux cas, il est intéressant de rechercher des paires de photons produites soit par la production de résonances non prédites par le modèle standard et se désintégrant instantanément dans le détecteur soit par la désintégration de particules de longue durée de vie loin du point de collision des protons. Ces particules peuvent par exemple être produites par la désintégration du boson de Higgs dans des modes rares non standards comme $H \rightarrow Za$.

Après sa participation à la découverte du boson de Higgs dans le canal diphoton pendant le run 1 du LHC, notre équipe s'est orientée vers la recherche de résonances inconnues se désintégrant en paire de photons et dans la recherche de boson de Higgs produit en association avec des particules de matière noire. Pendant le run 2, nous avons participé à la recherche de résonances diphotons à hautes (200 GeV/c^2 à 2 TeV/c^2) et basses (65 à 110 GeV/c^2) masses puis plus récemment à très basse masse en développant une stratégie totalement nouvelle basée sur la détection de paires boostées de photons qui a permis de mettre de contraindre l'existence d'une telle résonance jusqu'à 10 GeV/c^2 (voir figure ci-dessus). Cette recherche a notamment bénéficié d'un travail important mené au laboratoire sur l'amélioration du

critère d'isolation des photons construit à partir des mesures calorimétriques de chaque événement. Ce travail continue avec les données du Run 3, avec deux objectifs : d'une part produire les corrections à appliquer à l'isolation calorimétrique et calculer l'incertitude systématique sur les différences résiduelles entre les données et la simulation, et d'autre part définir un nouveau critère d'isolation pour des paires de photons fortement collimatés, et ainsi améliorer la sensibilité de la recherche de particules de type axion à très basse masse.

Ce travail s'accomplit dans le cadre de deux collaborations très complémentaires. La première se déroule avec le cluster ATLAS du Brésil dans le cadre d'un



Limite sur le couplage possible d'une Axion-Like Particle (ALP) au photon en fonction de la masse d'une telle particule dans le cas d'un scénario de référence. On observe qu'il existe un espace de contrainte vierge entre la limite basse obtenue sur la masse d'une ALP et les contraintes issues des mesures des usines à B. Cette région fait l'objet de développement en cours au sein de notre équipe.

projet COFECUB axé sur tous les aspects concernant le déclenchement sur les photons et les paires de photons boostées et l'utilisation d'approches d'apprentissage automatique (ML) pour aborder des problématiques allant de l'amélioration de la reconstruction du temps d'arrivée des photons, des électrons et des jets dans les calorimètres, la correction des effets de diaphonie sur les variables de formes de gerbes électromagnétiques, au développement de nouveaux Trigger dédié à la sélection en ligne d'événements contenant des paires de photons boostées. Il est intéressant de noter que ce travail génère des études menées en commun avec nos collègues du

LPNHE qui travaillent sur la sous-structure des jets afin de définir si les variables du plan de Lund de l'émission des jets peuvent apporter une discrimination supplémentaire des jets par rapport à des paires d'objets électromagnétiques boostées. La seconde collaboration a lieu dans le cadre d'un projet soutenu par l'ANR qui rassemble deux équipes expérimentales (LPSC et LPNHE) et une équipe de phénoménologues (LPTHE) pour travailler à la recherche de particules de longue durée de vie liées au problème de la matière noire. Le travail mené avec nos collègues théoriciens concerne l'amélioration des données publiées par les expériences du LHC pour permettre la meilleure réinterprétation des mesures publiées en termes de contraintes sur des nouveaux modèles de matière noire dans le cadre de l'outil MadAnalysis5. Ce projet bénéficie d'une approche innovante visant à utiliser des données de simulation générées par le programme Lorenzetti Showers pour intégrer à MadAnalysis5

un module de simulation rapide basée sur une IA générative ainsi que d'un travail visant à permettre la réinterprétation d'analyse ATLAS publiées utilisant des algorithmes de Machine Learning pour sélectionner leurs signaux.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Edmar Egidio Purcino De Souza, Bertrand Laforge, Lydia Roos, José Ocariz, Mikola Khandoga, Artur Oudot Choi, Roman Van den Broucke
Associés via notre collaboration avec le Brésil :
Marton Sandes, Mateus Hufnagel, Luiz Balhabram, André Malvezzi Lopes



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 aussi 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 sa désintégration en paires $\mu^+\mu^-$, soit en un méson D, un D^0 produit en association avec un μ ou un D^* (2010). La mesure utilise une méthode à partir 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'étalonnage en énergie des jets qui est la source d'incertitude dominante dans la plupart des autres mesures. Toutefois la mesure est très sensible à la modélisation des processus de

fragmentation et d'hadronisation des quarks b. Une thèse a été soutenue sur le sujet en septembre 2020. Depuis, un long travail, toujours en cours, est effectué pour diminuer les incertitudes systématiques, en suivant les progrès des différents générateurs et en produisant suffisamment d'événements simulés pour réduire la composante statistique de ces incertitudes.

Le groupe participe à l'organisation annuelle de l'atelier TopLHCFrance regroupant les expérimentateurs et théoriciens des laboratoires français impliqués dans la physique du quark top.

Le groupe bénéficie d'une collaboration avec l'IFJ-PAN de Cracovie dans le cadre des accords de coopération IN2P3-COPIN et de séjours invités par l'Université Paris Cité et par l'Ecole Doctorale interdisciplinaire et le programme d'études doctorales de l'IFJ-PAN de Cracovie.

Chercheur :
Frédéric Derue

Études de physique, performance de calibration et étiquetage des jets

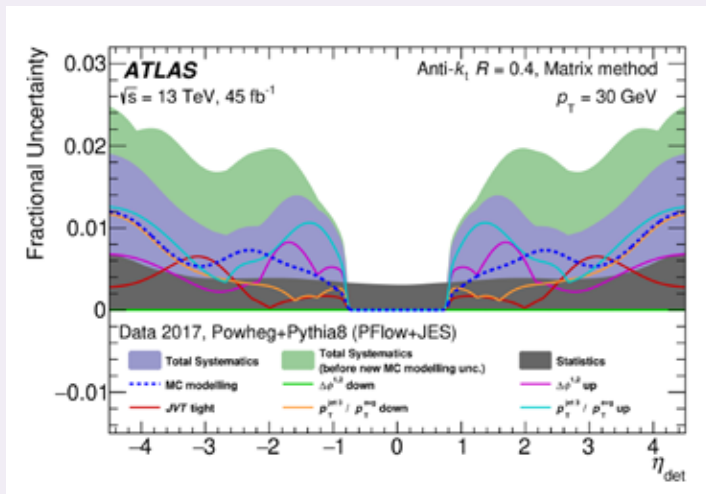
Calibration en énergie des jets

La calibration de l'énergie des jets est basée sur une série de corrections à la calibration initiale basée sur les dépôts d'énergie reconstruits dans le calorimètre. Parmi celles-ci il y a les corrections utilisant des méthodes in-situ comparant l'énergie d'un jet à celle de particules identifiées ou à celle d'un autre jet, dans un même événement. Le groupe ATLAS LPNHE a apporté des contributions importantes à ces études, plus particulièrement pour la méthode

in-situ de la balance de deux jets et celle basée sur les mesures du rapport E/p pour des traces isolées.

Un travail conséquent a été effectué dans le groupe sur la calibration absolue en énergie des jets, à comparer avec la méthode relative, entre les données et la simulation, utilisée auparavant. S'appuyant moins sur la simulation Monte Carlo et permettant de mieux distinguer les effets de physique et ceux liés à la réponse du détecteur, la nouvelle méthode permet d'améliorer la précision de la calibration. En effet, ces études ont permis de réduire d'un facteur 2 l'incerti-

tude systématique dominante pour la méthode in-situ eta-intercalibration à basse impulsion transverse. Un autre travail récent permet de rendre la méthode eta-intercalibration plus robuste, d'utiliser un ensemble plus grand d'événements, ainsi que d'avoir une description précise des corrélations des incertitudes statistiques utilisant une méthode bootstrap. Dans un autre projet, en collaboration avec des chercheurs d'IBM, on utilise l'information provenant de cette méthode in-situ dans des approches basées sur l'intelligence artificielle (*voir figure ci dessous*).



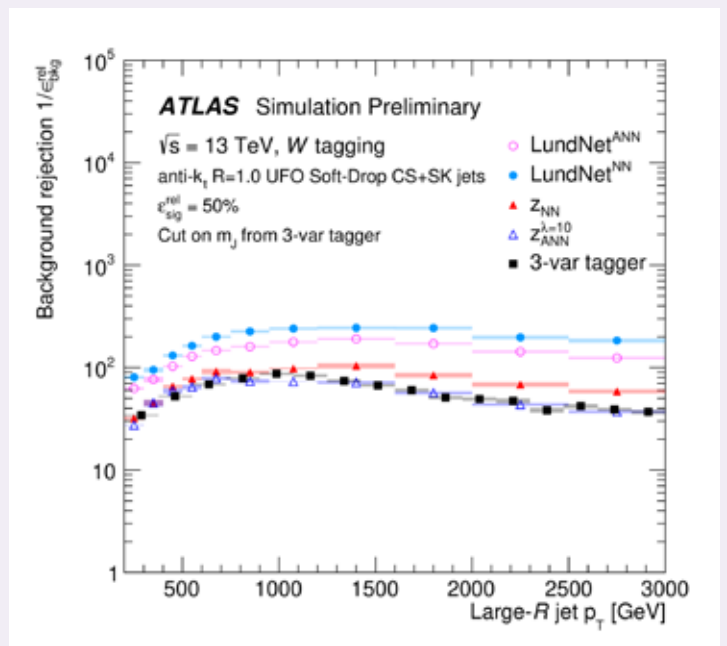
Incertainces de la méthode eta-intercalibration en fonction de la rapidité. La réduction de l'incertitude systématique, due aux améliorations récentes de la méthode, est également indiquée.

Le travail effectué dans le groupe, dans le cadre d'un projet ANR, a permis de réduire significativement l'incertitude de la méthode de calibration « E/p ». Celle-ci a maintenant une précision similaire, voire meilleure que les autres méthodes in-situ discutées précédemment. Nous avons aussi généralisé l'utilisation de l'approche « E/p » afin d'obtenir la calibration en énergie des jets pour une série de valeurs de rayons R. La combinaison des résultats des méthodes in-situ et E/p a aussi été effectuée pour la première fois, avec le test de leur compatibilité et la propagation des incertitudes et de leurs corrélations. Les résultats de ces études de calibration sont en train d'être propagées dans des analyses de physique d'ATLAS, pour la section efficace de production des jets et l'étude de leur sous-structure utilisant l'observable dite de « Lund Jet Plane » (LJP).

Étiquetage des jets

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 $H \rightarrow bb$ en utilisant des processus comme $V\gamma$ et V +jets. En particulier, le groupe a contribué aux études d'étiquetage des jets de bosons W boostés, utilisant l'information du LJP afin d'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. Cette approche est très complémentaire par rapport aux méthodes précédentes. Ces nouvelles études utilisent plutôt des informations de "bas niveau", telles que les propriétés cinématiques directes des constituants d'un jet ou bien le LJP. Ces nouveaux algorithmes ont permis de séparer la forme du signal de celle du bruit de façon plus efficace. Elle a permis d'obtenir, dans des conditions similaires par ailleurs, une amélioration de la réjection du bruit de fond par des facteurs allant de 2 jusqu'à 3. La sensibilité du nouvel algorithme au choix de la simulation Monte Carlo a également été étudiée en détail (*voir figure ci dessous*).

Il faut ajouter que depuis octobre 2021, Reina Camacho Toro est coordinatrice du groupe JetEtmis



Suppression du bruit de fond pour des outils d'étiquetage de bosons W boostés, en fonction de l'impulsion transverse du jet.

d'ATLAS, en charge de la reconstruction et la calibration des jets et de l'énergie transverse manquante. Bogdan Malaescu a été coordinateur du Comité de Statistique d'ATLAS, entre avril 2020 et mars 2022, un comité dont il est membre depuis décembre 2019

Chercheur.euses et doctorant.es :

Anja Butter, Reina Camacho, Bogdan Malaescu, Luc Poggioli, Melissa Ridel, Mykola Khandoga, Lata Panwar, Christophe Roland, Laura Boggia, Line Delagrangue, Louis Ginabat, Yajun He

CHIFFRES CLEFS

< 1 % : valeur de l'incertitude de calibration en énergie des jets, pour une grande partie de l'espace de phases.

> 1000 : composantes des incertitudes de calibration en énergie des jets.

ATLAS ITk : développement de la technologie et construction d'un trajectographe de nouvelle conception

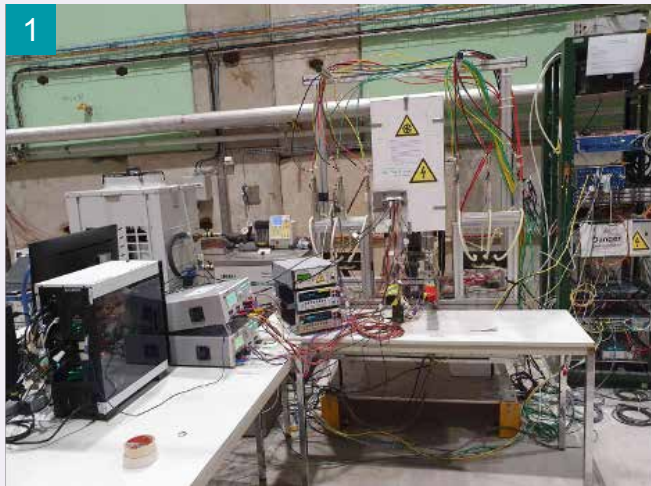
Depuis des années, le groupe ATLAS du LPNHE se consacre au développement de capteurs pour le trajectographe ITk et à l'installation de l'infrastructure nécessaire à la construction du détecteur. En collaboration avec l'ITk d'ATLAS et d'autres projets internationaux tels que RD50, RD53 et AIDAInnova, le groupe a aussi travaillé à la conception de composants pour les futurs détecteurs en silicium. Son expertise se démarque notamment dans les solutions de refroidissement avancées, utilisant des micro-canaux gravés dans le silicium, et dans les technologies d'interconnexion, proposant des approches innovantes pour relier les pixels du capteur aux canaux de l'électronique frontale.

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

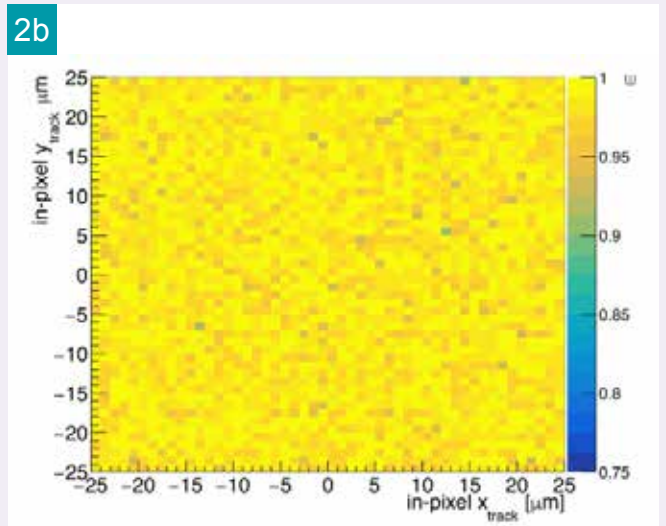
Le Groupe ITk du LPNHE a développé au fil des années une expertise reconnue dans le domaine des

capteurs en silicium, passant de détecteurs à pistes des expériences précédentes ATLAS aux capteurs pixel développés pour l'IBL d'ATLAS et le futur trajectographe interne ITk. Le groupe a été parmi les promoteurs de la technologie n-in-p pour les capteurs pixel planaires de l'ITk, une solution effectivement adoptée pour le TDR. De plus, le groupe a conçu des capteurs de plus en plus minces, bien adaptés à contrer les dégâts des radiations grâce à la réduction du phénomène de piégeage de charge.

En collaboration avec la fonderie Fondazione Bruno Kessler (FBK) de Trento, en Italie, le Groupe ITk du LPNHE a élaboré plusieurs générations de capteurs à pixel, caractérisés en salle blanche du laboratoire et lors de tests en faisceau ([voir photo 1 page suivante](#)), avant et après des campagnes d'irradiation. Ce travail a abouti à la conception finale utilisée par FBK pour la production des modules de l'ITk pour la première couche de pixels planaires de l'ITk, appelée "Layer-1" ([voir photo 2 page suivante](#)). Les tests conduits sur les prototypes et les



Test en faisceau pour caractériser les capteurs de pixels de l'ITk.



Carte d'efficacité in-pixel pour un capteur FBK, mesurée au test en faisceaux ; la cellule est de 50x50 μm²

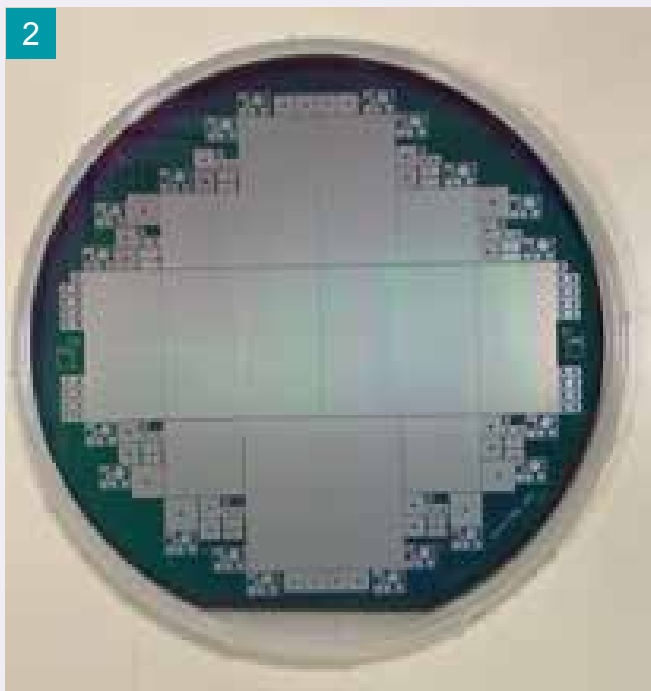


Photo de la galette de production finale à FBK des senseurs à pixel pour la couche 1 de l'ITk.

senseurs de la preproduction montrent que l'efficacité de détection de traces après la fluence attendue au HL-LHC dépasse le 97 % (voir figure 2b ci contre), une performance bien en accord avec les spécifications imposées par la collaboration ATLAS. La production finale à FBK a débuté fin 2023.

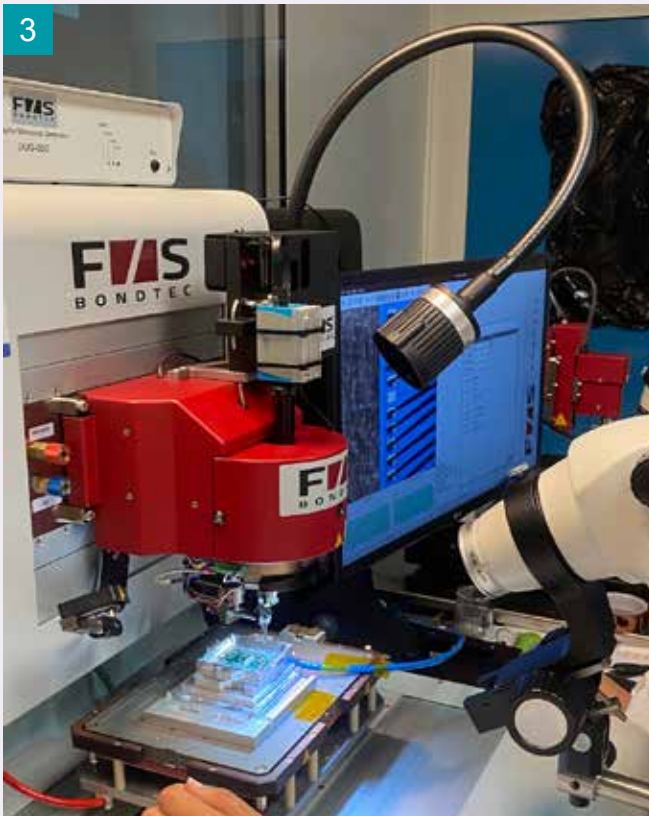
Le LPNHE joue un rôle fondamental dans la construction de l'ITk, devant assembler près d'un millier de modules, représentant plus de 10 % des modules de la partie extérieure du tonneau. Après assemblage, sa mission est aussi de garantir la qualité à travers un programme de tests prenant en compte les conditions expérimentales auxquelles le détecteur final

sera soumis. Pour ce faire, l'infrastructure du laboratoire a été renforcée en collaboration avec l'IN2P3 et Sorbonne Université. Une machine à bonder (voir figure 3 ci-contre) a été achetée et intégrée à la salle blanche d'ATLAS, une machine de métrologie et un microscope à haute résolution, assurant la qualité des modules assemblés. Un tube à rayons X permettra des tests approfondis des connexions entre les capteurs et les puces de lecture. La machine à bonder jouera un rôle crucial dans l'instrumentation du laboratoire pour les années à venir. Une seconde machine pour les tests sous pointes a été acquise sur projet Sésame IdF (voir figure 4 ci-contre) et sera dédiée au contrôle qualité des capteurs produits dans les fonderies. Le programme de contrôle qualité des modules produits comprend divers tests électriques et thermomécaniques tels que la mesure de la stabilité du courant de fuite, des cycles thermiques rapides dans l'enceinte thermique, ainsi qu'un programme complet de métrologie.

Solutions R&T innovantes : films conducteurs pour les interconnexions et microcanaux pour le refroidissement

Les activités de recherche menées par le groupe du LPNHE ont produit d'importants résultats dans le domaine des détecteurs pour la physique des hautes énergies en général. En collaboration avec le CERN, le groupe développe une solution d'interconnexion basée sur des films et des pâtes conductrices aniso-

3



Machine à bonder utilisée pour réaliser les connexions électriques entre les quatre puces de lecture du module et le circuit flexible utilisé pour sortir les signaux.

tropes (ACF et ACP). Cette solution implique le dépôt d'un film ou d'une pâte contenant de microscopiques particules conductrices. La densité de particules est optimisée en fonction de la distance entre les pixels, et après la compression du film ou de la pâte entre le capteur et l'électronique de lecture, une connexion entre les deux éléments est établie sans contact entre les pixels voisins. Les résultats déjà obtenus par le groupe avec cette technologie sont très prometteurs

4



Nouvelle machine de test sous pointes d'ATLAS au LPNHE. La machine est conçue pour effectuer des mesures même à des températures de -55 °C à +200 °C sans effets de condensation, et s'adapte particulièrement aux conditions nécessaires pour les mesures sur les capteurs irradiés.

et permettront de remplacer le coûteux, complexe et long processus de bump bonding des pixels pour plusieurs applications.

Dans le domaine du refroidissement, avec une électronique de lecture de plus en plus complexe, des solutions innovantes sont nécessaires pour évacuer la chaleur générée. Les futurs détecteurs à pixels fonctionneront à des températures comprises entre -20 et -25 °C pour limiter les dégâts causés par les radiations, avec un système basé sur le dioxyde de carbone (CO₂). Le refroidissement devra être très uniforme pour éviter les phénomènes d'emballement de courant dans le silicium, qui peuvent commencer en un point à une température plus élevée et se propager au reste du capteur. Le groupe développe depuis des années des solutions de refroidissement où un système étendu de microcanaux gravés dans des plaquettes de silicium connectées aux modules du détecteur remplace le conduit central unique en titane par lequel circule le CO₂. De cette manière, la quantité de matière est réduite et le refroidissement est beaucoup plus uniforme. En alternative, le groupe a testé aussi des groupes de microtubes en fibre de carbone qui obtiennent le même résultat. Un certain nombre de dispositifs produits ont aussi été caractérisés par des tests thermomécaniques au CERN (dans le Laboratoire EP-DT) et les mesures ont été publiées.

Le laboratoire participe au projet AIDAInnova qui a commencé en 2021, et le groupe a reçu un financement plutôt important pour le développement de solutions d'interconnexion basées sur ACF/ACP et le développement de dispositifs à microcanaux.

Puces de Front-End pour l'ITk

La collaboration RD53 a été établie en 2013 pour élaborer une architecture en technologie CMOS 65nm destinée aux puces de lecture des pixels d'ATLAS et CMS. Depuis ses débuts, le groupe ATLAS du LPNHE participe activement au sein du RD53 et a joué un rôle significatif dans le développement du cœur numérique des nouvelles puces, notamment dans l'implémentation du protocole de lecture end-of-column. Après des étapes intermédiaires nommées RD53a et ITkPixV1, la puce finale ITkPixV2 a été produite, adoptant l'architecture et les dimensions destinées à être utilisées pour les modules de l'ITk. La livraison de cette puce a eu lieu en 2023, et le groupe

du LPNHE a activement participé à la conception, à la validation de la simulation avant l'envoi à la fonderie, ainsi qu'au programme de tests et caractérisation des puces produites.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Stephanie Beauceron, Giovanni Calderini, Reina Camacho Toro, Frederic Derue, Bertrand Laforge, Luc Poggioli, Paul Chabrilat, Artur Cordeiro, Yajun He

Équipe technique :

Thibaud Carcone, Julien Coridian, Remi Cornat, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Brigitte Delamour, Marc Dhellot, David Martin, Eric Pierre, Yann Orain

CHIFFRES CLEFS

Fluence attendue à **1.5×10^{16} n_eq/cm²** dans la couche la plus interne ; empilement à **200**.

Taille des pixels réduite à **50x50 μm²**.

Plus de **10 000 modules** modules à construire ; **2100** à Paris, **800** à LPNHE.

Plus de **13 m²** de capteurs à pixels.

Plus de **5 milliards** de canaux de lecture dans le détecteur à pixels.

Un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision : HGTD

Depuis mai 2015, le LPNHE contribue à la réalisation d'un détecteur hautement granulaire pour ATLAS pour la phase de haute luminosité du LHC. En effet, l'augmentation attendue du flux de particules aura un impact important sur l'empilement avec potentiellement 200 interactions par croisement de faisceaux. Les performances du détecteur ATLAS pour les électrons et les photons, ainsi que pour les jets et l'énergie transverse manquante seront fortement dégradées dans les parties avants. Un détecteur hautement granulaire permettant une mesure précise du temps (HGTD « High Granularity Timing Detector ») doit être installé devant les parties bouchons du calorimètre électromagnétique, couvrant la région en pseudo-rapacité de 2.4 à 4. Constitué de quatre couches de capteurs silicium, une résolution en temps de l'ordre de 30 picosecondes par cellule sera nécessaire pour associer les hits aux particules des collisions proton-proton.

À ce stade, la conception est finalisée, plusieurs prototypes ont été produits et un démonstrateur est en cours de réalisation. Après l'approbation par la collaboration ATLAS, la phase des différentes revues du projet est en cours avant de débiter la production des différents éléments en 2025.

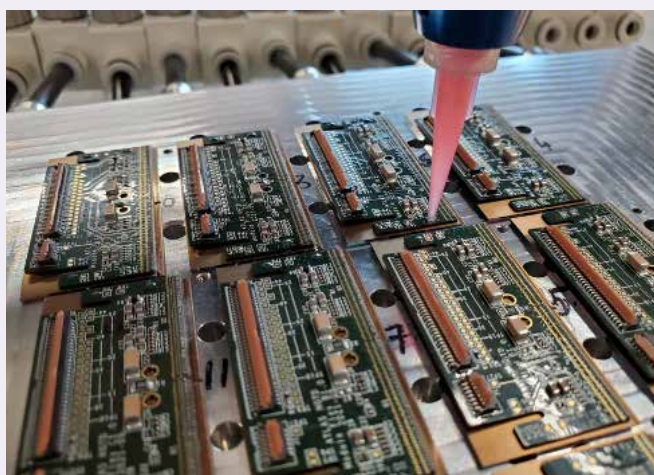
Conception et Design

Au cours des trois dernières années de 2020 à 2023, un intense activité de R&D a été menée au LPNHE. Nous avons proposé une structure de détecteur permettant l'assemblage des modules sur des supports spécifiques. Leur conception originale permet un contact direct avec les plaques de refroidissement et une modularité adaptée aux remplacements prévus au cours de la période de fonctionnement du détecteur. De plus, le taux d'occupation, le nombre de hits

nécessaire à la reconstruction des traces et à la mesure de temps impliquent un recouvrement partiel des différents disques, variable en fonction du rayon. Ainsi, les activités de design menées par le laboratoire, du concept à la production des dessins en bureau d'étude ont été intenses. De nombreux prototypes ont été fabriqués au laboratoire et sous-traités à des entreprises françaises et chinoises. L'enjeu additionnel est à terme de sélectionner la société qui sera en charge de la production des supports. Le LPNHE a la responsabilité de 50 % de la production des supports, soit 384 éléments, de 48 types différents.

Assemblage et tests

La seconde activité technique du groupe concerne la fabrication des unités de détection, constituées des modules collés sur les structures précédemment décrites. Nous avons en charge la conception et la mise au point de la procédure. Ainsi de nombreuses études ont été menées afin d'y parvenir, comme la qualification de la colle. Le choix du type, la quantité et la méthode de dépôt doivent tenir compte de la résistance mécanique nécessaire, de la résistance aux radiations et de la tenue aux effets thermiques. La figure ci-dessous montre le dépôt de colle sur les modules en vue de l'assemblage d'une unité de détection.



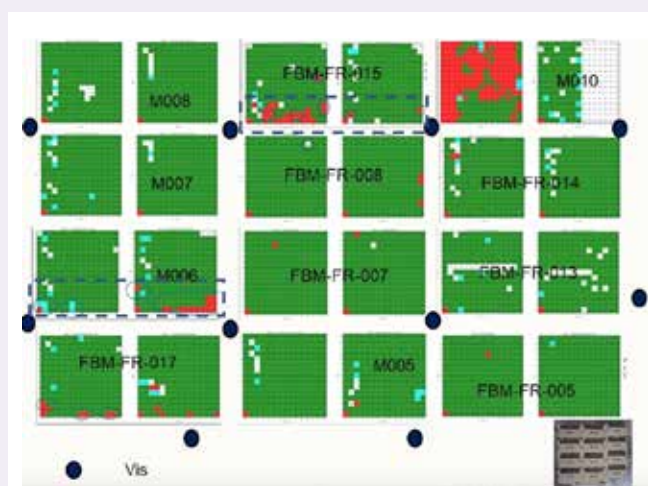
Photographie montrant le dépôt de colle sur les modules afin de les fixer sur le support. Quatre points de colle par module sont nécessaires pour assurer une bonne tenue mécanique. L'ensemble est commandé par un système permettant un dépôt automatique sur l'ensemble des modules constituant une unité de détection.

L'outillage pour l'assemblage est une activité importante des dernières années avec la mise au point d'un système de maintien des modules sur des plaques spécifiques dans une configuration identique à la situation

finale où les modules sont en contact direct avec la plaque de refroidissement. Le dépôt de colle lui-même est opéré par un robot. Le procédé a été développé avec le robot du projet Calice. Un nouvel automate a été acquis en 2023 afin d'avoir un système adapté aux spécificités en termes de manipulation et de courses globales. À noter que ce robot a été choisi en vue de la production des unités de détection qui sera effectuée en partie au LPNHE. Notre engagement concerne 20 % de la production, soit 154 unités à assembler pour un total de 1600 modules.

Au cours de l'année 2023, l'installation de l'infrastructure s'est poursuivie avec une montée en gamme de la qualité de la salle (installation d'un plafond soufflant, achat d'une armoire de stockage à température et humidité contrôlées, mise en œuvre de procédures de manipulation avec outillage adapté).

Plusieurs mesures sont effectuées dans la phase actuelle de R&D et aussi en vue du contrôle qualité prévu pour la production. D'un point de vue mécanique, les contrôles dimensionnels des supports et des modules sont cruciaux pour assurer un assemblage correct. Concernant les performances du détecteur, il est nécessaire de s'assurer que l'ensemble des voies de lecture est opérationnel. Dans ce but, nous avons mis en œuvre un banc de tests permettant une caractérisation électrique de chacune des voies de chaque module. La figure ci-dessous est un exemple de résultat obtenu.

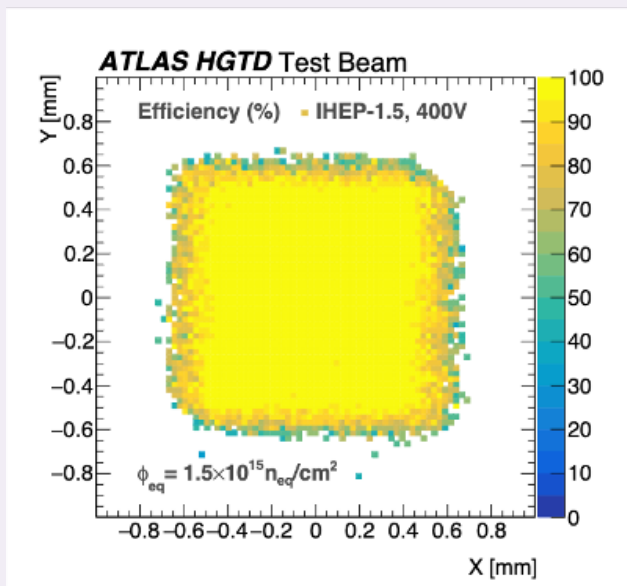


Cartographie de l'ensemble des pads constituant une unité de détection de 12 modules correspondant à 5400 voies de lecture. Le système mis en œuvre au LPNHE permet d'identifier les connexions défectueuses en rouge sur la carte.

Actuellement, la collaboration travaille à la conception et à la fabrication d'un démonstrateur HGTD qui comportera toutes les parties du détecteur final et sera installé au CERN sur un système semblable au système final. Le LPNHE a en charge la conception et la fabrication des unités de détections spécifiques à cette configuration. Ce démonstrateur comportera 54 modules pour un total de 24300 voies. La première unité de détection de 12 modules a été produite au LPNHE en juillet 2023, la seconde comportant 15 modules, en janvier 2024.

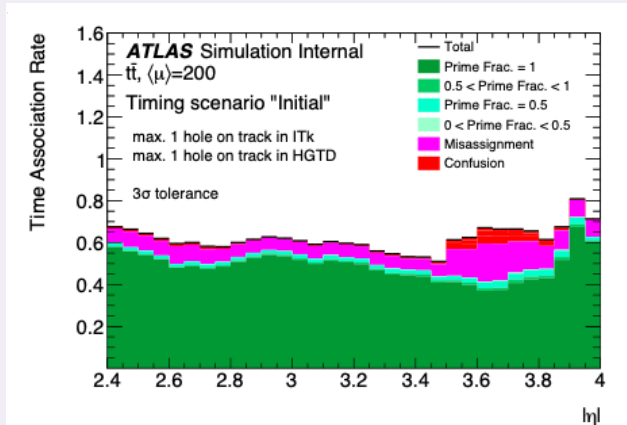
Études des performances

Plusieurs campagnes de tests en faisceaux ayant été menées, l'analyse des résultats se poursuit et fût une activité majeure au cours des dernières années. Trois articles Jinst auxquels le groupe du LPNHE a contribué ont été publiés. La figure ci-dessous est un exemple de résultat obtenu sur l'efficacité d'un senseur testé.



Mesure d'efficacité d'un senseur HGTD irradié. Ce résultat a été obtenu lors de la mise en faisceau d'un prototype à DESY en 2022. À ce stade, une bonne uniformité est obtenue dans la partie centrale du pad d'une surface de 0.5 X 0.5 mm².

Par ailleurs, l'équipe poursuit sa participation au développement d'algorithmes de reconstruction des traces et à l'optimisation des performances du détecteur. La figure ci-contre montre un résultat obtenu sur des données de simulation afin d'optimiser l'association des traces avec les hits dans HGTD



Grphe montrant le taux d'association des traces aux hits enregistrés dans HGTD en fonction de la pseudo-rapidité. Grâce au développement d'un algorithme de reconstruction permettant de sélectionner les événements ayant un certain nombre de trous (absence de hits dans HGTD) par trace, il est possible de réduire les mauvaise assignation de 27,4 % à 12,4 % tout en maintenant une efficacité à 49,5 %.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Tristan Beau, Didier Lacour, Iréna Nikolic, Sophie Trincaz Duvoid, Valentina Raskina

Équipe technique :

Guillaume Daubard, Marc Dhellot, Charlotte Georget, Alexandre Lantheaume, Didier Laporte, Jean-Charles Monrose

CHIFFRES CLEFS

8032 modules pour l'ensemble du détecteur HGTD.

3 614 400 voies de lectures HGTD.

Le démonstrateur en cours de réalisation comportera **24 300** pads de senseur silicium associés chacun à une voie de lecture.

48 types différents de supports pour les unités de détection dessinés et conçus au LPNHE.

20 % soit **154** unités de détection seront fabriqués au LPNHE.

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

Contexte

La stratégie européenne pour la physique des particules (ESPP) a donné en 2020 ses recommandations, avec une mise à jour prévue pour 2025. Ces cinq années sont donc cruciales pour évaluer les futurs accélérateurs potentiels (FCC-ee puis hh au CERN, CEPC en Chine, ILC au Japon, C³ et collisionneur à muons aux USA), leur potentiel de physique et les développements des détecteurs nécessaires associés.

Dans ce cadre le laboratoire se montre très actif sur le suivi des futurs projets et leur préparation.

Etudes de physique

Dans le cadre du FCC-ee, le laboratoire est depuis le début impliqué dans les études de QCD, et en particulier la détermination précise de α_s , où un gain d'un ordre de grandeur est attendu. Les premières études se sont orientées vers la multiplicité des jets dans les événements hadroniques. Sous l'impulsion de l'ANR-LEAP (2022-2025), commune à ATLAS et FCC, les études se concentrent maintenant sur l'étude de la structure interne de chaque jet produit (en termes d'impulsion transverse et d'angle d'émission des partons) à l'aide de la représentation du Lund Jet Plane (LJP). Cette approche permet de mieux identifier la partie perturbative des processus hadroniques, et via

la fragmentation, de balayer une large plage d'énergie des processus QCD, permettant ainsi d'accéder à α_s à différentes énergies et de pouvoir tester les équations du Groupe de Renormalisation (*voir figure ci-avant*). Naturellement, ces études de physique se doivent de déboucher sur des recommandations quant à l'optimisation d'un futur détecteur et de ses paramètres (en particulier le calorimètre, sa granularité et sa résolution en énergie).

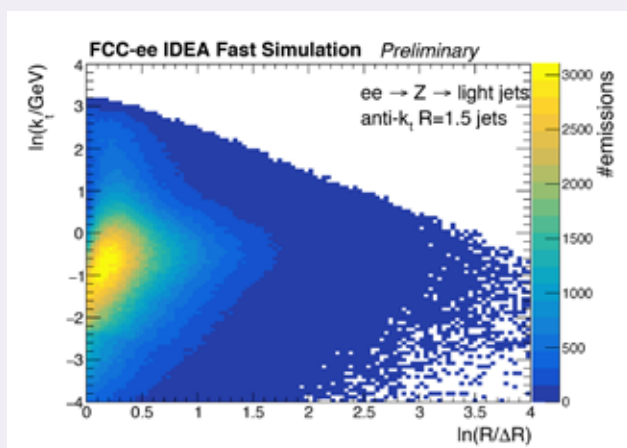
Développements détecteurs

Pour les détecteurs, le laboratoire suit au plus près les études DRD mises en place par le CERN et l'ECFA. Il a à cet effet organisé une demi-journée d'information pour évaluer les différentes voies possibles, et leur intérêt potentiel. À l'heure actuelle, les grandes directions sont les détecteurs de vertex avec des pixels Silicium et leur électronique associée (DRD3 et DRD7), ainsi que la calorimétrie, à silicium et à liquide noble (DRD6).

L'année 2024 s'annonce cruciale, car elle va voir une définition plus précise et concentrée des divers projets DRD soutenus, en particulier au niveau français, avec la signature de Memorandum of Understanding, et la création de proto-collaborations.

Chercheur.euses et doctorant.es :

A. Blondel, B. Malaescu, L. Panwar, L. Poggioli, L. Delagrangé



Au FCC-ee, représentation préliminaire dans le formalisme du Lund Jet Plane (LJP) de la désintégration d'un boson Z en deux quarks légers (simulation rapide utilisant le concept de détecteur IDEA).

CHIFFRES CLEFS

FCC-ee : production de **5×10^{12} Z**, **10^6 Higgs**, **10^8 W**, **10^6 top**.

FCC-hh : production de **10^6 Higgs**, **10^{17} b**, **10^{12} top**.

Le moment magnétique anomal du muon

Prédictions du (g-2) du muon par des approches dispersives

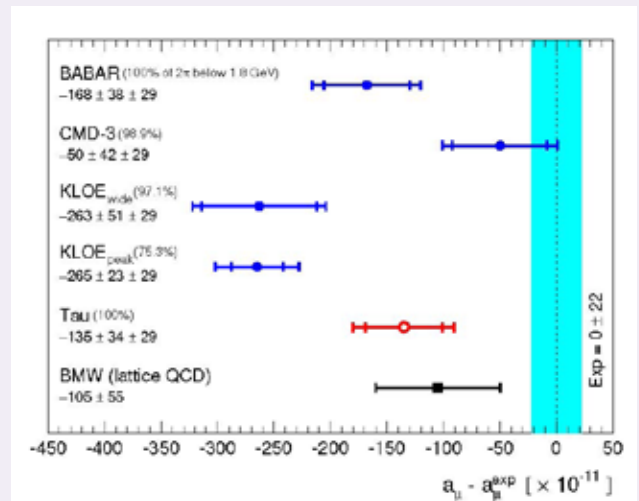
B. Malaescu a effectué des travaux sur la physique de précision à basse énergie, pour déterminer la contribution de la polarisation hadronique du vide (HVP) au moment magnétique anomal du muon $(g-2)_\mu$, pour déterminer la dépendance en énergie pour la constante de couplage électromagnétique α_{QED} , pour étudier leur incidence sur le fit électrofaible, ainsi que pour extraire la constante de couplage fort α_s .

Dans le contexte $(g-2)_\mu$ et α_{QED} , il travaille sur l'approche dispersive, utilisant des mesures de précision des spectres hadroniques dans des collisions $e+e^-$ de basse énergie et les désintégrations du lepton tau. Il a travaillé sur les mesures de ces spectres, sur la combinaison des mesures obtenues par plusieurs expériences avec un traitement complet de leurs incertitudes et corrélations, ainsi que sur les études phénoménologiques où elles sont utilisées.

Une étude comparant les mesures expérimentales pour les photons additionnels avec les prédictions des simulations Monte Carlo a mis en évidence des différences fournissant des indices importants pour expliquer les tensions existantes entre les mesures de sections efficaces hadroniques. On a aussi utilisé les données $e+e^-$ en hadrons pour extraire α_s par une méthode innovante, utilisant la fonction d'Adler déterminée à partir de la dépendance en énergie pour α_{QED} (*voir figure ci-contre*).

On a participé activement à une série de workshops de « l'initiative théorique » ayant conduit à la préparation de la prédiction théorique pour la mesure de $(g-2)_\mu$ au Fermilab. On a mis en évidence le fait que les incertitudes systématiques expérimentales et leurs corrélations ne sont pas connues parfaitement, mais seulement estimées. Il est important de prendre en compte cet aspect dans les méthodes de combinaison de données, afin d'éviter que la précision des résultats ne soit trop optimiste.

Avec nos collaborateurs expérimentateurs d'IJCLab et ceux de la collaboration BMW travaillant sur lattice QCD, on développe un projet financé en partie



Différences entre les prédictions théoriques du moment magnétique anomal du muon et la mesure expérimentale.

par l'ANR, afin de comprendre les différences entre les résultats des approches dispersive et lattice pour la détermination de la HVP. Ceci implique un problème inverse très complexe, sur lequel nous avons publié une étude détaillée.

Depuis mars 2023, L. Polat a rejoint le LPNHE et l'IJCLab en tant que PostDoc, bénéficiant de ce même financement ANR. Il travaille sur la mesure de la section efficace $e+e^- \rightarrow \pi+\pi-(\gamma)$ utilisant les données BABAR et une approche originale, qui n'emploie pas le détecteur pour effectuer l'identification des particules. Ceci va permettre d'obtenir une mesure indépendante de la précédente, avec des incertitudes statistiques et systématiques réduites.

L'approche (E)BHLS2

M. Benayoun*, L. Del Buono (LPNHE) et F. Jegerlehner (Humboldt-Universität), étudient le modèle de Symétrie Locale Cachée (HLS) depuis début 2000. En 2022, BHLS2 (modèle de 2020 incorporant de nouveaux modes de brisures de symétrie) a été de nouveau étendu (EBHLS2), améliorant la compréhension des spectres dipions du τ et fournissant deux évaluations distinctes des contributions hadroniques dominantes au moment anomal du muon, confirmant la divergence des mesures liées aux déterminations du facteur de forme du pion faites par KLOE et par BaBar.

L'accent en 2023 s'est déplacé vers l'analyse des spectres dipions des désintégrations des mésons η/η' . Le cadre BHLS2 adapté a permis de réaliser un fit global des données précédentes en leur ajoutant les données η/η' (en particulier les récentes données BESIII). Le résultat est une mesure consolidée du moment anomal du muon, très proche de la valeur obtenue par les méthodes dispersives. Ce dernier résultat est donc en contraste avec les prédictions de QCD sur réseau, et fournit une confirmation indépendante de la détermination dispersive de la contribution hadronique au moment magnétique anomal du muon, présentant toujours un écart significatif par rapport aux mesures récentes de Fermilab.

L'expérience muon $g-2/EDM$ à J-PARC

Dans le cadre d'une recherche de Nouvelle Physique, M. Benayoun, L. Del Buono et W. da Silva sont signataires de l'expérience muon $g-2/EDM$ à J-PARC (le moment magnétique anomal du muon ($g-2$) et son Moment Dipolaire Électrique (EDM)) avec une contribution au software de reconstruction de traces.

Chercheurs :

Maurice Benayoun, Wilfrid da Silva, Luigi Del Buono, Bogdan Malaescu, Léonard Polat

CHIFFRES CLEFS

1-5 σ : intervalle du niveau de la tension entre la mesure expérimentale du $(g-2)_\mu$ et les prédictions dispersives, selon le choix des données utilisées pour la prédiction

1-6 σ : intervalle du niveau de la tension entre les déterminations de la HVP par lattice QCD et par des approches dispersives, selon le choix des données utilisées pour l'approche dispersive



Activités de « machine learning » pour la simulation et l'analyse

Ces dernières années, les méthodes de machine learning (ML) - en particulier les réseaux neuronaux (NNs) - sont devenues un atout essentiel pour la physique des hautes énergies. Notre groupe est impliqué dans le développement de nouvelles méthodes de ML à différents stades, pour améliorer l'efficacité des techniques existantes et ouvrir des nouvelles perspectives dans tous les niveaux d'analyse, de la prise de données aux simulations.

Génération d'événements et simulations de détecteurs

Les analyses ATLAS reposent sur la comparaison des mesures avec des simulations basées sur le Modèle Standard. Les exigences de précision des Runs actuels et futurs du LHC nécessitent des simulations plus précises, résultants dans une augmentation du temps de calcul par événement qui doit être compensée par des techniques de simulation plus efficaces.

Dans deux études publiées, nous avons exploré le potentiel des modèles de diffusion pour générer directement des événements ou transformer des événements on-shell en événements off-shell plus complexes. En collaboration avec un groupe à Rio de Janeiro/Brésil, nous avons publié Lorenzetti showers, un algorithme rapide pour la simulations des calorimètres.

Calibration des données

La flexibilité des réseaux neuronaux les rend idéaux pour apprendre des corrélations complexes entre plusieurs variables ce qui permet leur exploitation pour l'étalonnage des données ATLAS. Pour l'échelle d'énergie des jets, ceci a été mis en œuvre utilisant des NNs, en vue d'inclure des données in-situ pour améliorer encore le résultat de l'étalonnage. De même, le Trigger EGamma d'ATLAS utilise ML afin d'identifier des électrons en exploitant des caractéristiques latérales et longitudinales des dépôts d'énergie. Ces techniques sont en cours de portage pour les déclencheurs de photons, en vue de la prise de données de 2024. Des techniques d'apprentissage automatique sont en cours de développement pour le problème d'atténuation de CrossTalk dans le calorimètre à argon liquide d'ATLAS, afin d'améliorer la résolution en énergie et en temps.

Analyse des données

Le groupe est impliqué dans toute une série d'applications des approches ML pour l'analyse des données. Par exemple nous avons employé des méthodes ML pour l'étiquetage des bosons W à base du « Lund jet plane ». Aussi, pour la recherche de particules « long-lived » semblables à des axions, des méthodes ML sont en cours de développement pour

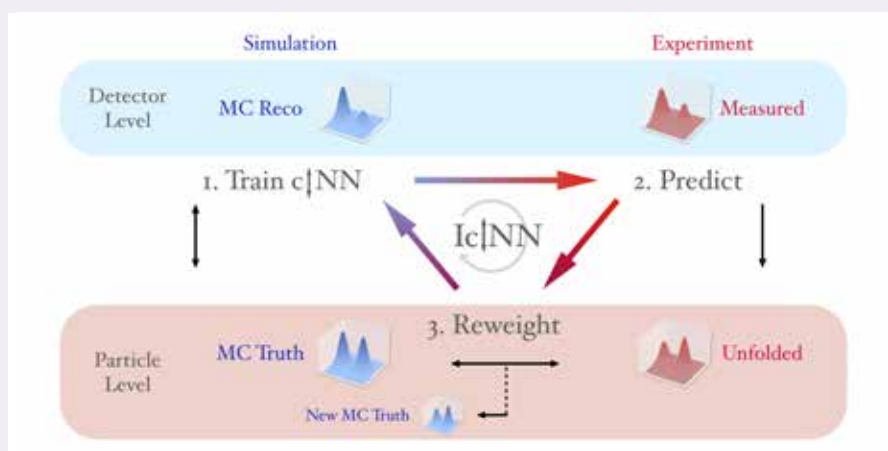


Illustration de l'algorithme itératif cINN de déconvolution des effets de détecteur. (Dans un premier temps l'entraînement est effectué utilisant l'échantillon Monte Carlo original. À la deuxième étape, la méthode cINN est appliquée pour déconvoluer la distribution expérimentale. Dans un troisième temps, la simulation Monte Carlo est re-pondérée afin que la distribution au niveau de la vérité corresponde à la distribution déconvoluée obtenue à l'étape précédente. La procédure est répétée, en modifiant la simulation Monte Carlo à chaque itération.)

distinguer les paires de photons rapidement renforcées et pour identifier les directions du shower. En parallèle nous travaillons sur des méthodes d'« Unfolding » qui corrigent les effets des détecteurs pour permettre la comparaison des mesures entre différentes expériences et faciliter leur interprétation phénoménologique. Nous avons développé une méthode itérative de déconvolution basée sur des NN inversables. Enfin, à travers une collaboration entre le LPNHE et le LPTHE nous développons l'outil de réinterprétation d'analyses MadAnalysis5 en implémentant des capacités d'utilisation d'algorithmes ML. Ceci correspond à une avancée majeure de l'outil, permettant de faire des études phénoménologiques sur des analyses basées sur ces techniques de plus en plus fréquentes.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Anja Butter, Reina Coromoto, Camacho Toro,
Bertrand Laforge, Bogdan Malaescu,
Edmar Egidio Purcino de Souza,
Artur Cordeiro Oudot Choi, Laura Boggia

CHIFFRES CLEFS

10 publications



Asymétrie Matière/Anti-matière

- **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)
 - Le projet d'analyse en temps réel (RTA)
- **Préparer le futur de la physique des neutrinos : de T2K à Hyper-Kamiokande**
 - T2K-II : Installation de la mise à jour de ND280
 - Produire et distribuer l'étiquetage en temps Hyper-Kamiokande
- **Expérience COMET à J-PARC**



Asymétrie Matière/Anti-matière

La présence de plus de matière que d'antimatière dans l'Univers visible est l'un des problèmes les plus énigmatiques dans notre compréhension actuelle de l'Univers. En effet, il n'y a aucune raison pour qu'il y ait, dans un Univers a priori symétrique, de grandes structures telles que des galaxies et des étoiles composées uniquement de matière, sans qu'il soit possible d'observer des objets similaires composés entièrement d'antimatière. Cette asymétrie matière-antimatière est généralement exprimée comme "l'asymétrie baryonique" et la phénoménologie conduisant à cette asymétrie est appelée baryogenèse. Cette asymétrie baryonique semble être plutôt faible, avec un baryon supplémentaire pour chaque milliard de paires baryon/anti-baryon. Le physicien Andrei Sakharov a proposé que cette asymétrie puisse découler d'un Univers parfaitement symétrique si trois conditions sont satisfaites. L'une d'entre elles est l'existence de processus de violation de CP (conjugaison de charge et transformation de parité), qui agissent différemment sur les baryons et les anti-baryons.

Dans le secteur des quarks du Modèle Standard, il existe plusieurs sources de violation de CP. L'une d'elles provient d'une phase dans la matrice de mélange Cabibbo–Kobayashi–Maskawa dite matrice CKM, décrivant l'interaction à courant chargé entre le boson W et les quarks ; son effet a été observé dans les mésons B et D, ainsi que dans les systèmes de kaons. La « physique de la saveur » consiste donc à étudier le changement de type des quarks et des leptons, la « saveur » correspondant au nombre quantique associé à chaque type de fermions.

L'expérience LHCb au CERN étudie essentiellement les désintégrations des particules contenant des quarks b ou c, copieusement produits dans les interactions proton-proton à haute énergie. Grâce à ces études, elle a pu effectuer, entre autres, les mesures les plus précises de la matrice de mélange des quarks. L'expérience a récemment commencé la prise de données après sa jouvence, avec un détecteur pratiquement nouveau et un système de déclenchement entièrement logiciel et basé sur des GPU, permettant la prise de données au rythme de croisement des faisceaux. Le nouveau détecteur LHCb permet de faire face à une forte augmentation de l'intensité des faisceaux, et donc d'enregistrer beaucoup plus d'événements et d'aller plus loin dans la frontière de la haute intensité. Le groupe du LPNHE

est fortement impliqué à la fois dans les analyses de physique et les aspects techniques de l'expérience. Il a contribué à l'électronique de lecture pour le nouveau trajectographe, et a été protagoniste dans la conception et la réalisation du nouveau système de déclenchement.

Les analyses de physique menées par le LPNHE portent essentiellement sur deux axes, ayant comme but la recherche de nouvelle physique : l'étude de l'universalité et de la violation de la saveur leptonique, utilisant essentiellement des désintégrations semi-leptoniques du type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^{-}$ (ℓ'^{\pm} = lepton chargé) et $b \rightarrow c \ell^- \nu$, et l'étude des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. Le premier est un sujet actuel phare de la physique des saveurs en général et de l'expérience LHCb en particulier, avec plusieurs anomalies qui ont apparues et qui sont en train d'être approfondies. Le deuxième s'effectue en plusieurs phases de complexité croissante, sur de nombreuses années, donnant l'accès à de plus en plus d'observables.

Grâce à un financement ERC *Starting Grant*, le groupe du LPNHE a été à l'avant-garde du développement et de la mise en route du projet RTA (*Real Time Analysis*), du nouveau système de déclenchement de LHCb. Le système utilise une ferme de calcul basée sur une architecture hybride, avec des GPU et des logiciels qui permettent une reconstruction et un filtrage en ligne des interactions au rythme de croisement des faisceaux du LHC. Un ensemble complexe d'opérations de reconnaissance des *patterns* est effectué à 30 MHz pour un volume de données de 32 Tb/s et permet 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. Après approbation, en 2020, du projet Allen : RTA avec l'option GPU, le groupe du LPNHE a joué un rôle majeur dans sa réalisation. Le système est actuellement en état de fonctionnement et permet de prendre des données en pleine capacité.

L'expérience COMET située auprès de l'accélérateur de particules de J-PARC au Japon étudie quant à elle la conversion de muons en électrons qui pourrait avoir lieu par des processus violant la conservation de la saveur leptonique. Cette transition est hautement supprimée dans le cadre du modèle standard de la physique des

particules, ainsi la découverte d'une telle transition serait une mise en défaut majeure de la théorie actuelle ainsi que l'indication de l'existence de nouveaux mécanismes de violation de CP.

Il s'avère que les sources actuellement connues de violation de CP sont insuffisantes pour expliquer l'asymétrie baryonique dans l'Univers et que des sources supplémentaires de violation de CP à découvrir sont nécessaires. Certaines nouvelles sources de violation de CP pourraient être trouvées dans le secteur leptonique, conduisant à une asymétrie leptonique - la leptogenèse, puis transférées au contenu baryonique de l'Univers. Une source importante de violation de CP est actuellement activement recherchée dans le phénomène d'oscillations des neutrinos et antineutrinos à travers une phase dans la matrice de mélange PMNS analogue à celle qui existe dans la matrice CKM. Dans ce phénomène d'oscillation, les neutrinos de saveur muonique peuvent se transformer en neutrino électronique (et vice-versa) à cause du fait que les neutrinos ont une masse non nulle. La violation de CP se manifeste alors comme des probabilités de transition différentes selon que l'on étudie les neutrinos ou les anti-neutrinos.

L'expérience T2K étudie l'oscillation des neutrinos en utilisant un faisceau de neutrinos muoniques produit auprès de l'accélérateur de J-PARC au Japon. Pour cela, elle utilise un détecteur proche ND280 permettant notamment de caractériser le faisceau de neutrinos et un détecteur lointain Super-Kamiokande. Depuis son démarrage en 2009, cette expérience a pu collecter des données indiquant que la violation de CP serait maximale dans l'oscillation des neutrinos. Pour aller plus loin, une jouvence du détecteur proche est en cours afin d'améliorer ses performances en utilisant des nouveaux instruments plus performants et notamment de nouvelles chambres à projection temporelle. Soutenu notamment par une ANR « SUNCORE », le LPNHE est fortement impliqué dans ce projet, et notamment dans le système d'électronique de lecture de ces nouveaux détecteurs, mais aussi l'analyse des données associées.

Le programme d'étude de l'oscillation des neutrinos au Japon va connaître un second souffle avec la construction d'un nouveau détecteur lointain, Hyper-Kamiokande, basé sur la même technologie Cherenkov à eau mais 10 fois plus grand. Cette augmentation de la masse d'eau va permettre une augmentation significative du nombre de neutrinos détectés, que ce soient

des neutrinos provenant du faisceau de J-PARC mais aussi des neutrinos émis par le Soleil ou l'explosion de supernovas. Le LPNHE est engagé grâce entre autre à une ANR « BERTHA » dans cette expérience, notamment par le design et la production du système de synchronisation en temps du détecteur lointain, essentiel pour le bon fonctionnement du détecteur et pour le programme d'astrophysique multi-messagère d'Hyper-Kamiokande.

Par ces trois axes de recherche, le LPNHE contribue activement dans un domaine de la physique des particules, qui pourraient apporter des surprises de taille. L'observation de phénomènes rares auprès des collisionneurs, de transition leptonique ou d'oscillation des neutrinos apportera des éléments essentiels à la compréhension de notre Univers.

LHCb : Physique des saveurs lourdes au LHC

L'expérience LHCb et sa jouvence

L'expérience LHCb est conçue essentiellement pour l'étude des particules contenant des quarks b ou c . La structure du détecteur LHCb, un spectromètre à bras unique vers l'avant (couvrant la plage de pseudorapidité $2 < \eta < 5$), 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 élément, le détecteur de lumière Tcherenkov RICH1 (*Ring Imaging CHerenkov counter*), qui permet l'identification des particules d'impulsion inférieure à 40-60 GeV/c 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 RICH2 pour l'identification des particules d'impulsion entre environ 30 et 100 GeV/c, un système de calorimètres électromagnétique et hadronique et un système d'identification des muons qui joue, avec les deux calorimètres, un rôle dans le déclenchement.

Le détecteur LHCb décrit ci-dessus, a servi jusqu'à la fin du Run 2 du LHC en 2018. Il est celui qui a été utilisé pour la plupart des analyses mentionnées dans ce rapport. Le détecteur a ensuite évolué par une cure de jouvence, et est maintenant entièrement opérationnel. Ceci consistait au remplacement de plusieurs sous-détecteurs, parmi lesquels le trajectographe, et une grande partie de la chaîne d'acquisition. Le concept du système de déclenchement a

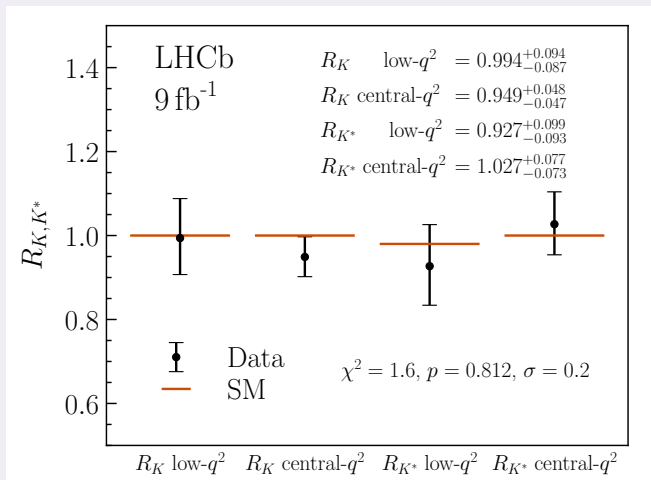
été radicalement modifié et une reconstruction des événements est maintenant effectuée en temps réel et gérée par le projet RTA (*Real Time Analysis*, i.e. analyse en temps réel). Grâce à ces changements, le détecteur est devenu plus efficace, plus flexible et il a été adapté à des taux d'occupation plus élevés. Il permet d'enregistrer environ dix fois plus de collisions proton-proton que par le passé.

En plus de sa contribution aux analyses de physique, l'équipe du LPNHE a été fortement impliquée dans la jouvence de LHCb, à la fois dans le trajectographe à fibres scintillantes (SciFi) et dans le projet RTA.

Analyse de physique et fonctionnement de l'expérience

Les analyses de physique effectuées dans l'équipe 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 $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^{-}$ ($\ell^{(\prime)}$ = lepton chargé) et l'étude des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. L'étude des canaux de type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^{-}$ 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 modèles mettant en jeu des mécanismes de Higgs non-standard, des leptoquarks ou différents modèles de supersymétrie. L'équipe a participé à la première mesure simultanée, avec les 9 fb^{-1} de données disponibles, des rapports $R_{K^{(*)0}}$, entre les taux des désintégrations $B^{+(0)} \rightarrow K^{+(*0)} \mu^+ \mu^-$ et $B^{+(0)} \rightarrow K^{+(*0)} e^+ e^-$. 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 obtenus auparavant par LHCb déviaient significativement de ces prédictions. Le dernier résultat est

montré dans la figure ci-dessous. Ces résultats, qui fournissent le test le plus sensible de l'universalité leptonique dans le secteur du méson B, sont en accord avec les prédictions du modèle standard. Nous cherchons aussi la violation directe de la saveur leptonique via les modes $B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell'^{-}$ avec deux leptons de saveurs différentes : $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$, $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ \mu^-$ et $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ e^-$. La limite récemment obtenue sur le rapport de branchement de $B^+ \rightarrow K^+ e^+ \mu^-$ a été améliorée par un ordre de grandeur comparé au résultat existant, et celle sur $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ \mu^-$ est la plus stricte dans un mode $b \rightarrow s \tau \mu$. Si ces modes sont observés, il s'agira d'une preuve directe et non ambiguë de présence de physique non décrite par le Modèle Standard.



Les résultats des nouvelles mesures simultanées des rapports R_K et R_{K^*} obtenues par LHCb [Phys.Rev.Lett. 131 (2023) 5, 051803]. L'observable R_K (R_{K^*}) signifie le rapport entre les rapports de branchement du méson B^+ (B^0) en $K^{(*)0} \mu^+ \mu^-$ et en $K^{(*)0} e^+ e^-$. Les mesures ont été effectuées avec l'ensemble des 9 fb^{-1} des données enregistrées par LHCb entre 2011 et 2018 (Runs 1 et 2). Ces rapports sondent l'universalité leptonique dans les transitions $b \rightarrow s$, prédite par le modèle standard. Ces mesures sont effectuées dans deux intervalles de q^2 : la masse invariante au carré des deux leptons dans l'état final, notées "low- q^2 " ($0.1 < q^2 < 1.1 \text{ GeV}^2$), et "central- q^2 " ($1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2$). Les résultats présentés sont compatibles avec les prédictions du Modèle Standard.

L'équipe effectue également un test de la violation de l'universalité leptonique dans les canaux de type $b \rightarrow c \ell \nu$, via la mesure du rapport R_{D^*} entre les taux des désintégrations $B^+ \rightarrow D^{*0} \mu^+ \nu_\mu$ et $B^+ \rightarrow D^{*0} e^+ \nu_e$. Ces études 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'équipe effectue d'autres études de désintégrations rares. Nous avons obtenu une limite sur le rapport de branchement de $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, qui est la meilleure pour un processus de type FCNC dans le secteur du charme. Nous nous intéressons également à la mesure de l'élément de matrice CKM V_{ub} avec le mode anti- $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$. Finalement, nous recherchons des oscillations du Ξ_b^0 violant le nombre baryonique.

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 des mesures des phases de mélange des mésons B neutres dans des processus en boucle et des 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 . L'équipe participe à la mesure des rapports d'embranchement des modes $B_{d,s} \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$, ($h^0 = K, \pi$) avec l'ensemble des 9 fb^{-1} de données disponible. Elle contient notamment trois modes de désintégration du méson B_s . Une analyse dans le plan de Dalitz du mode $B^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ est en cours. Ces analyses se poursuivent, car il s'agit d'un travail de long terme qui progresse par étapes de complexité croissante. À terme, le but est d'effectuer une analyse dépendante du temps et utilisant l'étiquetage de saveur, afin de mesurer les phases de mélange des mésons B neutres, β et β_s , dans ces processus. Dans le deuxième cas, une telle mesure n'a jamais été effectuée. Notre équipe effectue également une mesure de la section efficace de production des mésons D^{*+} et D^0 , avec les nouvelles données prises en 2023, en exploitant les désintégrations $D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ et $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$, dont les états finals sont communs avec ceux des désintégrations du méson B^0 discutées ci-dessus.

Des membres de l'équipe ont assuré en 2022 et 2023 de nombreux rôles de responsabilité dans la collaboration LHCb, entre autres la coordination du bureau *Early Career, Gender & Diversity*, des opérations de LHCb, celle du projet RTA, ainsi que celles de plusieurs groupes de travail de la collaboration. Les rôles de responsabilité liés à la jouvence de LHCb sont mentionnés plus bas. Les membres de l'équipe ont participé à l'organisation de plusieurs événements scientifiques, dont une partie a eu lieu au LPNHE. Un projet d'un membre de l'équipe a eu un financement ERC *Consolidator Grant* (terminé en 2023). Le réseau ITN-SMARTHEP finance l'une des thèses en cours et l'ANR franco-allemand ANN4EUROPE finance une autre.

Le trajectographe à fibre scintillante (SciFi)

Le trajectographe d'origine de LHCb n'aurait pas été adapté aux conditions de la prise de données du Run 3 du LHC, démarré en 2022, car le taux d'occupation est trop élevé à cause de la haute luminosité fournie. Pendant le dernier long arrêt de l'accélérateur, l'ancien trajectographe a été remplacé par le détecteur SciFi, basé sur trois stations composées de fibres scintillantes lues à leurs deux extrémités par des photomultiplicateurs en silicium (SiPM). Une photographie des stations du SciFi à la fin de la phase d'installation, avec le tube à vide et l'aimant, est montrée sur la page de couverture de ce rapport. Le nouveau système a une bonne résistance aux radiations, une fine granularité spatiale 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*.

L'implication du LPNHE a été autour de l'électronique de *Back End*, plus précisément dans le développement et l'implémentation du microcode des cartes PCIe40, spécifique au système SciFi, ainsi que du test des logiciels d'acquisition dédiés. Nous avons développé le système de monitoring du SciFi, et un ingénieur de

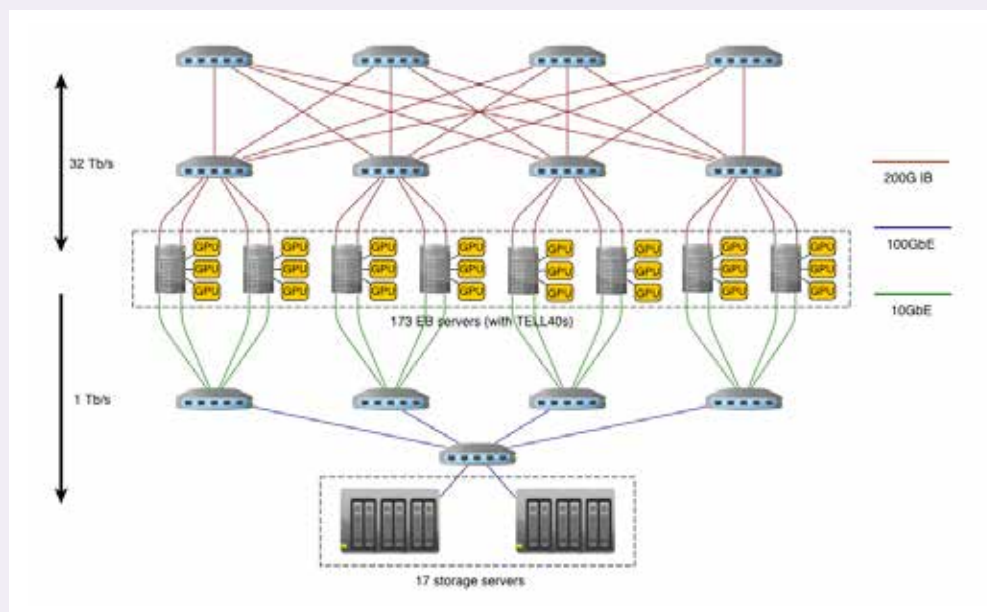
l'équipe a été le coordinateur de l'électronique *Back End* du SciFi dans la collaboration LHCb. Notre équipe a assuré l'installation et le commissioning du système, assure en continu sa maintenance et réagit en cas de problème

Le projet d'analyse en temps réel (RTA)

Une partie de la jouvence de LHCb a consisté à éliminer le premier niveau du système de déclenchement hardware, dont le taux d'acceptation maximal était de 1 MHz. Ainsi, l'expérience fonctionne avec un système de déclenchement purement logiciel qui traite la totalité des événements détectés au rythme du croisement des faisceaux du LHC d'environ 30 MHz. Le détecteur produit un débit maximal de 40 Tbit/s de données, qu'il est nécessaire de réduire afin de pouvoir les stocker. C'est la raison pour laquelle la reconstruction complète des événements est effectuée en temps réel, permettant d'éliminer la majorité des données brutes du détecteur. Ce processus et les systèmes qui l'effectuent sont au cœur du projet d'analyse en temps réel (RTA), qui a été dirigé pendant quatre années, jusqu'à fin 2022, par l'un des membres de notre équipe.

La conception d'un système de déclenchement entièrement logiciel pouvant assurer, avec le flux de données de LHCb, les performances physiques requises représente un réel défi. Une contribution du LPNHE

qui a réussi à relever ce défi est le projet Allen, qui permet d'effectuer la première étape du déclenchement, dit le HLT1, à l'aide de 200 unités de GPU. Ceci est le tout premier système de ce type dans le monde. Un schéma de ce système de déclenchement, incluant la partie Allen, est montré dans la figure ci-contre.



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.

L'équipe 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 à l'aide d'un algorithme de calcul parallèle. Ces développements, utilisant des méthodes sophistiquées, permettent 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 de l'équipe comprennent le développement d'outils de simulation du projet Allen, de tests des cartes GPU, leur installation, la vérification de leur performance, et l'assurance de la qualité des données.

CHIFFRES CLEFS

Nouveau système de déclenchement de LHCb : environ **200 GPU** traitent **4 To/s** de données, au rythme du croisement de faisceaux du LHC (**30 MHz**).

L'électronique *Back End* du trajectographe à fibres scintillantes de l'upgrade de LHCb, en état de service depuis 2022, comporte **144 cartes** et **8192 liens**.

157 articles publiés par LHCb entre janvier 2022 et décembre 2023. Au total, **807 articles** jusqu'à décembre 2023.

Chercheur.euses et doctorant.es :

C. Agapopoulou, E. Ben-Haïm, P. Billoir, M. Charles, L. Del Buono, M. Fontana, V.V. Gligorov, F. Polci, P. Vincent, R. Amalric, A. Caillet, L. Calefice, A. Correia, T. Fulghesu, F. Giasemis (officiellement au LIP6), T. Grammatico, E. Mariani, A. Scarabotto

Équipe technique :

A. Bailly-Reyre, N. Garroum, O. Le Dortz, J-L. Meunier



Une post-doctorante du groupe dans la salle de contrôle de LHCb, pendant la première prise de données à 20 MHz avec le système Allen. Les voyants verts sur l'écran confirment que tous les sous-systèmes de LHCb sont fonctionnels et indiquent la bonne condition de la prise de données.

Préparer le futur de la physique des neutrinos : de T2K à Hyper-Kamiokande



Le groupe Neutrino du LPNHE : repas commun avant l'été 2023.

Le groupe Neutrino du LPNHE (*voir photo ci-dessus*) continue ses activités sur la mesure de l'oscillation des neutrinos sur de longues distances au Japon auprès des expériences T2K et Hyper-Kamiokande (HK). La mise à niveau du détecteur proche ND280, pour laquelle l'équipe a une forte contribution, touche à sa fin et l'exploitation des nouvelles données lors de la deuxième phase de l'expérience T2K va débiter. L'équipe prépare aussi son futur avec l'expérience HK avec la consolidation de sa contribution au système de génération et de distribution d'horloge pour le nouveau détecteur lointain à Kamioka, ainsi que la préparation des analyses de physique. Deux ANR ont été obtenues en 2019 et en 2021 par des membres du groupe afin de soutenir ce programme de recherche. Les mesures de la production hadronique avec le spectromètre NA61/SHINE au CERN sont d'une importance cruciale pour réduire encore plus les incertitudes sur le flux des (anti)neutrinos dans les expériences T2K et HK.

T2K-II : Installation de la mise à jour de ND280

La deuxième phase de l'expérience T2K s'inscrit dans le contexte de la préparation du programme de physique pour Hyper-Kamiokande, avec l'amélioration du faisceau de neutrinos muoniques à J-PARC mais aussi celle du détecteur proche ND280. Le LPNHE coordonne au niveau de la collaboration la mise en œuvre de cette mise à jour et contribue au développement de la production de l'électronique de lecture des nouvelles chambres à projection tempo-

relle à grands angles (les HA-TPC). Ces nouveaux détecteurs au nombre de deux, utilisant des détecteurs Micromégas résistifs, vont permettre de mieux détecter les traces des particules chargées allant vers le haut ou le bas du détecteur, chose pour laquelle le détecteur actuel est assez peu efficace.

Les équipes techniques et scientifiques du LPNHE se sont concentrées sur la conception et la réalisation de 84 cartes d'électroniques de lecture (FEC) qui servent à la digitalisation des signaux en provenance des 576 voies d'entrée de chaque détecteur Micromegas. La production assurée par l'entreprise sous-traitante Ouestronic (à Rennes), la qualification de chacune des cartes avec un banc de test dédié, le montage et la validation des cartes sur le détecteur ont été coordonné par le LPNHE. Des tests en faisceau au CERN ont été fait en utilisant une moitié du détecteur équipé de son électronique de lecture en 2022, suivi par une campagne de prises de données avec le détecteur complet en 2023.

Une deuxième contribution technique du LPNHE est le design et la production des capots de refroidissement des cartes électroniques de lecture. Les 72 capots en aluminium nécessaires pour équiper les deux HA-TPC ont été produits par l'entreprise Chanteloup-Associés (à Bondoufle) et livrés début 2022. Tous les capots ont ainsi été montés sur les cartes électroniques, elles-mêmes installées sur la première chambre à dérive temporelle au CERN, ainsi complètement équipées.

Une dernière contribution technique est le développement du logiciel de collecte des données pour ce détecteur. En effet, après digitalisation par les FEC, les données sont récupérées par un module électronique appelé le TDCM qui les envoie ainsi vers un serveur pour écriture dans des fichiers. Ce module développé par le CEA/IRFU assure aussi la configuration de l'électronique de lecture, via un protocole de communication maison. Le LPNHE travaille ainsi au développement d'un logiciel d'acquisition de données et de contrôle de l'électronique de lecture. Une première version utilise le logiciel MIDAS et communique avec un serveur de commandes qui fonctionne sur l'un des processeurs du TDCM. Cette méthode a

pu être testée auprès des derniers tests en faisceau et implémenté en juillet 2023 sur l'expérience à J-PARC. Une nouvelle version qui prévoit l'utilisation du logiciel MIDAS directement sur les processeurs du TDCM via Linux embarqué est en cours d'élaboration ; cette implémentation permettra de remédier à des pertes de données observées lors des tests en faisceau et apporter de la stabilité au système dans son ensemble.



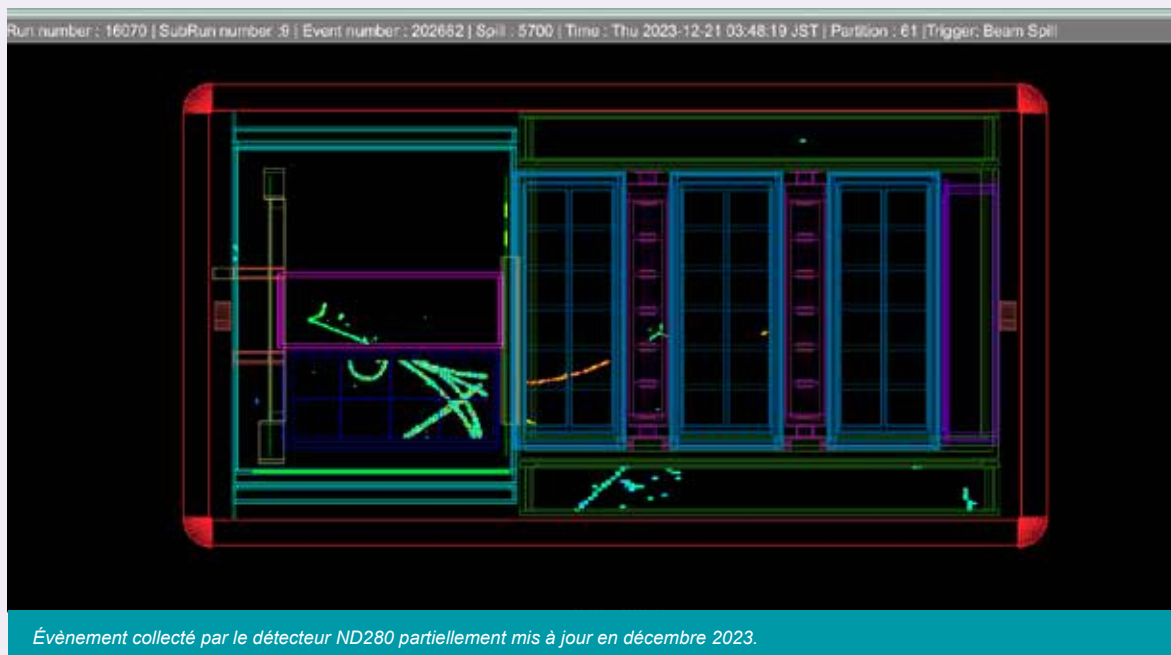
Nouveaux détecteurs (HA-TPC et SuperFGD) installés dans l'aimant du ND280. Octobre 2023.

Le groupe a aussi contribué à l'acquisition et l'exploitation de plusieurs tests en faisceaux auprès du synchrotron de DESY-Hambourg et du CERN, ainsi que des prises de données de rayons cosmiques. Un premier

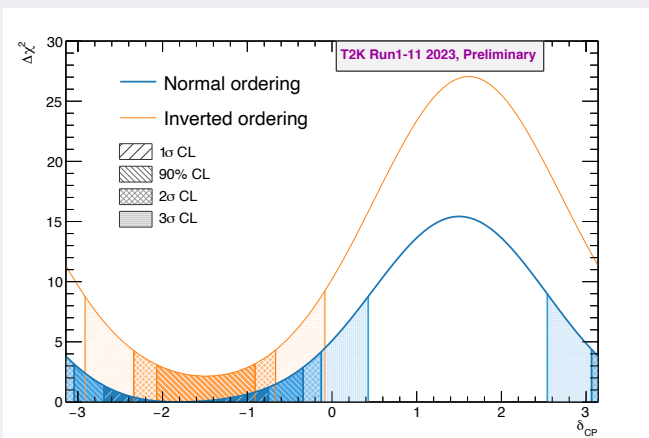
détecteur complètement assemblé a notamment pu être testé durant l'été 2023 au CERN avec des rayons cosmiques avant son expédition et installation sur le détecteur ND280 à J-PARC en août 2023. La mise en service du détecteur durant l'automne 2023 ainsi que la première prise de données avec les autres sous-détecteurs de la mise à jour constitue un des événements marquants de l'expérience T2K et du groupe Neutrino du LPNHE sur les deux années écoulées (*voir photo ci-avant*). Le second détecteur HA-TPC est en cours de production et d'assemblage au CERN et devrait être installé à J-PARC en avril 2024.

Le groupe Neutrino du LPNHE est aussi un acteur de premier plan pour la simulation et la reconstruction des particules détectées par le détecteur ND280, et particulièrement pour les HA-TPCs (*voir figure ci-dessous*). En effet, ses membres développent des nouvelles méthodes pour la simulation des traces et de la physique liée aux Micromégas résistifs et pour la reconstruction des traces dans le détecteur avec des méthodes analytiques ou basées sur de l'apprentissage automatisée (Machine Learning). Ces algorithmes sont pratiquement implémentés dans le logiciel officiel de la collaboration T2K et seront validés avec les premières données prises à l'automne 2023.

En parallèle, le groupe contribue aux analyses de physique de l'expérience T2K, que ce soit sur la future sensibilité du détecteur ND280 mis à jour ou à l'analyse des données de faisceaux dans le cadre de l'extraction des paramètres d'oscillation des neutrinos.

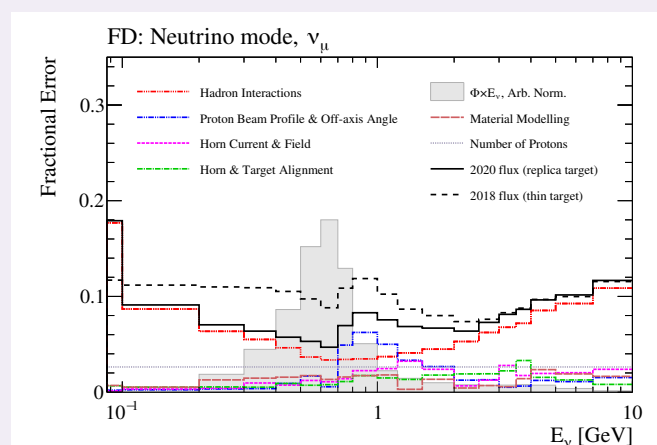


Événement collecté par le détecteur ND280 partiellement mis à jour en décembre 2023.



Les contraintes actualisées sur la phase de violation de la symétrie CP.

Sur ce dernier sujet, le groupe a conduit l'analyse des dernières données prises en janvier 2021, dont une des nouveautés consistait à l'ajout d'un nouvel échantillon lié à la détection des neutrinos électroniques au détecteur SK. Ces nouveaux échantillons et l'augmentation de la statistique ont permis une mise à jour des contraintes sur la violation de la symétrie CP (*voir figure ci-dessus*). Il est important de souligner que les incertitudes sur le flux de neutrinos sont maintenant réduites de manière significative grâce aux mesures NA61/SHINE avec la cible réplique T2K (*voir figure ci-dessous*).



Réduction des erreurs systématiques sur le flux de neutrinos dans T2K.

Produire et distribuer l'étiquetage en temps dans Hyper-Kamiokande

L'expérience Hyper-Kamiokande, qui constitue la prochaine génération d'expérience dans le domaine des neutrinos via la construction d'un nouveau détecteur par lumière Cherenkov à eau de 260 000 tonnes,

explorera un programme de physique extrêmement riche qui va de l'étude de la violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique et la mesure précise des paramètres de mélange des neutrinos à la désintégration du proton, aux neutrinos atmosphériques et aux neutrinos d'origine astronomique, en particulier venant de supernovas. Ce programme de physique entre en résonance très forte avec les activités actuelles du groupe Neutrino du LPNHE, mais aussi permettrait certaines synergies avec d'autres groupes du LPNHE. La construction des infrastructures (tunnels d'accès et caverne) dans la montagne près de Kamioka avance à bon train et devrait permettre une installation des équipements et photodétecteurs courant 2025 pour un début de remplissage de la cuve en 2026 et une prise de données en 2027.

Le groupe Neutrino du LPNHE a pu définir ses contributions au détecteur lointain de cette expérience, notamment au développement d'un système de distribution d'horloge et de synchronisation temporelle pour l'ensemble des photo-détecteurs (plus de 20 000 dans la version maximale du détecteur). Ce travail inclut aussi la mise à jour du système de synchronisation en temps auprès de l'accélérateur de J-PARC, permettant ainsi de maximiser le potentiel de physique issue de la mesure du temps de vol des neutrinos. De plus, le groupe contribuera à l'assemblage de l'électronique d'HK au CERN ainsi qu'à l'effort global de calcul de la collaboration via la grille de calcul du CC-IN2P3. Ces contributions ont été présentées et approuvées dans leur ensemble lors de deux conseils scientifiques de l'IN2P3 (octobre 2021 et octobre 2022) et d'une revue KDP2 par la direction de l'IN2P3.

Après une phase de R&D sur le système de temps terminé en 2022, le collaboration HK a approuvé la proposition faite par le groupe Neutrino du LPNHE pour le design de la définition de la base de temps et de distribution de l'horloge. Cette base de temps s'appuie sur la combinaison de plusieurs horloges atomiques de précision pour la construction d'une fréquence de référence stable et est comparée au temps universel (UTC) grâce à des récepteurs recueillant les informations de temps des constellations de satellites de navigation GPS et Galileo, cette comparaison permettant de synchroniser l'arrivée d'un paquet de neutrinos depuis l'accélérateur à J-PARC avec la détection d'événements dans le détecteur d'HK. La création du système de génération de base de temps est le fruit d'une collaboration du LPNHE et du laboratoire des



Tests de la réception des antennes GNSS sur le site de Kamioka à l'été 2023.

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. Une réplique du système est en cours s'établissant sur le campus de Jussieu avec notamment l'installation d'une antenne GNSS sur le toit de la tour 13 sur le campus de Jussieu, l'utilisation du lien avec la base de temps du SYRTE via un lien fibré White Rabbit et d'une horloge Maser à Hydrogène Passive extrêmement stable. Les premières mesures avec l'antenne et le récepteur GNSS ont été effectuées au Japon par les membres du groupe pendant l'été 2023 (voir photo ci-dessus).

Le deuxième élément fondamental de ce système est le système de synchronisation dont l'objectif est la synchronisation de tous les modules d'électronique de lecture des signaux des photo-détecteurs en établissant la base de temps commune. Cette fréquence fondamentale ainsi que des informations supplémentaires de contrôle sont distribuées par l'intermédiaire d'un réseau de 80 cartes électroniques de distribution à deux niveaux. 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.

En parallèle, le groupe prépare les futures analyses de l'expérience, notamment des études de sensibilité sur les paramètres de l'oscillation des neutrinos (voir figure ci-contre) mais aussi le développement de la reconstruction des anneaux Cherenkov dans le détecteur lointain. Ce travail s'appuie sur l'expertise du groupe dans ces thématiques obtenues par son implication dans la reconstruction et les analyses actuelles de T2K. Au-delà de ces thématiques, l'expé-

rience HK est l'opportunité d'étendre le champ d'investigation du groupe notamment avec la détection de neutrinos de supernovas et de l'astrophysique des particules multi-messagères, une invitation à laquelle le groupe répond présent.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Pierre Billoir, Adrien Blanchet, Alain Blondel, Gonzalo Diaz Lopez, Jacques Dumarchez, Claudio Giganti, Mathieu Guigue, Marco Martini, Boris Popov, William Saenz-Arevalo, Sergey Suvorov, Marco Zito, Anaëlle Chalumeau, Claire Dalmazzone, Lucile Mellet, Viet Nguyen, Lavinia Russo, Ulysse Virginet, Uladzislava Yevarouskaya

Équipe technique :

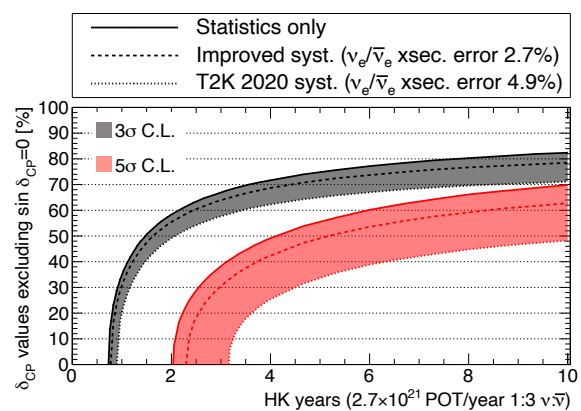
Jean-Marc Parraud, Francois Toussenet, Eric Pierre, Julien Coridian, Yann Orain, Stefano Russo, Vincent Voisin, David Martin

CHIFFRES CLEFS

35 PB de données seront produites par l'expérience HK après 10 ans d'exploitation.

Record de la puissance du faisceau de proton à J-PARC à **710 kW** en 2023

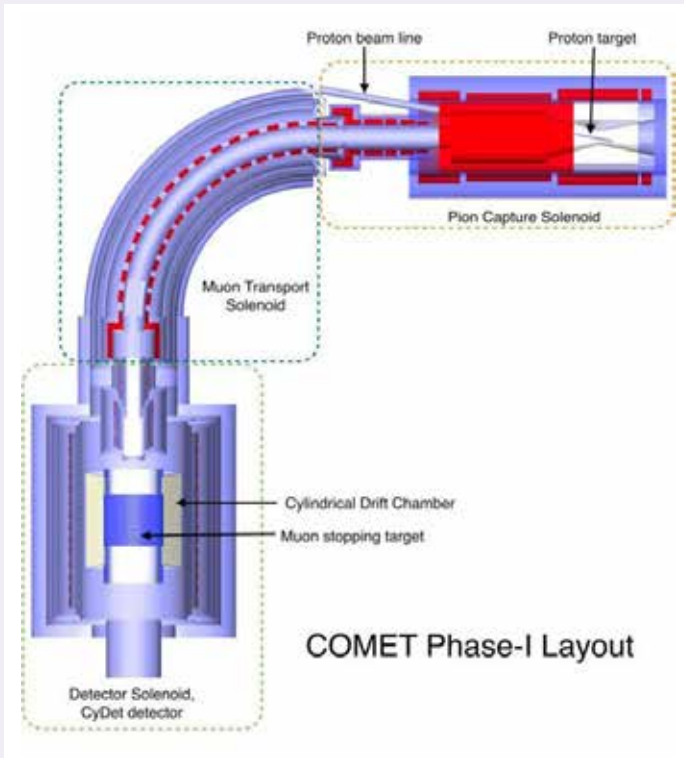
180 millions d'évènements collectés avec la cible réplique de T2K par NA61/SHINE pendant l'été 2022.



Hyper-K preliminary
True normal ordering (known)
 $\sin^2\theta_{13}=0.0218\pm 0.0007$, $\sin^2\theta_{23}=0.528$, $\Delta m_{32}^2=2.509\times 10^{-3}eV^2/c^4$

Sensibilité attendue de l'expérience HK à la violation de la symétrie CP en fonction du nombre d'années.

Expérience COMET à J-PARC



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 1 T.

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 monoénergétique 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 (voir figure ci-contre) permettra de caractériser le faisceau et les divers bruits de fond ainsi que de tester les détecteurs qui permettront d'améliorer la mesure de l'électron que l'on espère identifier et mesurer avec une plus grande précision dans la Phase II.

En février 2023, un ensemble de préparatifs, qui ont été appelés Phase- α ont commencés. La Phase- α profite de la livraison anticipée du faisceau de protons de 8 GeV vers COMET. L'expérience fonctionne sans l'installation de son solénoïde de capture de pions (voir figure ci-dessous) 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.

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



Bobines supraconductrices de gros calibre entourent la cible de production de pions pour la capture de ceux-ci avec un grand angle solide. Le faisceau de muons est produit à partir de désintégrations de pions dans un champ magnétique puissant généré par des bobines solénoïde supraconductrices. Le champ magnétique est conçu pour avoir un pic de 5 T au niveau de la cible.

autres l'arithmétique des intervalles et l'homologie persistante ainsi qu'à la gestion du calcul et des simulations de l'expérience, en étroite collaboration avec les ingénieurs du Centre de Calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3). 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.

Chercheurs :

Wilfrid da Silva, Luigi Del Buono

Équipe technique :

Patricia Warin-Charpentier

CHIFFRES CLEFS

10¹⁸ muons doivent être accumulés en 150 jours.





Rayons Cosmiques et Matière Noire

- **L'observatoire gamma de très hautes énergies *Cherenkov Telescope Array (CTA)* en construction**
 - Prospectives sur la variabilité des noyaux actifs de galaxie avec CTA
 - Effets temporels intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxie et violation de l'invariance de Lorentz
 - Production et développement pour les cartes *Front End Board* pour NectarCAM
 - Calibration de la caméra NectarCAM
- **Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec l'expérience H.E.S.S.**
 - Études astrophysiques des noyaux actifs de galaxies
 - Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux AGN
 - Un dernier tour de vis – la fin des activités techniques sur le projet H.E.S.S.
- **Premier résultats de DAMIC-M sur la recherche de matière noire**
 - Technique
 - Science
- **Les premières données GRAND**
 - Les prototypes GRAND
 - R&D GRAND10k
- **Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENON**
 - Calcul et traitement des données
 - Analyse
 - Simulation
 - Futurs projets et l'R&T avec XeLab



Rayons Cosmiques et Matière Noire

Le groupe de recherche « rayonnement cosmique et matière noire » interroge le contenu de l'Univers en ses deux infinis. À grande échelle, galactique et extragalactique, les études de sources astrophysiques axées autour des phénomènes transitoires révèlent la composition, la structure et la dynamique d'objets célestes tels que les pulsars, les noyaux actifs de galaxie ou les sursauts gamma. Dans le domaine des rayonnements gamma, l'expérience H.E.S.S. – un réseau de cinq télescopes à effet Cherenkov situé dans l'hémisphère sud – officie. À plus long terme, le projet CTA de réseaux conjoints, nord et sud, composé d'une centaine de télescopes de petite, moyenne et grande tailles – de relativement grand champ – augmentera significativement la population de sources connues de même que leur compréhension. Alors que l'expérience GRAND, un réseau d'environ 200 000 antennes radios, à terme, déployé sur une vingtaine de sites à travers le monde, s'attelle à l'étude d'autres médiateurs bien plus furtifs que sont les neutrinos pour explorer ce domaine, un prototype de plusieurs centaines d'antennes est en cours de déploiement. Si les télescopes à effet Cherenkov officient dans le domaine en énergie de 10^{12} eV, l'expérience GRAND captera des neutrinos de plus de 100 000 fois plus énergétiques.

La compréhension de ces sources transitoires, émettrices de photons gamma, permet également de confronter indirectement des concepts fondamentaux de relativité tel que l'invariance de Lorentz, qui est l'un des trois piliers du principe d'équivalence. En scrutant les arrivées temporelles des photons émis par ces sources en fonction de leur énergie et de leur distance, mais aussi en effectuant des études de populations, il est envisagé de déceler des écarts temporels tenus par rapport aux prédictions des modèles classiques de propagation des rayonnements électromagnétiques, révélant des variations dans la vitesse de propagation de ceux-ci.

Bien au-delà des dimensions évoquées précédemment, les observations cosmologiques révèlent l'existence d'une matière remplissant les grandes structures de l'Univers et bien plus abondante que ne laisse entrevoir les observations astrophysiques. Si, par le passé, des recherches indirectes ont été menées, par les acteurs précédents, pour explorer et comprendre la nature de cette matière – dite matière sombre ou « noire » car échappant à toute interprétation –, depuis quelques années, un nouvel axe de recherche qualifié de direct s'est développé

au laboratoire. Quelles que soient les approches adoptées, ces travaux s'effectuent dans le cadre d'une interprétation corpusculaire de la matière noire sous la forme de particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire, dénommées WIMP.

L'approche de détection directe consiste à déceler une rencontre fortuite entre un constituant de cette matière noire et l'une des composantes d'un dispositif expérimental. Une collision élastique ou inélastique entre un WIMP et le noyau d'un atome peut produire un signal détectable par les expériences actuelles. Il peut s'agir du recul du noyau percuté, de la relaxation du noyau excité par le choc ou de l'épluchage du cortège électronique de ce dernier lors de la rencontre. De nombreuses techniques expérimentales et d'analyses peuvent être mise en œuvre dans ces études selon le signal recherché. L'expérience DAMIC met en œuvre des CCD. La charge produite par la collision d'un WIMP ionise à son tour le milieu. Toutes ces charges sont collectées dans les portes des pixels où elles sont maintenues jusqu'à la lecture du réseau. Lors de leur propagation, les charges diffusent transversalement en dérivant vers les portes, avec une variance spatiale proportionnelle au temps de transit. Il existe donc une corrélation entre la diffusion latérale de la charge collectée et la profondeur de l'interaction, qui peut être utilisée pour une reconstruction tridimensionnelle du lieu de l'interaction. Les expériences DarkSide et XENON, quant à elles, utilisent des chambres à projection temporelle cylindriques remplies d'argon et de xénon respectivement. Ces milieux sont maintenus dans un état biphasé où une phase gazeuse surmonte un volume à l'état liquide. Une collision dans la phase liquide générera un premier signal prompt de scintillation. Les électrons éjectés dans l'événement dériveront sous l'application d'un champ électrique jusqu'à la partie gazeuse des détecteurs où ils seront fortement accélérés et engendreront un second signal de scintillation, retardé par rapport au premier. Les deux signaux sont collectés aux extrémités haute et basse du cylindre. La différence de temps entre ces deux signaux permet à la fois de distinguer les bruits de fond mais également de reconstruire la position de l'événement dans les trois dimensions. Si DAMIC opère dans la région des WIMPs de basses masses, aux alentours du MeV/c^2 , les deux autres expériences ont une plus grande sensibilité à plusieurs dizaines de GeV/c^2 .

L'observatoire gamma de très hautes énergies *Cherenkov Telescope Array* (CTA) en construction

Le *Cherenkov Telescope Array* (CTA) constituera le premier observatoire astronomique en rayons gamma de très hautes énergies au sol. Avec plusieurs dizaines de télescopes répartis sur deux sites, à la Palma (Canaries) dans l'hémisphère Nord, et dans le désert d'Atacama (Chili) au Sud, CTA présentera une couverture complète du ciel de quelques dizaines de GeV à plusieurs centaines de TeV. Trois tailles de télescopes permettra cette large réponse en énergie, avec les télescopes de grande taille (LST pour *Large-Sized Telescopes*), dont un premier modèle est en opération sur le site Nord depuis 2018, sont spécialisés dans la détection de photons gamma aux plus basses énergies; les télescopes de taille intermédiaire (MST pour *Medium-Sized Telescopes*) constitueront le cœur de réseau, sensible de quelques centaines de GeV à quelques dizaines de TeV; les télescopes de petites tailles (SST pour *Small-Sized Telescopes*), répartis sur quelques kilomètres carrés, seront dédiés aux plus hautes énergies, de quelques dizaines à quelques centaines de TeV.

Avec initialement 14 MST et 37 SST, CTA-Sud donnera priorité aux sources Galactiques et en particulier à la recherche de PeVatrons. Au Nord, 4 LST et 9 MST observeront préférentiellement les objets extragalactiques, dont les plus hautes énergies sont atténuées par le fond diffus extragalactique. Avec une sensibilité dix fois supérieure par rapport aux expériences comme H.E.S.S., MAGIC ou VERITAS, CTA surpassera celles-ci à complétion à l'horizon 2027.

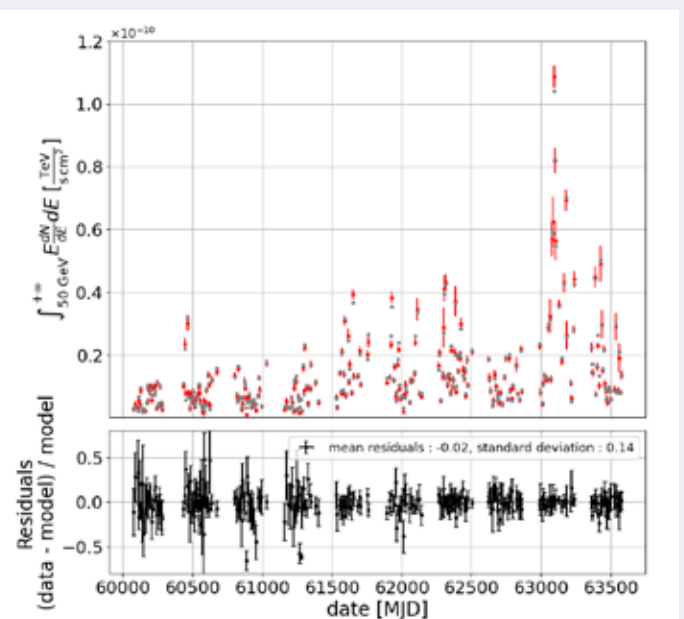
Le groupe CTA du LPNHE est impliqué le projet sur deux grands aspects. Tout d'abord, une carte électronique d'acquisition rapide, pour la caméra NectarCAM qui équipera les MST du site Nord, a été élaborée au laboratoire. D'autre part, le groupe est impliqué dans diverses études de perspectives des résultats scientifiques attendus avec CTA, en particulier portant sur les objets extragalactiques comme les noyaux actifs de galaxie et l'influence d'effets fondamentaux sur la propagation des rayons gamma depuis ces sources.

Prospectives sur la variabilité des noyaux actifs de galaxie avec CTA

Notre groupe a développé ces dernières années un pipeline de simulations et d'analyse de phénomènes temporellement variables, en amplitude mais aussi spectralement, *ctaagnvar*, basé sur le *Science Tool gammapy* officiellement retenu par CTAO pour les futures analyses haut niveau des données de CTA¹.

Dans le cadre de la révision des stratégies d'observation des différents Key Science Projects actuellement en cours au sein de CTA, cet outil est utilisé pour affiner les résultats scientifiques attendus avec CTA pour la surveillance à long-terme d'une quinzaine d'AGN (*Zech et al., 2019, voir aussi figure ci-dessous*), ainsi que pour le suivi d'éruptions d'AGN. Très versatile, ce pipeline peut prendre en compte la visibilité des différentes sources étudiées, et part soit d'une extrapolation à très hautes énergies des catalogues *Fermi-LAT*, soit de modèles

¹<https://www.cta-observatory.org/ctao-adopts-the-gammapy-software-package-for-science-analysis/>



Courbe de lumière reconstruite et ses résidus pour le noyau actif de galaxie BL Lac. Les points gris correspondent aux valeurs injectées, les valeurs reconstruites sont en rouge.

phénoménologiques d'émission multi-longueurs d'onde dépendants du temps appliqués à des éruptions observées avec les instruments actuels, soit d'une hypothèse sur le spectre de puissance des AGN, basée sur des observations en rayons X ou de micro-quasars et mis à l'échelle de systèmes hébergeant un trou noir supermassif. Nous avons ainsi dans le groupe la responsabilité de la production de ces différentes simulations de courbes de lumière, ainsi que de leur reconstruction. Ceci a fait l'objet d'une présentation à la conférence ICRC à l'été 2023 par G. Grolleron.

Au printemps 2022, nous avons également activement participé à l'élaboration des modèles de sources extragalactiques qui seront utilisés pour procéder aux simulations d'événements gamma qui seront rendus publics dans le cadre du *Science Data Challenge* de CTAO attendu courant 2024. Le pipeline *ctaagnvar* a ainsi été utilisé dans ce cadre pour proposer un format de données pour prendre en compte la variabilité spectrale des sources, qui n'était alors pas encore nativement implémentée dans *gammapy*.

Effets temporels intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxie et violation de l'invariance de Lorentz

Comme indiqué dans la section concernant les activités H.E.S.S., le groupe mène un travail de modélisation des jets d'AGN en collaboration avec le LUTH (Meudon) depuis plusieurs années. Le modèle simple étudié (modèle à une zone, purement leptonique) a permis d'obtenir des décalages temporels qui, se-

lon les paramètres choisis, peuvent être importants. Depuis janvier 2023 et l'arrivée d'un post-doctorant (A. Rosales de Leon, LPNHE/LUTH), le groupe travaille à évaluer les capacités de CTA pour la détection de ces décalages temporels, et pour leur séparation avec d'éventuels effets de propagation comme ceux dus à une violation de l'invariance de Lorentz. Les distributions en énergie et les courbes de lumière produites par le modèle de jet d'AGN dans différents scénarios d'éruptions sont transmises à l'outil *ctaagnvar* développé par le groupe permettant de simuler la réponse de CTA dans des conditions réalistes (voir ci-dessus).

À partir des données ainsi simulées, le décalage temporel est reconstruit afin d'être analysé. Les résultats préliminaires obtenus montrent qu'avec la configuration alpha du site Nord de CTA, ces analyses seront délicates, à moins d'avoir affaire à des éruptions exceptionnelles. Dans les prochains mois, ces études vont être généralisées afin d'étudier différents types d'éruption et l'outil de reconstruction du décalage temporel sera optimisé afin d'obtenir la meilleure sensibilité possible aux effets intrinsèques. Les résultats finalisés feront l'objet d'une publication en 2024.

Production et développement pour les cartes *Front End Board* pour NectarCAM

Notre groupe a la responsabilité de fournir 2520 cartes FEB version 6 pour la réalisation de 9 cameras NectarCAM. Cette carte (*voir figure ci-dessous*) est le système central qui s'intègre dans un module individuel de détection, lequel est constitué d'un côté de



Carte Front End Board (FEB) version 6 développée au LPNHE, équipant la caméra NectarCAM.

7 photomultiplicateurs pilotés en hautes tensions par une carte Interface Board (IB), développée par l'IRAP, et de l'autre du Digital Trigger Back Plane (DTBP), développé par DESY-Zeuthen, qui assure la réalisation du déclenchement et sa distribution à toutes les FEBs de la camera après validation au niveau de la camera.

La FEB permet d'amplifier, mémoriser et numériser les données provenant de l'IB, pour ensuite les formater, packager en UDP et transférer via le DTBP au serveur caméra. Le FPGA, composant central de la FEB intégrant un micrologiciel embarqué, associé au Nectar Module Controller (NMC), qui est un serveur OPC-UA, permet de configurer et gérer tous les paramètres du module.

Le développement hardware, micrologiciel et logiciel NMC ont été validés dans sa majorité en 2021 avant le lancement en production. Depuis, des ajustements réguliers au niveau micrologiciel et logiciel sont apportés afin d'améliorer la relecture et le formatage des données, la réduction de bruit, la gestion de la mémoire et la programmation à distance de tous les micrologiciels (FEB, IB, DTBP).

Nous avons aussi déployé deux bancs de test automatisés à Ouestronic. Ils sont en rack, pilotés par une interface logicielle sous python 3, portée sous forme de conteneur Docker, facilitant ainsi les mises à jour.

Concernant la production, pour rappel, en 2021, nous avons lancé un appel d'offre pour la réalisation de 2520 FEBs, lequel a été attribué à Ouestronic. Malheureusement, à cause de la crise mondiale sur les semi-conducteurs, seulement 11 cartes de pré-série sur 25 ont pu être réalisées. Ces cartes ont tout de même été qualifiées dans la caméra, ce qui a permis de valider notre process de fabrication durant le premier semestre 2022.

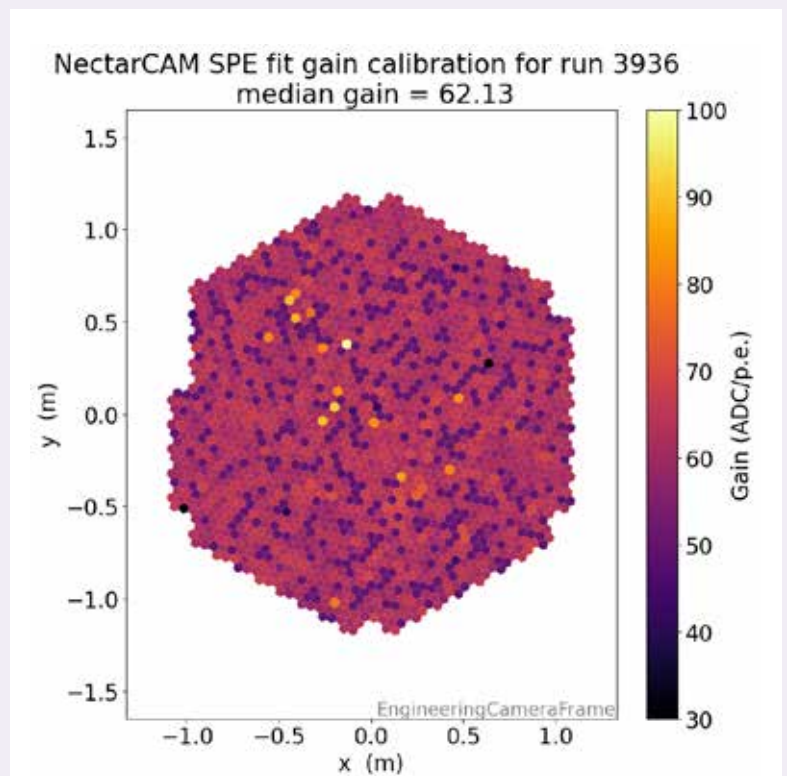
Début 2023, les premiers composants spécifiques ASICs et FPGA ont enfin été livrés, permettant en mars 2023, le début de la production des 2520 cartes. La première livraison en juin 2023 a servi à mettre à jour l'ensemble de

la camera de qualification. La fin de la production est planifiée pour mi-2025.

Calibration de la caméra NectarCAM

Dans le cadre de NectarCAM, nous participons également à l'implémentation logicielle des algorithmes de calibration et des outils de suivi de qualité des données NectarCAM. Située juste en sortie de l'*Event Builder* de la caméra, et en amont du pipeline de discrimination et reconstruction des événements *ctapepe*, cette brique logicielle, *nectarchain*, est activement élaborée, testée, organisée et maintenue par des membres de notre groupe (*Grolleron et al., 2023*).

Nous sommes ainsi impliqués dans l'implémentation des algorithmes d'ajustement en photo-électronique unique, permettant de caractériser le gain de la caméra NectarCAM avec une précision meilleure que 4% sur l'ensemble des pixels (*Caroff et al., 2019, voir aussi figure ci-dessous*). Nous avons également mis en place l'ensemble de la suite d'intégration continue de ce paquet python, sa publication sur des dépôts de



Gain calculé sur la caméra NectarCAM en utilisant l'algorithme d'ajustement SPE développé par Caroff et al. (2019), appliqué à un flatfield acquis à basse illumination.

paquet pour aider les utilisateurs à l'installer et à l'utiliser, ainsi que la construction automatique d'image de conteneurs Singularity/Apptainer, ce qui permettra d'aider grandement au déploiement logiciel lors

d'analyses de runs NectarCAM sur la grille de calcul Européenne EGI à l'aide de DIRAC. Le logiciel *nectarchain* a également été présenté par G. Grolleron à la conférence internationale ICRC à l'été 2023.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Julien Bolmont, Floriane Cangemi, Jean-Philippe Lenain, Alberto Rosales de Leon, Guillaume Grolleron, Ugo Pensac

Équipe technique :

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

CHIFFRES CLEFS

2520 FEB v6 en production.

15 noyaux actifs de galaxies surveillés sur 10 ans.

206 commits sur le logiciel de calibration pour NectarCAM.

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

Études astrophysiques des noyaux actifs de galaxies

Le groupe du LPNHE est impliqué depuis de nombreuses années dans l'étude des sources astrophysiques au TeV, en particulier celles peuplant l'univers lointain (sources extragalactiques). Parmi celles-ci, les noyaux actifs de galaxie (AGN, de l'anglais *Active Galactic Nuclei*) ont un intérêt particulier dans la mesure où certains d'entre eux présentent une variabilité rapide. Cette variabilité rend possible l'étude des délais spectraux, les écarts temporels entre photons d'énergies différentes (voir la rubrique suivante).

L'équipe assure depuis plusieurs années le suivi systématique des alertes provenant d'autres instruments lorsqu'une source transitoire montre un niveau d'activité supérieur à la normale. On rappellera qu'un outil essentiel à ce suivi, FlaapLUC, a été développé au laboratoire il y a quelques années

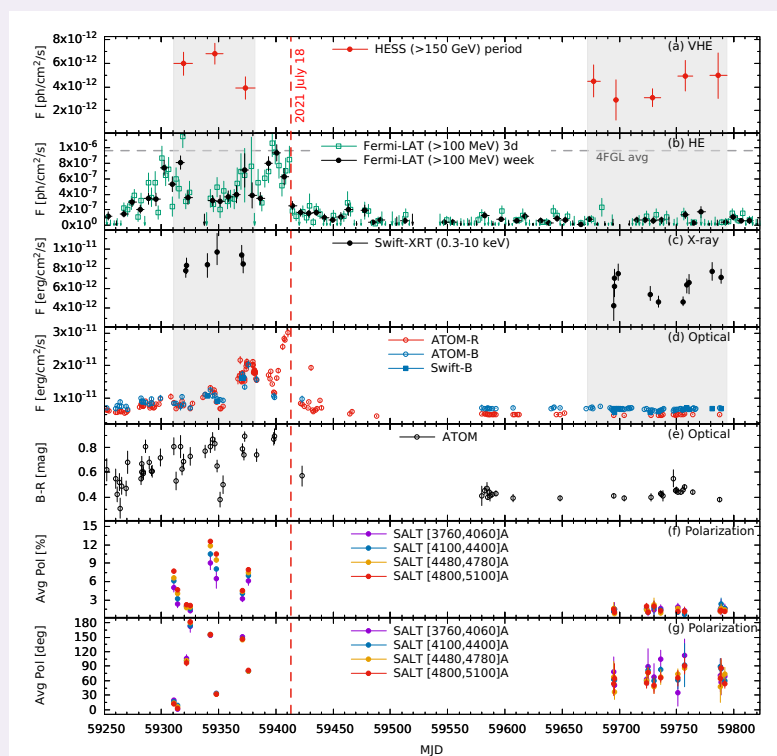
(J.-P. Lenain). Au cours de la période couverte par ce rapport d'activité, l'équipe du LPNHE a été impliquée dans plusieurs analyses de blazars, des AGN particuliers dont le jet émet dans notre direction et qui montrent une luminosité accrue et souvent une variabilité importante. On mentionnera par exemple les participations aux analyses réalisées sur deux blazars en particuliers, tous les deux du sous-type quasar à spectre radio plat (FSRQ pour *Flat Spectrum Radio Quasars*) : PKS 0346-27 (F. Cangemi) et PKS 1510-089 (J.-P. Lenain).

Le cas de PKS 1510-089 mérite qu'on s'y arrête. C'est souvent les périodes de forte activité des blazars qui donnent lieu à un signal accru et qui permettent des progrès sur notre compréhension des mécanismes d'émission et d'accélération. Dans le cas de PKS 1510-089, c'est un flux très bas par rapport à son niveau d'émission habituel qui a été observé par H.E.S.S. et *Fermi* dans le domaine gamma, *Swift* en X et ATOM

dans le domaine visible (*voir figure ci-dessous*). Le flux a ainsi baissé d'un facteur 10 dans le domaine gamma et d'un facteur 5 en optique en juillet 2021. En octobre 2021, le flux mesuré par H.E.S.S. (très hautes énergies) et par *Swift* (domaine X) a repris son niveau initial, mais pas celui mesuré par *Fermi* (hautes énergies) et ATOM (optique). Cette différence de comportement entre les très hautes énergies et les X d'une part, et les hautes énergies et l'optique d'autre part suggère que ces composantes ont pour origines des régions d'émission différentes. Deux possibilités sont avancées pour expliquer la baisse des composantes de haute énergie et optique : le jet habituellement dirigé vers la Terre a pu se désaxer, diminuant ainsi l'effet d'amplification dû au boost de Lorentz dans le jet, ou bien il y a eu une brusque perte d'efficacité de l'émission de photon dans le jet. Ces observations auront certainement des implications en vue d'une meilleure compréhension des effets temporels tels que ceux étudiés par le groupe, évoqués dans le paragraphe ci-après.

Décalages spectraux : effets de propagation et effets intrinsèques aux AGN

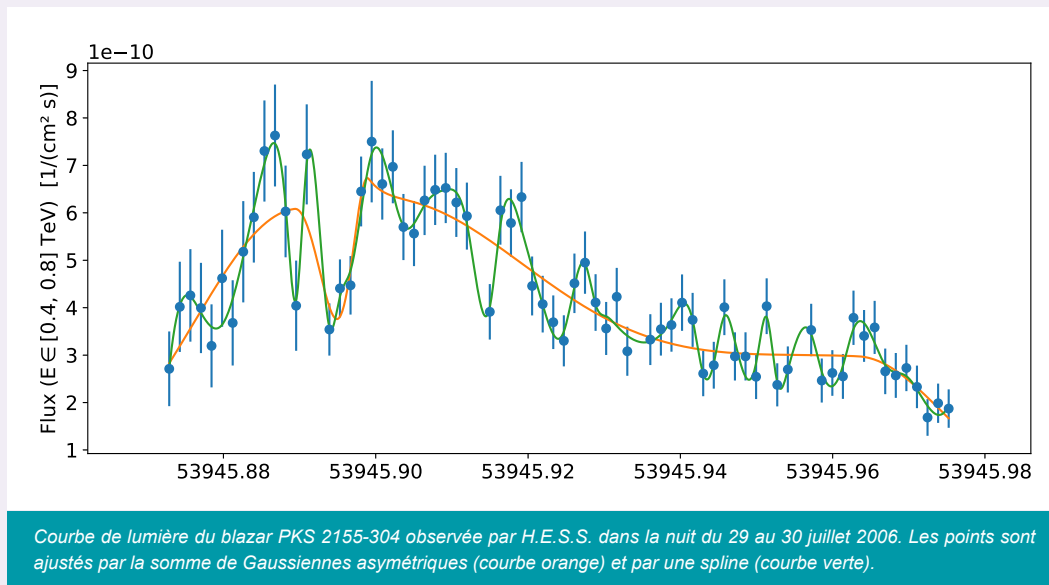
Le groupe d'astronomie gamma du LPNHE s'est spécialisé depuis environ 15 ans dans les recherches concernant les décalages temporels dépendant de l'énergie qui peuvent être observés à l'aide des sources gamma astrophysiques. Ces décalages temporels, encore appelés décalages ou délais spectraux peuvent avoir deux origines différentes. Ils peuvent être dus aux mécanismes d'accélération et d'émission au sein même des sources, appelés « décalages temporels intrinsèques ». Ils peuvent également provenir d'effets de propagation comme par exemple ceux liés à la violation d'invariance de Lorentz (VIL) induite, dans certains modèles, par la nature quantique de l'espace-temps. Depuis 2015, le groupe développe les deux thématiques en parallèle. Du côté de la recherche d'effets de propagation, ces deux dernières années ont été marquées par la première publication du groupe de travail commun constitué avec les collaborations H.E.S.S., MAGIC et VERITAS (2022). Cette publication concernait la technique d'analyse statistique, basée sur la méthode de vraisemblance. Rejoint en 2023 par la collaboration LST exploitant le premier grand télescope du réseau CTA-Nord, le groupe de travail a maintenant pour objectif de réaliser et de publier une analyse combinée de toutes les données disponibles dans les quatre expériences. Le travail d'analyse (ou de ré-analyse) des données de H.E.S.S. a donc commencé et se poursuivra dans les prochaines années (U. Pensec, J. Bolmont). Au moment de la rédaction de ce rapport d'activités, les travaux se concentrent sur deux axes : l'étude de différents scénarios d'évolution du décalage temporel avec la distance des sources, et l'analyse des données de l'éruption du blazar PKS 2155-304 survenue dans la nuit du 29 au 30 juillet 2006. Ce lot de données est exceptionnel, avec une significativité statistique de 254σ et une variabilité rapide propice aux études temporelles (*voir figure ci-dessous*). Mis à disposition de la communauté par la collaboration H.E.S.S., il n'avait pas encore été analysé pour la recherche de VIL, et promet des résultats intéressants. Il servira de lot de référence à la publication de l'article



Courbes de lumière montrant l'évolution du flux en fonction du temps pour la source PKS 1510-089 entre janvier 2020 et mai 2022 dans différentes gammes en énergie. Une diminution importante du flux dans toutes les énergies est observée le 18 juillet 2021. L'émission reprend seulement en X et au dessus de 150 GeV en octobre 2021.

à disposition de la communauté par la collaboration H.E.S.S., il n'avait pas encore été analysé pour la recherche de VIL, et promet des résultats intéressants. Il servira de lot de référence à la publication de l'article

à disposition de la communauté par la collaboration H.E.S.S., il n'avait pas encore été analysé pour la recherche de VIL, et promet des résultats intéressants. Il servira de lot de référence à la publication de l'article



présentant la combinaison des données de H.E.S.S., LST, MAGIC et VERITAS et permettra à quiconque intéressé de reproduire l'analyse.

Concernant les effets temporels intrinsèques, les travaux sur la modélisation des blazars se poursuivent en collaboration avec le LUTh (Meudon). Les travaux de C. Levy (thèse soutenue en 2021) avaient montré la possibilité d'obtenir des décalages temporels intrinsèques significatifs, plusieurs centaines de secondes par TeV dans certains scénarios leptoniques à une zone. Ils avaient aussi permis de montrer une forte corrélation entre les délais temporels dans le domaine gamma et le domaine X. Depuis le printemps 2023, un travail de confrontation du modèle avec les données de H.E.S.S. a débuté (U. Pensac, J. Bolmont, en collaboration avec H.Sol du LUTh). Là encore, l'éruption du blazar PKS 2155-304 survenue dans la nuit du 29 au 30 juillet 2006 fournit un lot de données idéal avec des données disponibles à la fois au TeV et en X (*Chandra*). Dans les prochains mois, le modèle sera également étendu aux processus lepto-hadroniques pour étudier les décalages temporels intrinsèques dans ces scénarios.

Un dernier tour de vis – la fin des activités techniques sur le projet H.E.S.S.

Après l'arrêt de la caméra française du télescope CT5 fin 2019, 2048 photo-multiplicateurs (PM) équipant cette caméra et quelques dizaines d'autres de rechange restaient inutilisés. Compte-tenu du vieillissement des PM des quatre petits télescopes (CT1 à CT4), en service

depuis 2002, la collaboration a décidé de se donner la possibilité d'utiliser les PM de CT5 sur les caméras des télescopes CT1-4 et a chargé les équipes du LPNHE et du LLR de mener à bien cette mission. Puisque les PM et leurs supports mécaniques n'ont pas la même longueur dans CT1-4 et dans CT5, une adaptation mécanique était nécessaire. La conception des nouvelles pièces a été réalisée par P. Manigot et E. Edy du LLR, qui ont également supervisé la fabrication par un industriel. Plusieurs fois reportées du fait de la pandémie de COVID-19, deux missions sur site ont pu avoir lieu en 2022, l'une au mois de mai, la deuxième au mois d'octobre, cette dernière en parallèle avec la réunion générale de la collaboration organisée à Windhoek. Au total, plusieurs jours ont été nécessaires à M. De Naurois (LLR), F. Toussanel et J. Bolmont pour retirer les blocs PM de la caméra CT5, les démonter, et changer les pièces (*voir photo p. 54*). Début 2023, l'équipe de DESY a testé pour la première fois, et avec succès, les nouveaux blocs dans une caméra de CT1-4, ouvrant la voie à un remplacement systématique des PM montrant le plus fort vieillissement. Cette possibilité de jouvence des photodétecteurs vieillissants est un point clé permettant à la collaboration de se projeter avec confiance dans une possible extension des prises de données jusqu'en 2028.

Il est important de souligner que ces deux missions réalisées en 2022 mettent un terme à 25 années d'activités techniques du LPNHE sur le projet H.E.S.S. C'est en effet en 1998 que la décision est prise d'équiper les caméras de H.E.S.S. avec l'électronique proposée par le laboratoire basée sur l'utilisation de mémoires analogiques. L'équipe du laboratoire a donc eu la charge de

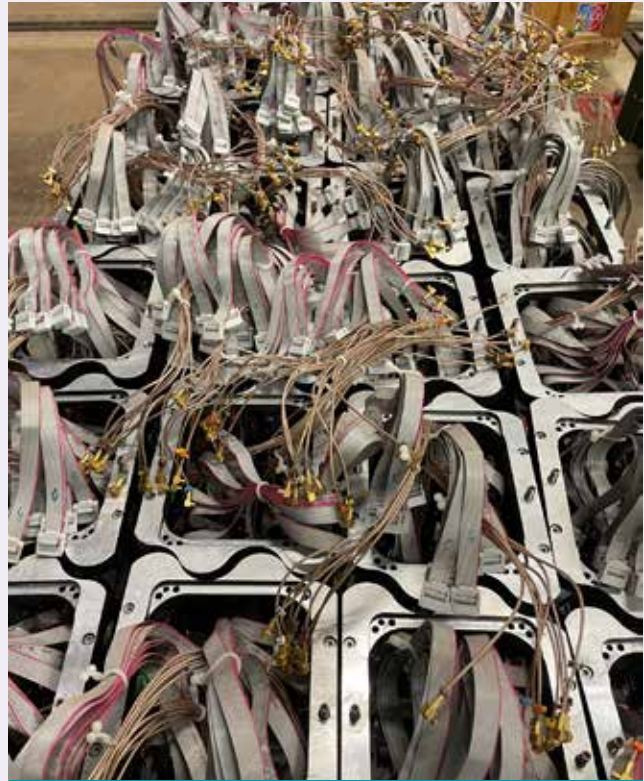
la conception de l'électronique des caméras de CT1-4, puis de celle de CT5 à partir de 2005. Elle a supervisé la fabrication et le câblage des circuits imprimés et a participé à l'installation des caméras sur le site. Ses membres ont assuré la maintenance à distance (astreinte téléphonique) et sur site des caméras, avec en moyenne une mission par an jusqu'en 2019. Cette expérience exceptionnelle, reconnue par la communauté d'astronomie gamma au sol, a permis au LPNHE d'obtenir la responsabilité de la conception et de la fabrication de l'électronique frontale qui équipera 9 télescopes MST du site Nord de CTA (*voir chapitre CTA p.48*).

Chercheur.euses et doctorant.es :

Julien Bolmont, Floriane Cangemi, Jean-Philippe Lenain, Guillaume Grolleron, Ugo Pensac

Équipe technique :

François Toussenet



Quelques blocs PM de la caméra de CT5 au cours de l'opération de remplacement des pièces mécaniques en mai 2022.

CHIFFRES CLEFS

3634 vis dévissées et revissées lors des deux dernières missions sur le site.

25 ans : la période sur laquelle s'étalent les activités techniques du LPNHE sur le projet (1998-2023).

Plus de **20 000 heures** d'observation cumulées par H.E.S.S. au cours de ses 20 années d'existence.

Premier résultats de DAMIC-M sur la recherche de matière noire

DAMIC-M est devenu depuis 2019 et pour six ans un projet d'importance dans la recherche directe de matière noire à l'IN2P3. L'installation d'un détecteur prototype (la Low Background Chamber ou LBC) a été faite fin 2021-début 2022 et une première campagne de prise de données a eu lieu et est en cours d'analyse. Le détecteur final DAMIC-M sera installé en 2024 pour une prise de données d'environ deux ans suivie d'une ou deux années d'exploitation scientifique. Le LPNHE, en tant que porteur de l'ERC DAMIC-M, est impliqué dans de nombreux aspects de sa mise en place et de son exploitation.

DAMIC-M a comme objectif l'accumulation d'une exposition d'environ 1 kg-an avec un bruit de fond de quelques dixièmes de DRU (Differential Rate Units correspondant à 1 événement par keV, par kilogramme et par jour), soit une amélioration de près de 2 ordres de grandeur par rapport à l'expérience DAMIC@SNOLAB à laquelle nous avons également participé.

DAMIC-M repose sur l'utilisation de CCD skipper comme cible pour les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire. Dans un CCD skipper, la charge de chaque pixel peut être mesurée un nombre arbitraire de fois, ce qui permet de réduire le bruit de lecture à une fraction d'électron (de l'ordre de 0,2 électron de résolution avec 300 relectures) et permet d'abaisser le seuil de détection du signal à quelques eV (7 eV pour un seuil à 2 électrons). Un seuil aussi bas augmente considérablement la sensibilité de l'expérience à la matière noire légère (entre 1 MeV et 10 GeV selon le type d'interaction en ce qui concerne DAMIC-M).

Technique

Dans la période 2022-2023, l'équipe du LPNHE a été particulièrement impliquée d'une part dans l'installation de la LBC, les prises de données, les analyses et les publications, et d'autre part dans la finalisation de certains éléments clés du détecteur comme le firmware de contrôle de lecture des CCD, le système de monitoring, l'interface de gestion du système d'acqui-

sition de chaque CCD avec le système d'acquisition central, ainsi que la synchronisation des lectures par les firmwares des cartes de contrôle.

La Low Background Chamber (*voir figure ci-dessous*) est un prototype de DAMIC-M qui sert à la fois de démonstrateur et de banc d'essais. Sa configuration



Installation de la LBC au Laboratoire Souterrain de Modane.

est fréquemment mise à jour pour accueillir et tester les pièces et les technologies à déployer dans l'expérience finale. L'installation et la mise en service ont eu lieu entre octobre 2021 et mars 2022, avec de vastes activités de caractérisation des CCD en janvier et février 2022. Des campagnes d'acquisition de données scientifiques sont en cours depuis plusieurs mois et deux publications scientifiques de premier plan ont été soumises.

Le détecteur est équipé de deux CCD Skipper 6144 × 4128 de qualité scientifique, pour une masse

sensible globale de 17,8 g. Ses caractéristiques et son faible taux de bruit de fond (10 DRU) en font une expérience compétitive sur la matière noire. L'essentiel de la conception du cryostat a été faite aux USA ; nos contributions directes, outre la salle blanche, concernent le blindage en plomb, l'installation, le système de slow control mentionné ci-dessus, la prise de données et aujourd'hui l'analyse avec notamment le calcul de la sensibilité et la mesure d'une limite supérieure aux interactions leptophiliques.

Science

Les premiers résultats scientifiques sont à la mesure de nos engagements. Avec seulement 2 CCD skippers installés dans la LBC et après une prise de données d'environ 2 mois, nous avons publié les meilleures limites mondiales dans le plan masse versus section efficace de diffusion sur électron, dont voici quelques détails :

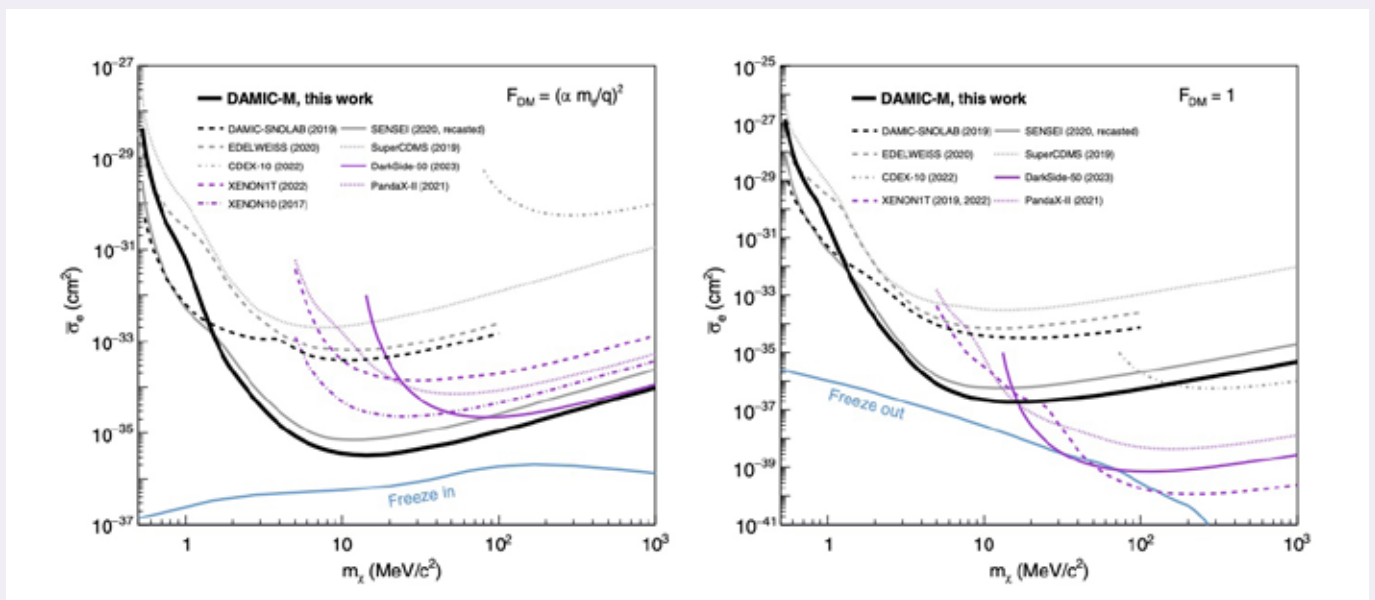
- **First Constraints from DAMIC-M on Sub-GeV Dark-Matter Particles Interacting with Electrons, Phys. Rev. Lett. 130, 171003, April 2023.**

C'est la toute première publication utilisant la technologie des CCD de DAMIC-M et basée sur les données recueillies par la LBC. Les contraintes obtenues sur le flux de particules de matière noire de masses inférieures au GeV et interagissant avec les électrons sont les meilleures mondiale dans la gamme de

[1,6 ; 1 000] MeV/c² et [1,5 ; 15,1] MeV/c² pour les interactions avec médiateur ultra-léger et lourd respectivement. Ce résultat est basé sur une exposition intégrée de 85,23 g-jours et exploite la résolution de charge sub-électronique et le faible niveau de courant d'obscurité des CCD DAMIC-M. (voir figure ci-dessous).

- **Search for Daily Modulation of MeV Dark Matter Signals with DAMIC-M, soumis à PRL, septembre 2023.**

Les particules de matière noire ayant des sections efficaces suffisamment grandes peuvent diffuser lorsqu'elles traversent la masse terrestre. Les changements correspondants dans le flux donnent lieu à un signal de modulation journalier caractéristique. C'est la première fois que ce type d'étude a été menée à partir de CCD et avec SENSEI une masse de la matière noire à l'échelle du MeV. Par cette nouvelle étude basée sur les mêmes données que la publication ci-dessus, nous avons amélioré les limites d'exclusion dans la plage de masse [0,53 ; 2,7] MeV/c² de près de 2 ordres de grandeur. Cette publication donne la limite actuelle la plus forte sur la diffusion DM-électrons via des médiateurs ultra-légers pour des masses autour de 1 MeV/c² (voir figure ci-contre).



Limites supérieures à 90 % de niveau de confiance sur les interactions matière noire/électrons via un médiateur ultra léger (à gauche) et un médiateur lourd (à droite) obtenues par le prototype LBC de DAMIC-M (lignes noires). Sont également présentées les meilleures limites de détection directe actuelles provenant d'autres expériences.

Nos contributions à ces publications ont été nombreuses, elles concernent en particulier :

- le calcul des limites supérieures à partir de méthode de maximum de vraisemblance incluant le calcul du signal attendu selon le modèle utilisé de distribution de la matière noire dans la Voie Lactée.
- les corrections de pile-up dans ces simulations pour obtenir les bonnes prédictions des distributions de charge dans les pixels.
- la mise au point d'une méthode originale pour une estimation empirique du bruit de fond dans l'étude de modulation journalière.

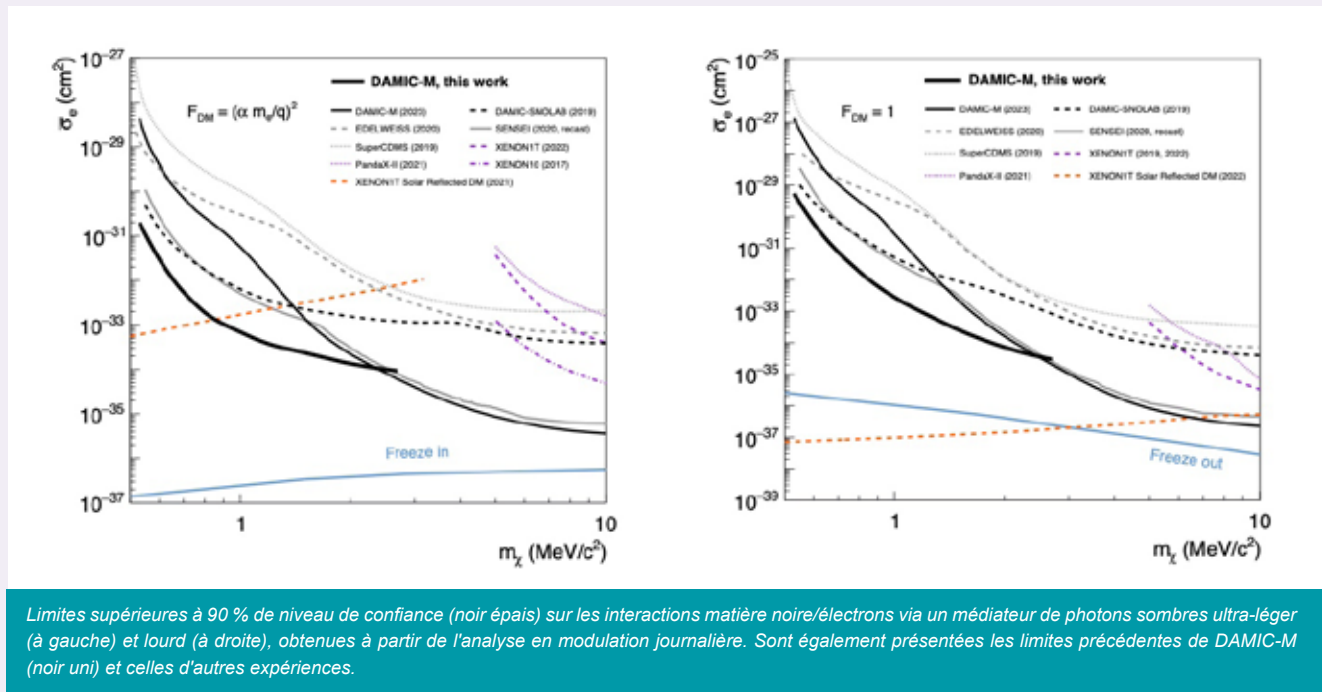
- l'addition d'une étude indépendante des modèles pour évaluer la stabilité temporelle du détecteur et d'un calcul de corrélation qui permet de valider les limites. Ce calcul est moins performant que l'analyse en vraisemblance complète mais est extrêmement simple à implémenter.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Claudia de Dominicis, Romain Gaïor, Antoine Letessier Selvon, Paolo Privitera, Jean-Philippe Zopounidis, Lounes Iddir

Équipe technique :

Marc Delhot, Philippe Bailly, David Martin



Limites supérieures à 90 % de niveau de confiance (noir épais) sur les interactions matière noire/électrons via un médiateur de photons sombres ultra-léger (à gauche) et lourd (à droite), obtenues à partir de l'analyse en modulation journalière. Sont également présentées les limites précédentes de DAMIC-M (noir uni) et celles d'autres expériences.

Les premières données GRAND

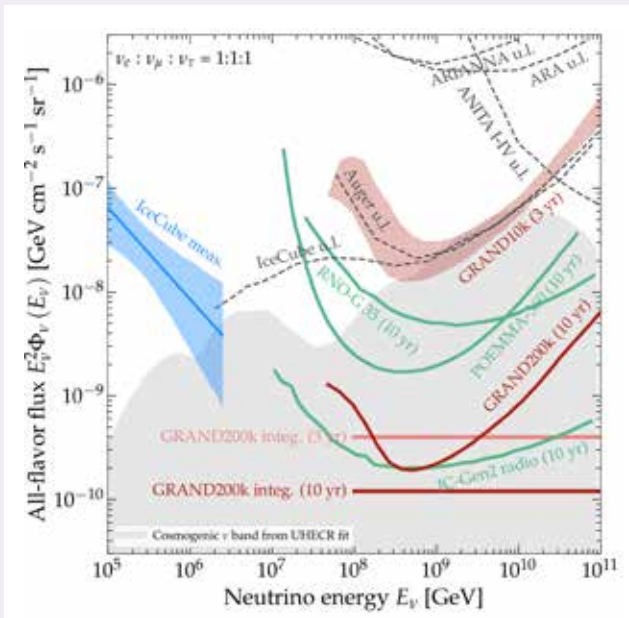
La collaboration GRAND (*the Giant Radio Array for Neutrino Detection*) vise à construire un réseau de 200 000 antennes radio réparties sur une surface totale de 200 000 km² dans une vingtaine de sites à travers le monde. Lorsqu'il sera finalisé au début de

totypique, avec le réseau GRANDProto300 (GP300) en Chine et GRAND@Auger (G@A) en Argentine.

Les prototypes GRAND

La phase prototypique actuellement en cours vise en priorité à valider le principe de détection de GRAND, en démontrant 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.

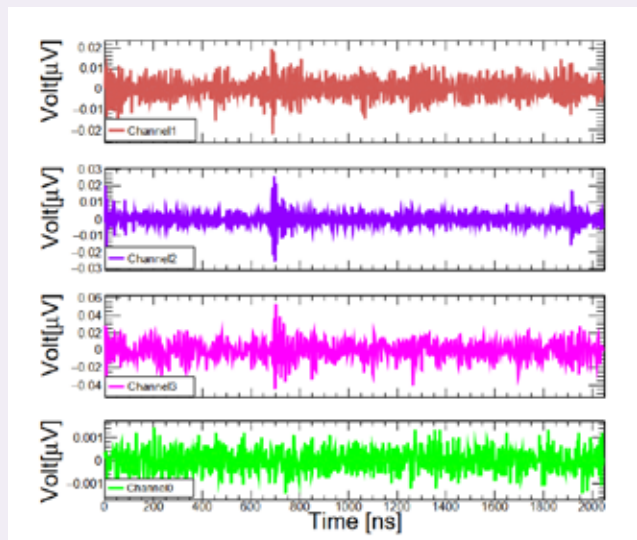
Un réseau de 300 antennes est en cours de déploiement sur une surface de 200 km² dans une région reculée du désert de Gobi avec cette objectif. Il mesurera plusieurs milliers de rayons cosmiques par an dans la gamme d'énergie 10^{16,5}-10^{18,5} eV. La comparaison des caractéristiques (spectre en énergie, direction d'arrivée, composition chimique) reconstruites pour les candidats rayons cosmiques identifiés par GP300 aux résultats des autres expériences du domaine permettra une détermination statistique du rejet du bruit de fond et des performances d'identification et reconstruction des signaux de gerbes atmosphériques. Les 14 premières antennes de GP300 ont été déployées au cours des derniers mois (*voir figure ci-dessous*) pour validation du design avant poursuite du déploiement.



Limite de sensibilité attendue pour le détecteur GRAND dans sa phase complète de 200 00 antennes (en rouge) pour 3 et 10 ans de prise de données. Est aussi indiquée la limite attendue pour la phase GRAND10k pour différentes hypothèses de trigger (zone pointillée), ainsi que les limites pour d'autres expériences et projets. En gris, flux attendus pour les neutrinos cosmogéniques (Alves Batista et al., 2018).

la décennie 2030, ce détecteur, 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 (*voir figure ci-dessus*). 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 la phase pro-



Impulsion radio mesurée sur une des unités de détection GRAND-Proto300. Les voies 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux brins Nord-Sud, Est-West et vertical de l'antenne. La voie 4 est flottante.

Un réseau de 10 antennes a parallèlement été déployé sur le site de l'expérience Auger (*voir photo ci-après*). La comparaison événement par événement des données reconstruites du réseau GRAND à celles d'Auger offrira un complément de haute qualité (mais de faible statistique) à GP300.

R&D GRAND10k

Le groupe du LPNHE est engagé dans un travail de développement d'un trigger radio autonome pour les phases suivantes du projet (GRAND10k, 10 000 antennes réparties sur deux sites dans les deux hémisphères à la fin de cette décennie). Ce travail, mené dans le cadre d'une collaboration avec le Karlsruhe Institute for Technology su un financement conjoint ANR-DFG, vise à exploiter l'ensemble des caractéristiques des signaux radio induits par les gerbes (forme du signal temporel, polarisation, empreinte d'amplitude au sol, ...) pour construire un trigger rapide, pur et efficace, minimisant le volume de données transmises

Chercheur.euses et doctorant.es :

Olivier Martineau, Sandra Le Coz, Marion Guelfand, Arsène Ferrière, Xishui Tian, Anne Timmermans, Simon Chiche

Équipe technique :

Jean-Marc Colley, François Legrand

tout en garantissant un cycle utile de 100 % à l'expérience. Un mini-réseau de 4 antennes a été déployé sur le site du radio-observatoire de Nançay afin de tester ce système en condition réelles.



Installation du réseau GRAND@Auger par des membres de l'équipe parisienne de GRAND (LPNHE et IAP). En arrière plan, une cuve du réseau de surface du détecteur Auger.

CHIFFRES CLEFS

110 membres de la collaboration GRAND dans 12 pays.

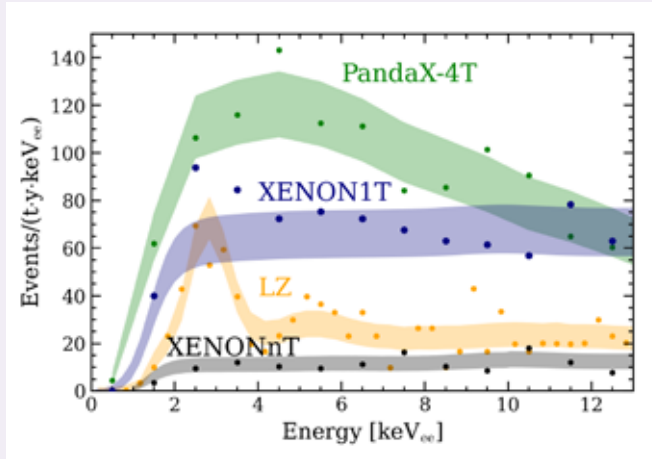
100 antennes construites, **27** en fonctionnement.

Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENON

La prise de données de XENON1T, développé par la collaboration XENON pour la recherche directe de la matière noire, et notamment des WIMPs, s'est achevée fin 2018. L'expérience 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 continue de publier des résultats en utilisant la statistique totale collectée. Les résultats récents les plus importants sont : le travail conjoint sur l'amélioration de la mesure sur la double capture électronique de ^{124}Xe

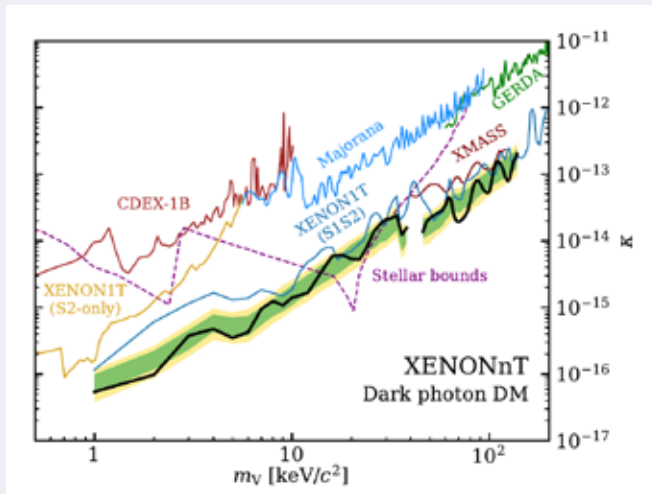
et la limite supérieure sur la double décroissance bêta sans neutrinos; et les limites sur la matière noire leptolithique (Axion- Like Particles, axions solaires, dark photons,...) dont le LPNHE a fourni la contribution principale. En 2020, XENON1T avait trouvé un excès de signal de reculs électroniques susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle physique. La confirmation ou l'exclusion de cet excès a été la priorité de son successeur, XENONnT, qui a publié en octobre 2022 sa première analyse des reculs électroniques, à laquelle le LPNHE a fortement contribué. Cet excès a été ex-

clu avec une signification statistique de 4σ , grâce à un bruit de fond cinq fois plus petit de XENON1T, notamment ($15.8 \pm 1.3\text{stat}$) événements/(tonne·an·keV) dans la fenêtre d'énergie de [1, 30] keV. Cette valeur correspond au bruit de fond le plus bas jamais atteint par un détecteur de détection directe de la matière noire (voir figure ci-dessous). Ce travail a permis également d'améliorer l'exploration d'autre physique au-delà du



Bruit de fond des reculs électroniques de XENONnT par rapport à celui de XENON1T et des autres détecteurs actifs actuellement.

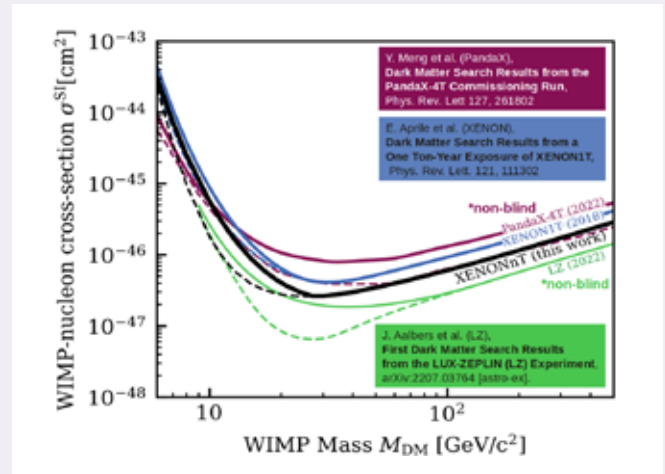
modèle standard (Axion-Like Particles, axions solaires, dark photons) et de poser une limite supérieure sur le moment magnétique du neutrino de $\mu_\nu < 6.4 \times 10^{-12} \mu_B$. La figure ci-dessous montre un exemple de cette recherche, notamment celui sur les dark photons.



Sensibilité et limite d'exclusion (90 % C.L.) au modèle de photon sombre obtenues par XENONnT. La variable K paramétrise la force de mélange cinétique entre photon ordinaire et photon sombre.

En juillet 2023, XENONnT a publié son premier résultat sur la recherche des WIMPs. C'est présentement le meilleur résultat qui a été obtenu avec une analyse en

aveugle, et comparable avec ceux de LZ (projet américain) et PandaX (projet chinois), les deux utilisant la même technique de TPC au xénon en double-phase (voir figure ci-dessous).



Limite d'exclusion (90 % C.L.) au modèle WIMP obtenue par XENONnT, comparée avec celles de LZ et PandaX-4T. Les courbes en continu ont été obtenues avec la même méthode de traitement des sous-fluctuations statistiques.

Impliquée dans le projet depuis huit 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.

Calcul et traitement des données

L'équipe est responsable du développement du système de distribution et traitement des données, et y a donc 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 4 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 a travaillé sur XENON1T et sur XENONnT, 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 provient des électrons solitaires dont l'origine est encore

le sujet d'analyses et de débats. Ce bruit de fond nous permet toutefois d'améliorer la caractérisation du détecteur aux faibles énergies. Avec l'arrivée de plusieurs doctorants, le groupe a pu élargir l'éventail de recherche à la physique du neutrino, notamment la détection du neutrino solaire du ^8B (à la fois un bruit de fond pour la matière noire mais également une opportunité de détecter sa diffusion cohérente élastique) et la détection de supernovas galactiques en utilisant la TPC et les deux systèmes de veto qui utilisent de l'eau dopé au Gadolinium.

Simulation

L'équipe travaille sur l'amélioration de la simulation du signal de scintillation secondaire, c'est-à-dire la lumière UV produite par l'électro-luminescence de la TPC. Dans ce cadre, la photoluminescence des électrons dans le gaz, puis le transport des photons jusqu'à leur détection dans les PMTs, ont été décrits de manière plus réaliste, pour tenir compte en particulier de la focalisation des électrons vers les fils d'anode. Par ailleurs des études ont été réalisées avec la suite logicielle COMSOL multiphysics, qui ont permis de mettre en évidence pour la première fois dans XENON les effets couplés des forces (gravitationnelle, électrostatique et de dilatation thermique) appliquées sur les électrodes.

Futurs projets et l'R&T avec XeLab

L'expérience de prochaine génération verra les trois collaborations XENON, DARWIN et LZ travailler ensemble, avec le Consortium XLZD, pour construire un détecteur du type de DARWIN. Il sera capable, avec ses 50 tonnes de xénon liquide, 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 supernovas, recherche de la double décroissance bêta sans neutrino et double capture électronique. Impliquée dans le projet depuis des années, l'équipe XENON LPNHE a coordonné le groupe de travail sur le traitement du xénon liquide (qui a dessiné un nouveau système de stockage du xénon de 50 tonnes) et coordonne présentement le groupe sur le computing. L'équipe est en train de développer une TPC de petite taille et son système cryogénique, nommée XeLab, pour tester des électrodes

de nouvelle conception, dénommées flottantes, qui visent à résoudre les difficultés majeures de ceux de générations actuelles. XeLab est en cours d'installation. Ce projet nous permet déjà d'obtenir une visibilité à l'international, notamment avec l'Allemagne (à travers le IRL DMLab) et l'Australie (avec des échanges d'étudiants). Les activités auxiliaires de R&T de XeLab sont : l'étude et la modélisation des électrons isolés produits dans la TPC, le Slow Control basé sur le RevPI, deux systèmes de refroidissement basés sur l'azote liquide.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Bernard Andrieu, Frédéric Girard, Erwann Masson, Luca Scotti Lavina, Sid El Moctar Ahmed Maouloud, Daniel Layos Garcia, Yongyu Pan, Quentin Pellegrini

Équipe technique :

Olivier Dadoun, Romain Gaior, Nabil Garroum, Yann Orain

CHIFFRES CLEFS

Bruit de fond atteint **16 événements** par tonne par an et par keV.

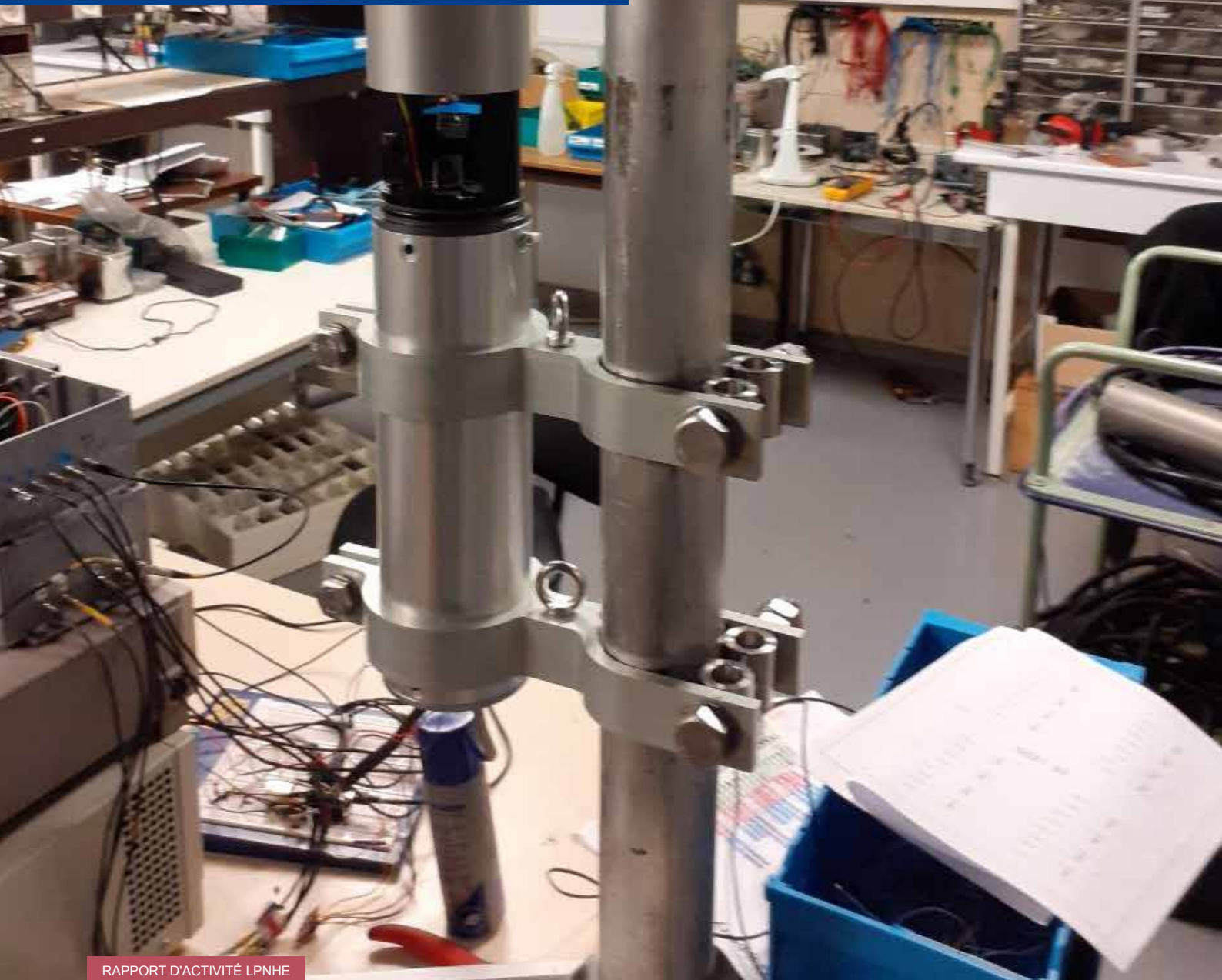
Limite au moment magnétique du neutrino **$< 6.4 \times 10^{-12} \mu\text{B}$** .

4 PB de données transférés et traités.



Cosmologie et Énergie Noire

- **Cartographier les grandes structures de l'univers avec DESI pour contraindre l'énergie noire et la gravité**
 - Mesure du taux d'expansion de l'univers avec les forêts Lyman-alpha des quasars
 - Contraindre l'énergie noire et la gravité avec le clustering des galaxies de DESI
- **Préparation des futurs grands relevés de l'énergie noire**
 - Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP
 - Mesure du cisaillement gravitationnel
 - Réalisations techniques
- **Diagramme de Hubble des supernovas de type Ia avec Subaru, Hubble et ZTF**
 - Subaru/HSC
 - ZTF
 - Cosmologie avec les SN Ia de Subaru/HSC et ZTF : le projet LEMAITRE
 - Vers LSST
- **Théorie de la formation des structures cosmologiques**



Cosmologie et Énergie Noire

Le groupe de cosmologie du laboratoire 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 on a pu vérifier que les ondes gravitationnelles et électromagnétiques voyagent à des vitesses extrêmement proches.

Mesurer l'expansion de l'univers constitue un moyen de contraindre les sources de gravitation de notre univers sous l'hypothèse d'une théorie, ou éventuellement de conduire la démarche inverse, mais pas de questionner simultanément la théorie et les sources. Mais l'expansion cosmique s'accompagne d'un mouvement d'augmentation des contrastes de densité (appelé généralement "formation des structures"), dont la gravité est aussi le moteur. Ainsi, mesurer précisément l'évolution des contrastes de densité avec le temps cosmique offre un deuxième moyen de questionner la gravité, en particulier parce que cette évolution ne dépend plus que de la théorie à l'œuvre une fois fixée l'histoire de l'expansion. On voit donc se profiler un programme de recherche enthousiasmant, de nature à mettre en défaut la relativité générale aux grandes échelles : contraindre précisément l'histoire de l'expansion à l'aide de la relation entre distance et décalage vers le rouge 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 standard" exploitant les "oscillations acoustiques des baryons". L'implication historique de l'équipe dans la mesure des distances aux supernovas continue aujourd'hui dans les relevés SSP (supernovas distantes sur le puissant télescope Subaru) et ZTF (supernovas 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 désormais DESI, dont les observations ont commencé début 2021. 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, BAO) 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 supernovas, et aussi de contraindre l'évolution de la formation des structures via les corrélations du cisaillement gravitationnel. Sa première lumière est aujourd'hui prévue fin 2024.

Cartographier les grandes structures de l'univers avec DESI pour contraindre l'énergie noire et la gravité

Le projet DESI est un relevé spectroscopique dont le but est de cartographier en trois dimensions les grandes structures de matière de l'univers afin de sonder la nature de l'énergie noire et de tester la gravité aux échelles cosmologiques. Il utilise le télescope Mayall (3,8 m de diamètre) à Kitt Peak en Arizona associé à un spectrographe multi-objet constitué d'un correcteur grand champ, un plan focal instrumenté de 5000 positionneurs automatiques de fibres et 10 spectrographes. Chacun d'eux réceptionne 500 fibres, dont la lumière est 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.

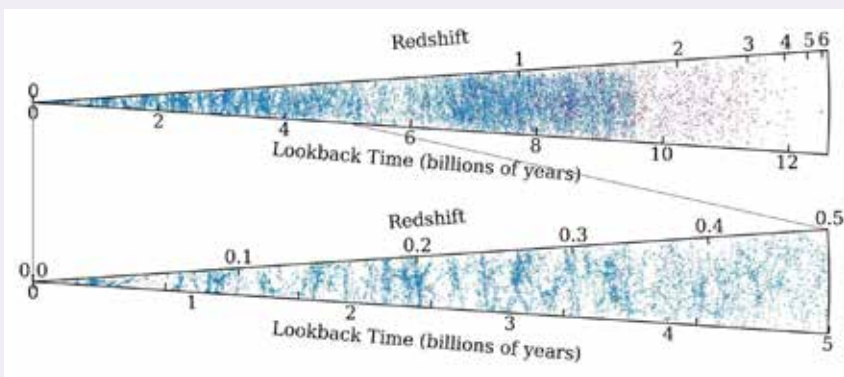
En juin 2023, nous avons publié les données prises pendant la période de validation de relevé de décembre 2020 à mi-mai 2021. Il s'agit du Early Data Release (EDR) qui comprend 1.2 million de redshifts extragalactiques jusqu'à $z \sim 3$ (voir figure ci-dessous) et presque 500 millions d'étoiles de la

Voie Lactée. Les observations collectées de mai 2021 à septembre 2022, avec toutefois un arrêt des observations pendant 2 mois en raison de l'apparition du feu Contreras en juin 2022 (voir photo ci-dessous) sur le site du Mayall constituent l'échantillon de données 1 an (Y1). La collaboration est en train de préparer les premières analyses cosmolo-



Vue depuis l'observatoire national de Kitt Peak le matin du 17 juin 2022 depuis la caméra montée sur l'extérieur du télescope.

giques avec cet échantillon, et les résultats, ainsi que les données Y1, seront publiés courant 2024.



Sur cette petite tranche des données de DESI, la Terre depuis laquelle nous observons le ciel est située tout à gauche de la figure. Chaque point représente une galaxie (en bleu) ou un quasar (en rouge). Plus les galaxies sont proches de nous, plus elles se situent dans la partie gauche de la figure, tandis que les quasars plus distants sont dans la partie droite. La lumière des quasars les plus distants a mis presque 12 milliards d'années à nous parvenir. La tranche située dans la partie basse de la figure est un zoom sur les galaxies les plus proches de nous. On voit des zones vides et d'autres avec des structures comme des filaments. Il s'agit de réelles structures de l'univers, que l'on appelle la toile cosmique avec les galaxies qui se regroupent le long des filaments et entre les vides cosmiques. (Credit: Eleanor Downing / DESI collaboration).

Le groupe DESI du LPNHE est impliqué dans deux axes :

- La mesure du taux d'expansion de l'univers avec les forêts Lyman-alpha des quasars où 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.
- L'exploitation des corrélations spatiales entre les positions de galaxies (clustering des galaxies) pour contraindre à la fois le taux d'expansion de l'univers, la croissance des structures mais aussi directement les paramètres du modèle cosmologique.

Le groupe DESI du LPNHE 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.

Mesure du taux d'expansion de l'univers avec les forêts Lyman-alpha des quasars

Initialement, 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. 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). La thèse de Ting Tan a poursuivi les études menées au LPNHE avec le projet précédent, eBOSS, en vue de préparer les analyses avec les données de DESI. Ting était responsable de l'inclusion des systèmes à haute densité de colonnes dans les simulations produites par le groupe du CEA-Saclay, ses études avec les données finales eBOSS et les premières données de DESI ont montré qu'il était important de modéliser cette systématique. Il a développé un modèle analytique qui rend compte de l'effet des systèmes à haute densité de colonnes sur la fonction de corrélation des Lyman-alpha et l'a validé avec les simulations.

Contraindre l'énergie noire et la gravité avec le clustering des galaxies de DESI

Analyse standard du clustering des galaxies - L'analyse standard est basée sur l'exploitation de la statistique à 2 points (fonction de corrélation et spectre de puissance). Elle se limite également au régime non-

linéaire où le modèle analytique basé sur la théorie des perturbations du champ de densité est valable. Pauline Zarrouk est co-responsable de cette analyse-clé avec les données 1 an de DESI.

Analyse cosmologique du Bright Galaxy Survey (BGS) - Pauline Zarrouk et son doctorant, Svyatoslav Trusov, mènent l'analyse cosmologique du BGS, un échantillon complet de galaxies à bas redshift ($z < 0.4$). Pour cela, ils ont participé aux tests du modèle avec des simulations et le groupe est également impliqué dans la production de plusieurs types de simulations réalistes pour DESI. Mais les contraintes cosmologiques avec cet échantillon sont limitées par la variance cosmique, c'est-à-dire la quantité d'information limitée du fait de l'observation d'un petit volume d'univers. La thèse de Svyatoslav Trusov consiste à développer la chaîne d'une analyse multi-traceur qui exploite les corrélations croisées entre deux populations de galaxies distinctes dans le BGS : les galaxies bleues qui sont plutôt jeunes spirales avec formation d'étoiles et les galaxies rouges qui sont plutôt elliptiques, plus vieilles et où il n'y a plus de formation d'étoiles. En appliquant une coupure sur la couleur g-r, il est donc possible de créer deux sous-échantillons de galaxies et de les analyser conjointement. Nous avons montré avec une première étude sur des simulations que nous pouvions obtenir un gain de 20 % sur la mesure de la croissance des structures à bas redshift ($z < 0.2$), là où l'effet de la variance cosmique est le plus important. Toutefois, nous avons montré que notre estimation des erreurs, basée sur une méthode interne d'échantillonnage des données, était biaisée, en particulier pour des échantillons de galaxies très denses comme le BGS. La méthode standard pour estimer la matrice de covariance qui consiste à produire plusieurs milliers de simulations réalistes est, quant à elle, très coûteuse en temps de calcul. Nous avons donc proposé une approche hybride où nous calibrons la méthode interne d'échantillonnage sur un nombre restreint de simulations, environ 40 fois moins que pour la méthode standard (Trusov, Zarrouk et al. 2023). En parallèle, nous avons également accéléré la prédiction du modèle analytique de la statistique à deux points en ayant recours à un réseau de neurones. Notre modèle permet de gagner au final un facteur 10-15 dans l'inférence des paramètres cosmologiques par rapport à la chaîne d'analyse officielle de DESI (Trusov, Zarrouk et al. in prep). Le but est maintenant d'appliquer tous ces développements à l'analyse multi-traceur des données 1 an de DESI prévue courant 2024.

...

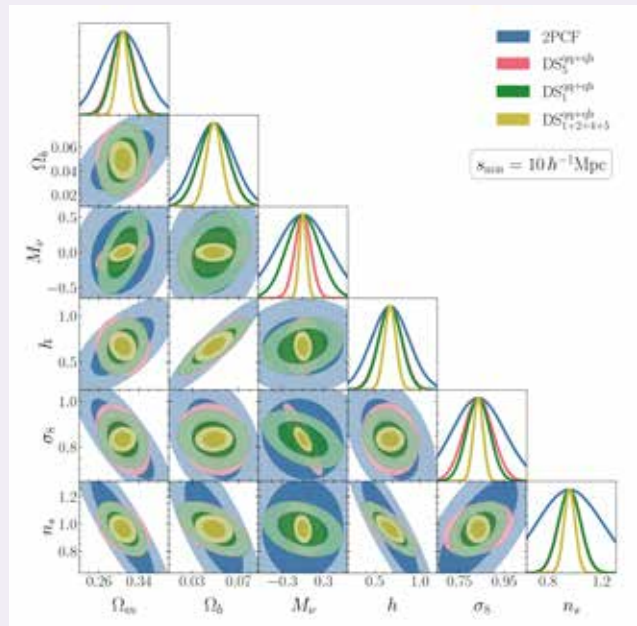
Au-delà des méthodes standard - Nous savons qu'il y a beaucoup d'informations cosmologiques au-delà des méthodes standard, c'est-à-dire au-delà de la statistique à deux points. Une approche prometteuse est la technique de "density-split" qui consiste à découper l'échantillon total de galaxies en sous-échantillons en fonction de la densité locale. Autrement dit, le premier sous-échantillon va correspondre aux régions vides de matière (les vides cosmiques) et le dernier sous-échantillon aux régions les plus denses (les amas de galaxies). En analysant conjointement l'auto-corrélation de ces sous-échantillons et les corrélations croisées entre chaque sous-échantillon et l'échantillon total, il est possible d'améliorer les contraintes cosmologiques. Dans Paillass, Cuesta-Lazaro, Zarrouk et al. (2022), nous avons étudié le pouvoir contraignant de cette analyse dans un cas idéal avec des simulations cosmologiques. Nous avons montré que la technique "density-split" améliore les contraintes sur la densité de matière, l'amplitude de la croissance des structures et la somme des masses des neutrinos d'un facteur 5, 6 et 8 respectivement par rapport à la méthode standard basée sur la fonction de corrélation à 2 points (voir figure ci-après). Puis dans Cuesta-Lazaro et al. (2023), nous avons développé un modèle basé sur des simulations qui décrit les statistiques du "density-split" jusqu'aux petites échelles. Nous avons fait une première application de ce modèle à des données réelles, celles du projet de la décennie précédente BOSS. Au LPNHE, nous sommes maintenant en train de développer la chaîne d'analyse pour appliquer cette méthode aux données 1 an du DESI BGS et comparer les résultats avec les analyses-standard.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Pauline Zarrouk, Christophe Balland, Laurent Le Guillou, Ting Tan, Svyatoslav Trusov

Équipe technique :

Julien Coridian, Patrick Ghislain, Philippe Repain



Cette figure montre les contraintes sur 6 paramètres cosmologiques obtenues à partir de l'analyse standard de la structuration des galaxies (en bleu) et à partir d'une analyse plus sophistiquée, appelée density-split (en jaune). Cette technique de density-split consiste à découper l'échantillon de galaxies en sous-échantillons en fonction de la densité locale avec d'un côté les régions les moins denses de matière (les vides cosmiques qui donnent les contours en vert) et d'un autre côté les régions les plus denses (les amas de galaxies qui donnent les contours en rose). L'analyse jointe de ces sous-échantillons permet d'améliorer les contraintes sur les paramètres cosmologiques.

CHIFFRES CLEFS

Le DESI Early Data Release rendu public en juin 2023 correspond à :

- 6 mois** d'observation pendant la phase de validation du relevé.
- 1,2 millions** de redshifts extragalactiques (galaxies et quasars) et presque **500 millions** d'étoiles de la Voie Lactée.

Au total, l'EDR représente **2%** du relevé final de DESI qui va observer le ciel pendant **5 ans**.

Préparation des futurs grands relevés de l'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 supernovas à l'horizon 2026. 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 en mesure de mesurer les rapports de flux apparent entre les supernovas proches (dans le visible) et les supernovas lointaines (dans l'infrarouge) sans introduire d'erreurs systématiques plus grandes que l'effet à mesurer. L'étalonnage photométrique sur le domaine de longueur d'onde 400-1000 nm est en conséquence un point clé de la réussite de cette entreprise.

Les meilleures références de flux astrophysique actuelles ne sont précises qu'au demi-pourcent ce qui est insuffisant 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'étalonnage des flux lumineux définis par le radiomètre cryogénique du NIST, le groupe investit un important effort instrumental dans ce prérequis indispensable au succès des futurs relevés de supernovas. L'instrument photométrique de l'expérience StarDICE a été mesuré avec le CBP en 2022 puis installé à l'observatoire de Haute Provence fin 2022. Il a vu sa première lumière au début de l'année 2023 puis a commencé un relevé automatisé des étoiles standards spectro-photométriques en juin 2023. L'ambition affichée par le projet est de fermer une première fois la chaîne de calibration complète, liant le NIST aux étoiles, avec une précision limitée de manière à apporter une première borne supérieure sur l'incertitude de calibration à temps pour le projet LEMAÎTRE. Le relevé complet se poursuivra sur 2 ans, après un upgrade instrumental, de façon à collecter toute la statistique nécessaire pour atteindre la précision requise au relevé de SNe Rubin.

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 traceurs 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 programme 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.

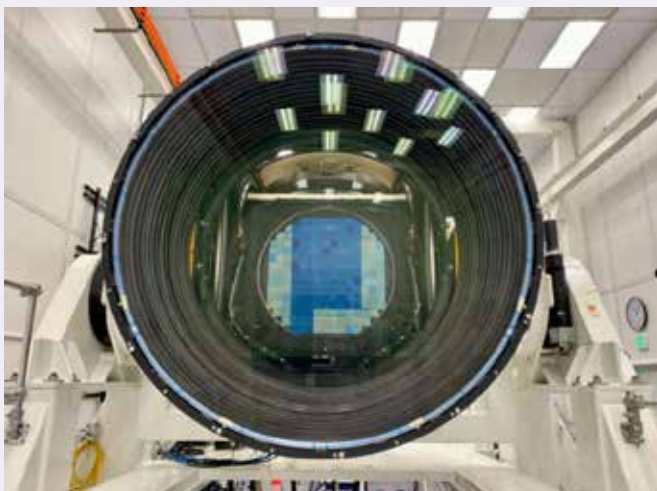
Réalisations techniques

Le système changeur de filtre de LSST – Pour quantifier les couleurs des objets astronomiques, informations clefs 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 filtre 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 positionnés de façon reproductible à 100 microns près et fiable : près de 100 000 changements de filtre sont prévus pendant la durée du projet.

La France est responsable de la fourniture du système changeur de filtre de LSST et le LPNHE fournit le "carrousel", qui tient les filtres en attente et présente le filtre à positionner dans le plan focal (*voir photo ci-dessous*). Le carrousel, sans filtre, pèse ~250 kg, et est un système extrêmement robuste, capable de maintenir de façon sûre ~155 kg de filtres en intégrant les risques sismiques importants du Chili. Une quarantaine de personnes sont interve-



Les 201 capteurs formant $3.2 \cdot 10^9$ pixels du plan focal de la caméra de LSST lors de sa caractérisation à SLAC, Etat Unis, en 2023. Produire un plan focal de cette taille a utilisé les capacités de production de deux vendeurs de capteur CCD. On distingue clairement les capteurs fournis par ITL (vert clair) des capteurs fournis par e2v (bleu). Le LPNHE est impliqué depuis 2007 dans la réalisation et les tests de ce plan focal unique.

nues sur la construction du changeur de filtre 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. À l'automne 2019, le changeur de filtre 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 au commissioning du système en test sur deux fronts :

- En utilisant un prototype à l'échelle 1 dans le hall de montage du LPNHE. À l'aide de ce modèle, un travail de fond sur l'optimisation et l'ergonomie des interfaces logicielles a pu être réalisé sans avoir besoin d'interférer avec le système final en test aux US.

- En effectuant plus de trois mois de commissioning à SLAC entre 2022 et 2023, l'équipe changeur de filtre a permis de finaliser l'intégration du changeur dans les systèmes de la caméra et d'effectuer des tests de répétabilité (ex : plus de 500 changements en une semaine).

Les dernières mises aux points et améliorations suite aux résultats des tests sont en cours et doivent permettre la mise en service de la caméra au Chili au printemps 2024.

Commissioning 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 du commissioning en cours sur les diagnostics du plan focal, l'optimisation du fonctionnement et de la lecture des CCD.

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. 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. Son usage devrait être étendu à la production de photodiode calibrée pour l'équipement du Vera Rubin Observatory.



L'instrument photométrique StarDICE vu par sa caméra de contrôle à distance. Les observations de cet instrument sont maintenant entièrement automatisées.

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 visée est en cours, ainsi que son infrastructure d'étalonnage photométrique basée sur les détecteurs calibrés précédemment. La fabrication de la version finale des cartes électroniques a débuté fin novembre 2023 tandis que les tests d'intégration mécanique se poursuivent avec les versions prototype de la carte.

Télescope StarDICE – Cette source de lumière artificielle est destinée à être placée en regard du télescope robotique StarDICE sur le site de l'observatoire de Haute Provence (OHP). Cet instrument a vu sa première lumière en janvier 2023 ([voir photo ci-dessus](#)) après une mesure détaillée de sa transmission achevée en février 2022 et son installation sur site au cours de l'été 2022. L'équipe a achevé l'automatisation du reste de l'installation (coupole et instrument infrarouge, monitoring météo et visible) en mars 2023. Le commissioning de l'instrument s'est achevé en juin 2023 et un pré-relevé automatique a débuté dans le but d'évaluer les performances de l'instrument et d'accumuler une statistique suffisante pour étalonner le projet LEMAÎTRE. La statistique

accumulée fin 2023 représente environ la moitié de la statistique nécessaire pour ce pré-relevé.

Chercheur.euses et doctorant.es :

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Marc Betoule, Sylvain Baumont, Sébastien Bongard, Delphine Hardin, Laurent Le Guillou, Jérémy Neveu, Nicolas Regnault, Thierry Souverin, Enya Van den Abeele, Yassin Faris, Leander Lacroix, Dylan Khun

Équipe technique :

Julien Coridian, Marc Dhellot, Guillaume Daubard, Patrick Ghislain, Claire Juramy, Didier Laporte, Eric Pierre, Philippe Repain, Michael Roynel, Eduardo Sepulveda

LSST

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

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

Nombre d'objets suivis pendant 10 ans **~37x10⁹ (20x10⁹ galaxies /17x10⁹ stars)**

Début du relevé : **fin 2025**.

StarDICE

3200 images standard spectrophotométriques par nuit d'observation.

CHIFFRES CLEFS

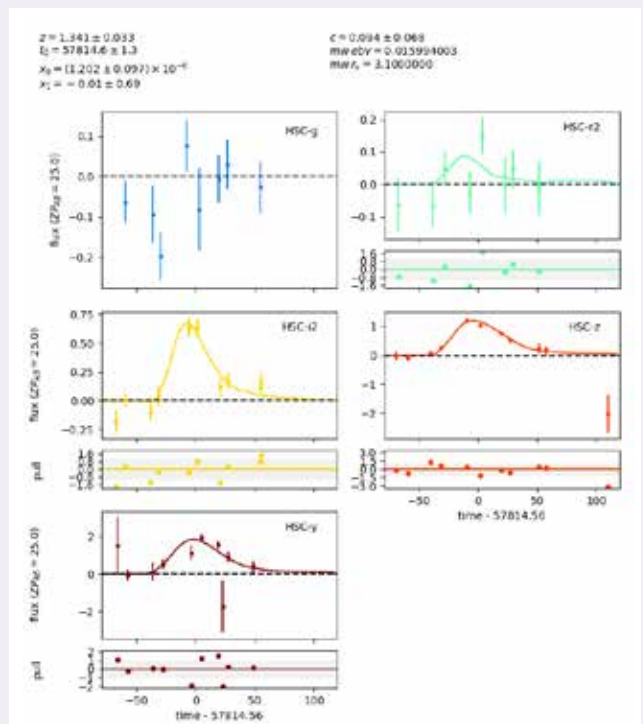
Diagramme de Hubble des supernovas de type Ia avec Subaru, *Hubble* et ZTF

Les supernovas de type Ia permettent de cartographier très efficacement l'histoire de l'expansion cosmique, tout particulièrement la période de transition durant laquelle l'expansion de l'Univers a commencé à accélérer. L'origine de cette accélération est l'une des questions fondamentales de la cosmologie moderne : les deux hypothèses les plus communément avancées sont d'une part la présence d'un mystérieux fluide, gravitationnellement répulsif, et appelé énergie noire, soit une déviation à la relativité générale aux échelles cosmologiques. L'étude, à l'aide de supernovas de type Ia, de l'expansion cosmique récente est une sonde cosmologique de choix pour tenter de caractériser la nature de l'énergie noire, via la mesure de son équation d'état w ; voire même, pour peu qu'on dispose de suffisamment d'objets aux redshifts appropriés, tenter de détecter d'éventuelles variations de cette équation d'état au cours de l'histoire de l'Univers. Une technique complémentaire, également mise en œuvre au sein de notre équipe, consiste à mesurer les variations de la distance angulaire d'une règle standard (l'échelle BAO), ce qui permet de réaliser la même mesure de manière dans une gamme de redshift plus élevée. La combinaison des deux sondes permet de cartographier très précisément l'histoire de l'expansion jusqu'à $z \sim 2.5$, et donnera, dans la seconde moitié de la décennie, une mesure ultime de l'histoire de l'expansion jusqu'à ces redshifts, soit durant l'essentiel de l'histoire de l'Univers.

Dans le cadre de sa participation au Supernova Legacy Survey (SNLS), l'équipe de cosmologie du LPNHE a publié, en 2006, 2010 et 2014, les meilleures contraintes sur l'équation d'état de l'énergie noire - la dernière publiée conjointement avec la collaboration SDSS-II. Au cours de la décennie passée, nous nous sommes engagés dans une série de projets complémentaires, visant à accroître significativement l'étendue en redshift du diagramme de Hubble, avec les moyens sol disponibles avant l'avènement du relevé Rubin/LSST. La stratégie suivie a consisté à se concentrer tout particulièrement sur les zones du diagramme de Hubble les plus sensibles au paramètre w , à très bas redshift ($z < 0.1$) et très haut redshift ($z > 0.8$).

Subaru/HSC

Le programme à haut redshift a été mené avec l'instrument Hyper Suprime Cam (HSC), installé au foyer primaire du télescope Subaru de 8.2 m de diamètre. HSC est équipé de CCDs à haute-résistivité, présentant une efficacité quantique supérieure à 95% dans le rouge et l'infrarouge proche (là où l'on détecte l'essentiel de la lumière provenant des supernovas lointaines). Nous avons démontré, en collaboration avec N. Suzuki (IPMU, Tokyo / Florida State University), N. Yasuda (IPMU) et D. Rubin (University of Hawaii) qu'un recadrement simple des composantes profondes du Subaru Strategic Program (un relevé cosmologique de 300 nuits conduit avec HSC), il était possible d'utiliser les mêmes données pour détecter et suivre un lot de supernovas très lointaines de qualité cosmologique (recherche glissante ou rolling search). En deux saisons de prise de données, fortement perturbées par une série d'aléas climatiques et l'éruption du Kilauea, le projet a accumulé plusieurs centaines de supernovas, dans la gamme de redshift $0.8 < z < 1.1$, très bien mesurée (voir figure ci-dessous). Un programme complémentaire réalisé

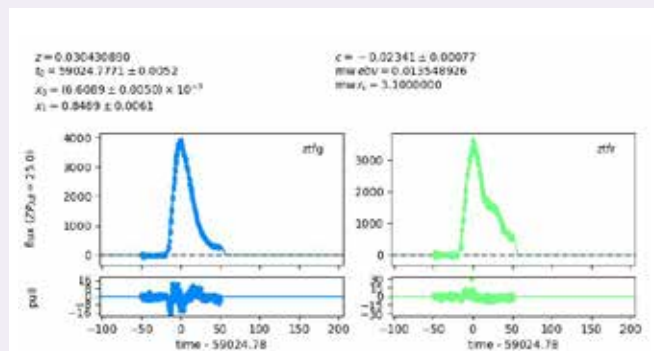


Évolution de la luminosité d'une des 500 SNe Ia distantes détectées et suivies avec l'instrument HyperSuprimeCam monté sur le télescope Subaru de 8.2-m. Le suivi est réalisé dans les 5 bandes passantes de l'instrument, couvrant le visible et l'infrarouge proche. Cette supernova, extrêmement distante, a explosé il y a près de 9 milliards d'années. Du fait de l'expansion, elle est actuellement distante de près de 13 milliards d'années. L'essentiel de sa lumière est détecté dans les bandes i, z et Y, couvrant le rouge et l'infrarouge proche.

avec le Hubble Space Telescope, a permis une extension du programme à plus haut redshift ($1.1 < z < 1.5$). La collecte des redshifts des galaxies hôtes des SN de l'échantillon représente un effort conséquent, ce qui requiert de nombreuses heures d'observations sur des télescopes de classe 4 m (DESI, AAT), 8-m (VLT, Gemini, Subaru) et 10 m (Keck). Elle a permis de collecter les redshifts de 500 supernovas très distantes et s'achèvera en 2025, avec l'installation au foyer primaire de Subaru de l'instrument PFS.

ZTF

La constitution d'un lot à bas redshift requiert un design d'instrument totalement différent : pour observer un volume d'Univers proche, il faut être en mesure de couvrir plusieurs milliers de degrés carrés de ciel, avec une cadence de deux à trois jours, en plusieurs bandes passantes. À ce jour, un seul instrument est en mesure de réaliser cela jusqu'à un redshift de ~ 0.1 : la caméra de 47 degrés carrés (190 fois la lune) montée sur le télescope Oschin Schmidt de 1.2 m (Palomar), robotisée pour l'occasion (*voir figure ci-contre*). Grâce au soutien conjoint du laboratoire, de l'IN2P3 et de l'ANR, nous avons pu joindre la collaboration ZTF, en tant que Major Partner. À ce jour, plus de 3500 supernovas ont été analysées.



Évolution de la luminosité d'une des 3500 supernovas de type Ia détectées et suivies par le télescope ZTF, dans ses deux principales bandes passantes, couvrant le dans le vert (g) et le rouge (r). Située à seulement 400 millions d'années lumière de nous, cette supernovas est dite "proche".

À terme, l'échantillon spectroscopique de ZTF comprendra de l'ordre de 8000 supernovas de type Ia.



Cosmologie avec les SN Ia de Subaru/HSC et ZTF : le projet LEMAITRE

Notre but est de combiner les deux échantillons Subaru/HSC et ZTF en un unique diagramme de Hubble: c'est le projet LEMAITRE (Latest Extended Mapping of Acceleration with an Independent Trove of Redshifted Explosions). Dans sa version actuelle, en cours de construction, le diagramme de LEMAITRE combine près de 4000 objets dans les zones de redshift les plus sensibles à la valeur de w : 3500 supernovas de qualité cosmologique issues de ZTF, les 500 supernovae à très haut redshift obtenues avec Subaru et disposant à ce jour d'un redshift spectroscopique. À ces deux échantillons s'ajoutent 172 supernovas intermédiaires obtenue par le SNLS et encore jamais publiées. Aucun des échantillons qui composent le diagramme de Lemaître n'a encore été utilisé pour une mesure cosmologique, ce qui garantit, pour la première fois depuis la découverte de l'accélération de l'expansion, une mesure entièrement indépendante des mesures qui l'ont précédées.

Pipeline d'inférence cosmologique – L'augmentation significative de la taille et de la qualité des échantillons proche et lointain, justifie une remise à plat de la stratégie d'analyse ainsi que du code d'inférence cosmologique. L'analyse repose sur trois éléments cruciaux : (1) la modélisation empirique de l'évolution spectrophotométrique des supernovas de type Ia, (2) la standardisation des distances, en mettant à profit les corrélations entre la luminosité *restframe* des supernovas avec d'autres observables, telles que la couleur (*restframe*) ou la rapidité d'évolution de leur luminosité (3) la prise en compte des biais de sélection affectant les échantillons.

NaCI – Le projet NaCI (Nouveaux algorithmes de courbes de lumière) constitue une réécriture complète du code de modélisation des supernovas de type Ia. Le code a été réécrit de manière à simplifier

autant que possible la procédure d'entraînement, et surtout la propagation des incertitudes sur les paramètres finaux.

EDRIS – Le code EDRIS (Estimation de Distance pour les Relevés Incomplets de Supernovas) développé dans le cadre du projet LEMAITRE, combine les paramètres d'intérêt fournis par NaCI (luminosité *restframe* au pic, vitesse d'évolution de la courbe de lumière, couleur *restframe*) en un unique estimateur de distance optimal, et réalise l'inférence cosmologique, en prenant en compte les biais de sélection affectant les différents échantillons. À terme, EDRIS devrait être en mesure d'inférer les fonctions de sélection à partir des échantillons de supernovas eux-mêmes, sous des hypothèses minimales d'évolution des propriétés des SNe avec le redshift. Le but est de faire de l'ensemble NaCI+EDRIS un code d'inférence simple et léger, ne nécessitant pas les simulations extrêmement lourdes exigées par les codes actuels. Notre but est que NaCI+EDRIS puisse absorber les échantillons 5 à 10 fois plus importants qui seront produits

Chercheur.euses et doctorant.es :

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Marc Betoule, Sylvain Baumont, Sébastien Bongard, Delphine Hardin, Thomas de Jaeger, Jérémy Neveu, Nicolas Regnault, Leander Lacroix, Dylan Khun, Mahmoud Osman

Équipe technique :

Julien Coridian, Marc Dhellot, Guillaume Daubard, Patrick Ghislain, Claire Juramy, Didier Laporte, Eric Pierre, Philippe Repain, Michael Roynel, Eduardo Sepulveda

par les relevés de 4^e génération (Rubin/LSST et Roman, notamment).

Vers LSST

À terme, le diagramme Lemaître comprendra de 8 000 à 10 000 supernovas proches (la totalité du lot spectroscopique ZTF-II), et de l'ordre de 700 supernovas distantes. Pour obtenir une mesure du paramètre d'état de l'énergie noire w au pourcent (et de ses variations avec le redshift de quelques pourcents), et pour réaliser une jonction avec le diagramme de Hubble BAO de DESI, il serait nécessaire d'ajouter à ce diagramme de l'ordre de 10 000 supernovas à redshifts intermédiaires. Seul le télescope Rubin/LSST, dont la première lumière est prévue pour la mi-2025 est en mesure de fournir un tel lot de données homogène. En parallèle de l'effort en cours pour constituer et analyser le diagramme LEMAITRE, nous menons une série d'études portant sur la future stratégie d'observation de Rubin/LSST, afin de constituer un tel lot dans les premières années du relevé.

CHIFFRES CLEFS

4000 supernovas dans le diagramme Lemaître : un échantillon entièrement nouveau, représentant plus du double de la statistique actuelle.

ZTF a pris sa millionième exposition en novembre 2023 (**32 millions** de secondes observées).

Théorie de la formation des structures cosmologiques

Les succès les plus marquants du modèle standard cosmologique concernent les grandes échelles auxquelles l'univers est, à une très bonne approximation, quasi-homogène. Un enjeu majeur des grands programmes observationnels actuels (par exemple DESI, EUCLID) et de la prochaine décennie (par exemple LSST) est comprendre si ce même modèle est capable d'expliquer les données abondantes et multiples à des échelles plus petites où l'univers est fortement inhomogène. De part leur qualité et leur richesse, les données fournies par ces programmes (p.ex. des mesures des propriétés statistiques de la distribution des galaxies) constituent 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. Nos travaux portent actuellement sur le calcul de la distribution de la matière noire dans le régime non-linéaire. 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" uniquement soumises à la gra-

tivité. Nous nous intéressons 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 modélisation de la dépendance de la distribution de matière noire, et celle de la matière visible, en fonction des paramètres cosmologiques.

Chercheur et doctorant.es :

Michaël Joyce, Sara Maleubre, Azrul Pohan

CHIFFRES CLEFS

6144³ : nombre de particules dans la plus grande simulation d'un modèle dit "scale-free" utilisée pour déterminer la précision des simulations cosmologiques

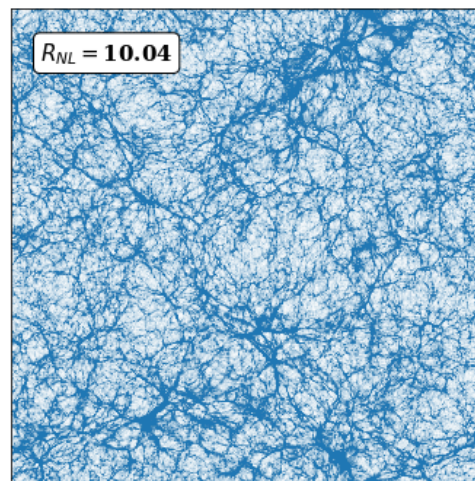
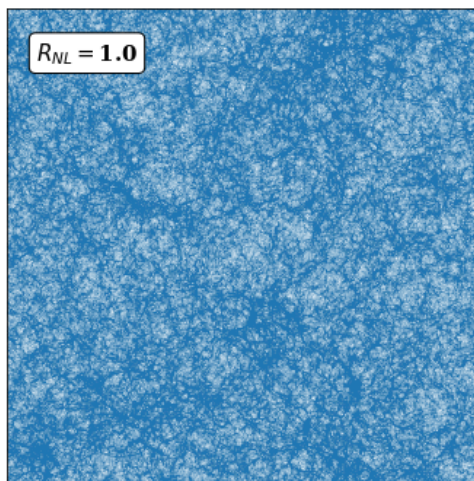


Illustration de la formation des structures en toile cosmique pour deux époques différentes dans une simulation à N-corps d'un modèle "scale-free".

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS

PUBLICATIONS

La liste des publications du LPNHE de janvier 2022 à décembre 2023 est disponible sur le site internet du laboratoire à l'adresse :

<https://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1747>

COMMUNICATIONS À DES CONFÉRENCES

Christina Agapopoulou

- « LHCb Status Report », 152nd LHCC Meeting, CERN, Genève, novembre 2022
- « Rare decays from B and D mesons at LHCb », LHCP2022, cyberspace, mai 2022
- « A GPU High Level Trigger 1 for the upgraded LHCb detector », 30th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Manchester, UK, janvier 2022
- « LHCb HLT1: Tracking and vertexing at 30MHz with GPUs », 41st International Conference on High Energy Physics, Bologna, Italie, juillet 2022
- « Trigger strategy for long-lived particles », 2nd Workshop on electromagnetic dipole moments of unstable particles, Gargnano del Garda, Italie, septembre 2022
- « Tests of Lepton Flavour Universality with the LHCb detector », Exploring the Dark Side of the Universe 2022, Saint-Gilles-les-Bains, La Réunion, novembre 2022

Sid el Moutar Ahmed Maouloud

- « Status and latest news from XENONnT », 33e Rencontres de Blois, Blois, France, mai 2022

Renaud Amalric

- « Commissioning and Early Data from the LHCb Upgrade », Lake Louise Winter Institute 2023, Lake Louise, Alberta, Canada, février 2023

Bernard Andrieu

- « Distributed computing resources for XENONnT », GDR DUPhy, Nantes, France, octobre 2022
- « Detailed GEANT4 Simulation of S2 Photons in XENONnT », GDR DUPhy, Aussois, France, juin 2023

Pierre Antilogus

- « LSST », Colloque Action Dark Energy, Marseille, France, novembre 2022

Pierre Astier

- « Critical view of distances to Cepheids », Anomalies in Cosmology, Annecy, France, novembre 2023
- « Cosmic shear and dark energy », Astroparticle workshop, Orsay, France, novembre 2023
- « Imaging dark energy », Physics of the two infinities, Kyoto, Japon, avril 2023

Eli Ben-Haim

- « Diversity monitoring at the LHC and small experiments », LHCP2022, cyberspace, mai 2022

Alain Blondel

- « Electroweak interactions and neutrinos », Corfu2023 Workshop on future accelerators, Corfu, Grèce, mars 2023

Julien Bolmont

- « Dealing with source-intrinsic energy dependent time-delays when searching for Lorentz invariance violation », VHEPU2022, La Thuile, Italie, mars 2022

- « Source-intrinsic energy dependent time delays in AGNs and search for Lorentz Invariance Violation », Conférence annuelle de l'Action COST CA18108 « Quantum Gravity in the Multi-messenger Era », Rijeka, Croatie, juillet 2023
- « Lorentz Invariance Violation and gamma-ray astronomy – Status and prospects », Journées PNHE, Paris, France, septembre 2023

Anja Butter

- « Performance versus Resilience in Modern Quark-Gluon Tagging », ATLAS Jet/ETmiss meeting, février 2023
- « Boosting Loop Amplitudes and Event Generation with Precision Networks », CFNS workshop « Probing the frontiers of nuclear physics with AI at the EIC », Stony Brook University, cyberspace, septembre 2023

Giovanni Calderini

- « Progress on microchannels at LPNHE », AIDAInnova 1st annual meeting, CERN, mars 2022
- « Report for LPNHE, WP10 », AIDAInnova 2nd annual meeting, CERN, avril 2023

Reina Camacho Toro

- « SM Higgs coupling measurements », 56e Rencontres de Moriond 2022 Electroweak Interactions & Unified Theories, La Thuile, Italie, mars 2022
- « Jet physics at the LHC » et « LA-CoNGA physics: an open science education collaboration between Latin America and Europe for High Energy Physics », 7th Colombian Meeting on High Energy Physics (7th ComHEP), Villa de Leyva, Colombie, décembre 2022
- « Improving ATLAS Hadronic Object Performance with ML/AI Algorithms », HEP2023, Valparaiso, Chili, janvier 2023
- « Engaging the Public through social media and the web in the ATLAS collaboration » et « LA-CoNGA physics: an open science education collaboration between Latin America and Europe for High Energy Physics », 31st International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (LP2023), Melbourne, Australie, juillet 2023
- « The beauty of the Higgs boson », 3rd African Conference on Fundamental and Applied Physics (ACP2023), George, Afrique du Sud, septembre 2023
- « Higgs physics at the LHC », 8th Colombian Meeting on High Energy Physics (8th ComHEP), Ibagué, Colombie, décembre 2023

Floriane Cangemi

- « Probing AGN variability with the Cherenkov Telescope Array », 7th Heidelberg International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, Barcelona, Espagne, juillet 2022

Pavel Chabrilat

- « Novel pixel sensors for the Inner Tracker upgrade of the ATLAS experiment at HL-LHC », 16th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors, Siena, Italie, septembre 2023

Matthew Charles

- « Fermion Generations II (Experiment) », 50th SLAC Summer Institute, SLAC, USA, août 2022

Simon Chiche

- « Prospects from radio detection in-ice, balloon and air showers », VHEPU2022, La Thuile, Italie, mars 2022

- « New features in the radio-emission of very inclined showers », ARENA2022, Saint-Jacques de Compostelle, juin 2022
- « New features in the radio-emission of very inclined air-showers », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023

Artur Cordeiro Oudot Choi

- « Identification of highly merged photon pairs using low-level calorimetry-based variables », ATLAS e/g Workshop 2023 -CERN, Suisse, mars 2023
- « Long Lived ALP decay into 2 photons analysis kick off », ATLAS Long-Lived Particles Forum, février 2023
- « Searching long-lived particle photonic decays using CaloRings », Workshop on Calorimetry in High-Luminosity Collisions, Rio de Janeiro, Brésil, octobre 2023
- « Search for long lived ALPs decaying into a pair of photons », ATLAS Brazil Workshop, Trigger and Search for New Physics, Rio de Janeiro, Brésil, décembre 2023

Pablo Correa Camiroaga

- « NUTRIG: Towards an Autonomous Radio Trigger for GRAND », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023

Olivier Dadoun

- « The Dark Matter Plotter », IRN Terascale & GDR DUPhy joint meeting, Nantes, France, octobre 2022
- Ateliers au Colloque Francophone International sur l'Enseignement de la Statistique à Rennes, organisé par la Société Française de Statistique (SFdS), 2022

Claire Dalmazzone

- « Addressing the challenge of neutrino interaction uncertainties in LBL experiments », Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN23), Naples, Italie, octobre 2023
- « Towards a better measurement of the CP violation phase with Hyper-Kmiokande », International Workshop on the Origin of the Matter-Antimatter Asymmetry (CP2023), Les Houches, France, février 2023

Claudia de Dominicis

- « The DAMIC-M Experiment: Status and First Results », Rencontre de Blois 2022, Blois, France, 2022
- « DAMIC-M status and first Results », Dark Matter 2023, Santander, Espagne, juin 2023
- « DAMIC-M status and first Results », Colloque Dark Energy, Annecy, France, novembre 2023

Frédéric Derue

- « Use of leptons in jets with ATLAS data », IN2P3-CO-PIN workshop, Strasbourg, France, décembre 2022

Jacques Dumarchez

- « Recent Oscillation Results from T2K », ACHEP, Rabat, Maroc, octobre 2023

Marianna Fontana

- « Rare and LFV decays in B and D mesons at LHCb », 56th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italie, mars 2022
- « Rare charm decays at LHCb », 41st International Conference on High Energy Physics, Bologna, Italie, juillet 2022

Tommaso Fulghesu

- « Charged lepton flavor violation searches at LHCb », 4th International Conference on Charged Lepton Flavor Violation 2023 (CLFV 2023), Heidelberg, Allemagne, juin 2023

Romain Gaïor

- « The DAMIC-M détecteur », Journée JJC, Saint-Brévin-les-Pins, France, avril 2022
- « The DAMIC-M Experiment: Status and First Results », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023
- « XeLab: a test platform for xenon TPC instrumentation », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023

Layos Daniel Garcia

- « Supernova neutrinos in XENONnT », GDR DUPhy, Aussois, France, juin 2023
- « SN neutrino detection with a DM detector », Third DMLab Meeting, Karlsruhe, Allemagne, novembre 2023

Nabil Garroum

- « XeLab », GDR DUPhy, Nantes, France, octobre 2022
- « XeLab », Journées R&T 2022, Lyon, France, octobre 2022

Louis Ginabat

- « Redefining Performance: New Techniques for ATLAS Jet & MET Calibration », 8th International Conference on High Energy Physics in the LHC Era, Valparaíso, Chili, janvier 2023

Frédéric Girard

- « XeLab », Journées R&T 2023, Strasbourg, France, novembre 2023
- « DARWIN - recent progress », Third DMLab Meeting, Karlsruhe, Allemagne, novembre 2023

Vladimir Gligorov

- « The Allen project », 2022 CERN Openlab Technical Workshop, CERN, mars 2022
- « A Heterogeneous Trigger System for Upgrade LHCb », PACS22, Basel, Suisse, juin 2022
- « Flavour anomalies and status of indirect probes or the Standard Model », 11th International Conference of the Balkan Physical Union, Belgrade, Serbie, août 2022
- « Quark Flavour Physics », ICHEP 2022, Bologne, Italie, juillet 2022
- « Future LHCb upgrade scenarios for Run 5 », LHCb Upgrade 2 workshop, Barcelone, Espagne, mars 2023

Guillaume Grolleron

- « nectarchain, the scientific software for the Cherenkov Telescope Array-NectarCAM », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023
- « Variability studies of active galactic nuclei from the long-term monitoring program with the Cherenkov Telescope Array », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023
- « Investigating AGN variability with the Cherenkov Telescope Array », JRJC, Saint-Jean-de-Monts, France, octobre 2023

Marion Guelfand

- « Particle content of very inclined air showers for radio signal modeling », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023

Michael Joyce

- « Structure formation and scale-free models », A journey through the theoretical universe, Toulouse, France, juin 2023
- « Gravitational clustering in cosmology », Coarse-grained description for non-equilibrium system and transport phenomena, Rome, Italie, juillet 2022

Dylan Khun

- « Development of an ultra fast likelihood-based distance inference framework for the next generation of SNIa

surveys », Physics of the two infinities, Kyoto, Japon, mars 2023

Leander Lacroix

- « Precision supernova photometry with the ZTF », Colloque Action Dark Energy, Annecy, France, novembre 2023
- « Supernova cosmology with ZTF », JRJC, Saint-Jean-de-Monts, octobre 2022

Bertrand Laforge

- « Applications of Computational Intelligence in Large Scale Science Experiments », CBIC, Salvador de Bahia, Brésil, octobre 2023
- « A biased selection of what we have learned about Higgs physics at the LHC », Conférence de printemps de la Société Brésilienne de Physique, Niterói, Brésil, septembre 2023
- « Short Course in Calorimetry », Workshop on Calorimetry in High-Luminosity Collisions: Instrumentation, Trigger and Search for New Physics, octobre 2023
- « Ikigai, une plateforme pour l'éducation par le jeu et pour la recherche en éducation numérique », EIAH2023, Brest, France, juin 2023
- « La gamification au service de l'innovation pédagogique en physique », Congrès de la SFP 2023, Paris, Juillet 2023

Sandra Le Coz

- « A neural network to classify GRAND radio time traces », ARENA2022, Saint-Jacques de Compostelle, Espagne, juin 2022
- « Identification of air-shower radio pulses for the GRAND online trigger », ICRC2023, Nagoya, Japon, juillet 2023

Jean-Philippe Lenain

- « Very-high-energy gamma-ray surveys with CTA », workshop PHYSTAT-Gamma, cyberspace, septembre 2022
- « Status of the extragalactic program at very high energies with the future Cherenkov Telescope Array », annual meeting of the European Astronomical Society, Cracovie, juillet 2023

Bogdan Malaescu

- « Recent experimental results with implications for PDFs », LHCP 2023, Belgrade, Serbie, mai 2023
- « Energy range for the RGE test and PDF sensitivity in alpha_S evaluations from jet cross section ratios at the LHC », alphas-2022: Workshop on precision measurements of the strong coupling constant, cyberspace, février 2022
- « Introduction to Unfolding (Transfer Matrix- and Machine Learning-based methods) », Workshop on Calorimetry in High-Luminosity Collisions: Instrumentation, Trigger and Search for New Physics, octobre 2023
- « Introduction to Unfolding (Matrix- and Machine Learning-based methods) », CERN Inter-Experiment Machine Learning (IML) Working Group meeting, CERN, juillet 2023
- « Hadronic vacuum polarization: comparing lattice QCD and data-driven results in systematically improvable ways », 6th Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative, Berne, Suisse, septembre 2023
- « Introduction to the Dispersive HVP Discussion Session (Implications of the existing tensions among the experimental $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ measurements for the dispersive combinations (DHMZ)) », 6th Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative, Berne, Suisse, septembre 2023

- « The DHMZ methodology for the data-driven HVP determination with realistic uncertainties », Fifth Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative, Edinburgh, UK, septembre 2022
- « Determinations of alphaQED(mz): DHMZ approach and future perspectives » mini-workshop parametric uncertainties: α_{em} , cyberspace, juillet 2022
- « The DHMZ methodology for the data-driven HVP determination with realistic uncertainties », workshop SchwingerFest 2022: muon g-2, cyberspace, juin 2022

Sara Maleubre

- « Accuracy of power spectrum measurements in Scale-Free simulations », Cosmology with the Large Scale Structure of the Universe, Donostia-San Sebastián Espagne, mai 2023
- « Accuracy of power spectrum measurements in Scale-Free simulations », Moriond cosmology, La Thuile, Italie, janvier 2022

Olivier Martineau

- « GRAND: The Giant Radio Array for Neutrino Detection », ARENA2022, Saint-Jacques de Compostelle, juin 2022
- « GRAND: The Giant Radio Array for Neutrino Detection », workshop Tianguan, Dunhuang, Chine, 2023

Marco Martini

- « Investigation of the MicroBooNE inclusive neutrino cross section on Argon », NUFAC, Salt Lake City, USA, août 2022
- « Sections efficaces d'interaction de neutrinos », École de Gif 2022, Paris, France, septembre 2022
- « Status and challenges of neutrino-nucleus cross sections », IRN Neutrino meeting, Orsay, France, novembre 2023
- « Neutrino interactions & cross sections », DUNE-France Analysis workshop, Orsay, France, novembre 2023

Erwann Masson

- « Searching for New Physics in the First XENONnT Data », IRN Terascale & GDR DUPhy joint, Nantes, France, octobre 2022

Ariel Matalon

- « The Search for Light Dark Matter with DAMIC and DAMIC-M », La Thuile, Italie, janvier 2022

Lucile Mellet

- « Time generation and clock distribution for Hyper-Kamiokande », NUFAC, Salt Lake City, USA, août 2022
- « Latest Neutrino Oscillation Results from T2K », TAUP, Vienne, Autriche, août 2023

José Ocariz

- « Search for boosted resonances in the 10 to 70 GeV mass range and decaying into two photons with ATLAS », IRN Terascale, Bonn, Allemagne, mars 2022
- « Measurements of Higgs boson properties with the ATLAS detector », 8th International Conference on High Energy Physics in the LHC Era, Valparaíso, Chili, janvier 2023
- « Physics Search experimental challenges at HL LHC », Workshop on Calorimetry at High Luminosity colliders, octobre 2023

Yongyu Pan

- « Updates on XeLab Project: a R&D platform of LXe double phase TPC », GDR DUPhy, Aussois, France, juin 2023

Giorgos Papadopoulos

- « Using scientific-grade CCDs for the direct detection of dark matter with the DAMIC-M experiment », VCI2022, Vienne, Autriche, 2022

Quentin Pellegrini

- « Xenon Offline Monitoring », GDR DUPhy, Aussois, France, juin 2023
- « Solar neutrinos in XENONnT », IRN Neutrino, Orsay, France, novembre 2022

Eric Pierre

- Présentation du logiciel de CAO Électronique ALTIUM au réseau PCB-Design de l'IN2P3, Maison de la Recherche et de la Valorisation, Toulouse, France, novembre 2022
- Présentation du travail de bibliothécaire de composants CADENCE de l'IN2P3, Séminaire des Bibliothécaires des composants PCB IN2P3, Paris, France, mai 2023

Francesco Polci

- « Lepton flavor universality and lepton flavor violation tests at LHCb », 56th Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italie, mars 2022

Valentina Raskina

- « Performance studies of the Low Gain Avalanche Detectors for the ATLAS High Granularity Timing Detector in beam tests », VERTEX 2022, Tateyama Japon, octobre 2022

Nicolas Regnault

- « The LSST transient survey », Exploring the Transient Universe, Tokyo, Japon, 2022

Mélissa Ridet

- « Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) des laboratoires de recherche : la démarche », séminaire pour les journées de IBPC (Institut de Biologie Physico-Chimique) Avril 2023
- Présentation du GdR Labos 1point5, invitation de la section 07 du comité national du CNRS, Juin 2023
- Présentation du GdR Labos 1point5, invitation du conseil scientifique de l'Institut de la transition environnemental de l'Alliance Sorbonne Université, Juin 2023
- Présentation de Labos 1point5, Sustainability Workshop, Einstein Telescope Annual Meeting, November 2023

Christophe Roland

- « VBS opposite-sign WW in ATLAS », Multi-Boson Interactions 2023, San Diego, USA, août 2023

Alberto Rosales de León

- « CTA sensitivity to neutrino sources detected by IceCube », Journée Scientifique CTA-France, Paris, France, mai 2023
- « Feasibility studies on the search for Lorentz invariance violation signatures

from flaring blazars with the Cherenkov Telescope Array », High Energy Phenomena in Relativistic Outflows (HEPRO) VIII, Paris, France, octobre 2023

William Saenz

- « Testing neutron to hidden neutron oscillations with Ultra-Cold Neutron Beams », International Workshop on the Origin of the Matter-Antimatter Asymmetry (CP2023), Les Houches, France, février 2023

Alessandro Scarabotto

- « Tracking on GPU at LHCb's fully software trigger », Connecting The Dots 2022, Princeton, USA, mai 2022
- « Rare decays of charm hadrons at LHCb », The 31th International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energies, Melbourne, Australie, juillet 2023

Luca Scotti Lavina

- « The relentless hunt for Dark Matter », 18th Rencontres du Vietnam, Quy Nhon, Vietnam, juillet 2022
- « DARWIN and the XLZD Consortium », IRN Terascale & GDR DUPhy joint meeting, Nantes, France, octobre 2022
- « Status and Perspectives of Direct Dark Matter Searches », International Conference on the Physics of the Two Infinities, Kyoto, Japon, mars 2023
- « The XeLab Project », XeSAT2023, Nantes, France, juin 2023

Thierry Souverin

- « StarDICE: A photometric calibration experiment to anchor standard stars on the NIST flux scale at the milli-magnitude level », LSST France, Lyon, décembre 2023
- « Slitless spectrophotometry analysis with StarDICE », LSST France, Grenoble, juin 2023
- « Measurement of telescope response using a CBP », LSST France, Paris, novembre 2022
- « Measurement of telescope response using a CBP », Moriond cosmology, La Thuile, Italie, janvier 2022

Ting Tan

- « Modelling astrophysical contaminants in Lyman-alpha analyses », Shanghai Astronomical Observatory & National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, juillet 2023
- « Detection of the Damped Lyman-alpha systems in quasar spectra with machine learning algorithms », Shanghai Astronomical Observatory, juillet 2022

Michelangelo Traina

- « 100 Times Darker: DAMIC-M efforts towards 0.1 dru's », 18th rencontres du Vietnam, Vietnam, juillet 2022

Svyatoslav Trusov

- « Mocks for the DESI BGS », Colloque Action Dark Energy, Annecy, France, octobre 2023

- « GLAM BGS pipeline », GLAM workshop, Granada, Espagne, mai 2023
- « Cosmological analysis with the DESI BGS », European Astronomical Society, Valencia, Espagne, juin 2022

Enya Van den Abeele

- « Cosmic shear estimation method based on galaxies images second moments », LSST France, Lyon, France, décembre 2023
- « Cosmic shear estimation method based on galaxies images second moments », Colloque Action Dark Energy, Annecy, France, novembre 2023

Vincent Voisin

- « Advanced time transfer comparison: GNSS versus fiber over a 3 km long baseline », IEEE IFCS-EFTF, Toyama, Japan, mai 2023

Uladzislava Yevarouskaya

- « The T2K Near Detector Upgrade », ICHEP, Bologna, Italie, juillet 2022

Pauline Zarrouk

- « DESI Y1 : Full-Shape analysis pipeline », Colloque Action Dark Energy, Annecy, France, octobre 2023
- « Galaxy clustering with DESI », Euclid France Theory and Likelihood Workshop, Paris, France, novembre 2022
- « Cosmological spectroscopic surveys: pass (SDSS-eBOSS) and current/future (DESI) », European Astronomical Society, Valencia, Espagne, juin 2022
- « Updates from DESI: towards Y1 analyses », Colloque Action Dark Energy, Marseille, France, octobre 2022

Jean-Philippe Zopounidis

- « First results of the low background chamber and the DAMIC-M experiment », UCLA DM2022, Los Angeles, USA, janvier 2022

SÉMINAIRES

Vladimir Gligorov

- « Coherent test of lepton universality in beauty to strange quark transitions », Josef Stefan Institute, Ljubljana, Slovénie, janvier 2023
- « Achievements in particle physics over the last decade and perspectives for the future », PMF Niš, Serbie, novembre 2023

Olivier Martineau

- « GRAND », LPC Caen, France, juin 2023

- « GRAND », XiDian University, Xi'An, Chine, octobre 2023
- « GRAND », IFAE, Barcelona, Espagne, novembre 2023

José Ocariz

- « Photons to search for new phenomena with ATLAS », TU Dresden, Allemagne, juin 2022

Alberto Rosales de León

- « Neutrino and gamma-ray astronomy in the era of multi-messenger astrophysics », LPNHE, mars 2023

Luca Scotti Lavina

- « First results of XENONnT on dark matter search », CPPM, Marseille, France, Octobre 2023

INTERVENTIONS DANS LES ÉCOLES THÉMATIQUES

Julien Bolmont

- « Gamma-ray data collection, calibration and analysis », école « Theoretical and experimental approaches to quantum gravity phenomenology », Belgrade, Serbie, septembre 2022

François Legrand

- intervention après-midi RESPIRE sur CEPH, fin 2023

ORGANISATION DE CONFÉRENCES ET D'ÉCOLES THÉMATIQUES

Pierre Astier

- Membre du comité scientifique, Moriond cosmology, La Thuile

Aurélien Bailly-Reyre

- Organisateur et enseignant, Action Nationale de Formation "Conteneurs", Fréjus, novembre 2023
- Comité local d'organisation, Journées LCG-France, LPNHE, Paris, juin 2023

Giovanni Calderini

- Chair du comité d'organisation, SIMDET 2023, Ecole de simulation de dispositifs à semi-conducteurs, LPNHE, Paris, novembre 2023
- Organisateur, ATLAS Pixel week, LPNHE, Paris, novembre 2023

Reina Camacho Toro

- Membre du comité scientifique, 14th International Workshop on Boosted Object Phenomenology, Reconstruction, Measurements and Searches at Colliders (BOOST 2022), Hamburg, Allemagne, août 2023
- Membre du comité scientifique, 15th International Workshop on Boosted Object Phenomenology, Reconstruction, Measurements and Searches at Colliders (BOOST 2023), Berkeley, USA, août 2023
- Membre du comité d'organisation local, Higgs Hunting 2022 et 2023, Paris, France, septembre 2022 et 2023

Francesco Crescioli

- Membre du comité d'organisation, SIMDET 2023, Ecole de simulation de dispositifs à semi-conducteurs, LPNHE, Paris, novembre 2023

Frédéric Derue

- Membre du comité d'organisation, TopLHCFrance2022, IP2I Lyon, France, mai 2022

- Membre du comité d'organisation, TopLHCFrance2023, IPHC Strasbourg, France, juin 2023
- Comité local d'organisation, Journées LCG-France, LPNHE Paris, juin 2023

Jacques Dumarchez

- Comité local d'organisation, École de Gif 2022, LPNHE, septembre 2022
- Membre du comité d'organisation, Moriond 2022, Cosmology, La Thuile, Italie, janvier 2022
- Membre du comité d'organisation, Moriond 2022, Gravitation, La Thuile, Italie, janvier 2022
- Membre du comité d'organisation, Moriond 2022, Very High Energy Phenomena in the Universe (VHEPU), La Thuile, Italie, mars 2022
- Membre du comité d'organisation, Moriond 2023, Gravitation, La Thuile, Italie, mars 2023

Romain Gaïor

- Membre du comité d'organisation et du comité scientifique du GDR DuPhy

Claudio Giganti

- Comité local d'organisation, École de Gif 2022, LPNHE, septembre 2022

Vladimir Gligorov

- Membre des comités de d'organisation internationale, Connecting the Dots
- Membre du advisory committee de la série d'ateliers ML4Jets

Mathieu Guigue

- Comité local d'organisation, École de Gif 2022, LPNHE, septembre 2022
- Comité d'organisation, CP2023, Les Houches, janvier 2023

Bertrand Laforge

- 12^{ème} école européenne IDPASC, Grenade, septembre 2023
- Coordinateur européen du réseau IDPASC, membre de l'Advisory Committee international de cette école
- Co-organisation d'un atelier « Obstacles et besoins de la ludopédagogie » à la conférence EIAH2023 (Brest, Juin 2023)

Bogdan Malaescu

- Membre du comité d'organisation de la conférence Moriond QCD, la Thuile, Italie, 2022 et 2023

Olivier Martineau

- Membre du comité d'organisation de la conférence Very High Energy Phenomena in the Universe, depuis 2021

Marco Martini

- Membre du comité du programme scientifique de la conférence annuelle NuFact, depuis 2018

José Ocariz

- Organisateur des éditions 2021, 2022 et 2023 de LA-CoNGA physics Network School

Ugo Pensac

- Membre du comité d'organisation, Congrès des doctorants de l'école doctorale Step'Up, Paris, avril 2023

Eric Pierre

- Co-organisation de la formation Update Allegro SPB174 au LPNHE, février 2023

Boris Popov

- Comité local d'organisation, École de Gif 2022, LPNHE, septembre 2022
- Membre du comité du programme scientifique de la conférence « Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors » (NNN23), Naples, Italie, octobre 2023

Mélissa Ridet

- Membre du comité d'organisation, conférence « Enseigner les Transitions Écologiques et Sociales dans le Supérieur », 2023

Patricia Warin-Charpentier

- Comité d'organisation des Journées informatiques IN2P3, 2022

Pauline Zarrouk

- Membre du comité d'organisation, Debating the potential of machine learning in astronomical surveys IAP Paris, novembre 2023
- Membre du comité du programme scientifique, Colloque Action Dark Energy, LAPP Annecy, octobre 2023
- Membre du comité du programme scientifique, GdR Cosmologie, LPNHE Paris, janvier 2023
- Membre du comité du programme scientifique, Ateliers Action Dark Energy, Marseille, juin 2022
- Membre du comité du programme scientifique, Colloque Action Dark Energy, Marseille, octobre 2022

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

Pierre Antilogus

- Responsable LSST IN2P3, 2022-2023
- DESC Advisory Committee, depuis 2021
- Responsable scientifique pour le changeur de filtre LSST, depuis 2014
- Technical manager for the filter exchange system LSST, depuis 2020

Pierre Astier

- Groupe de travail « Physique Fondamentale » du CNES, depuis 2019

Aurélien Bailly-Reyre

- Président ou membre de jurys de concours CNRS
- Responsable du projet IN2P3 ComputeOps, depuis 2023

Christophe Balland

- Responsable DESI IN2P3, 2019-2022
- Délégué scientifique à la politique de site auprès de la direction de l'IN2P3, depuis 2023

Eli Ben-Haim

- Officier ECGD (Early Career Gender and Diversity) de LHCb, 2020-2022
- Coordinateur senior du groupe BnoC / Event Selection de LHCb, depuis 2017
- Coordinateur du groupe Rare decays de la collaboration HFLAV, depuis 2013

Marc Betoule

- Membre du conseil scientifique du PNCG, depuis 2021

Julien Bolmont

- Co-coordonateur de la commission « Origine des ondes gravitationnelles et des cataclysmes astrophysiques » du DIM ORIGINES de la Région Île de France, 2022
- 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", 2019-2023
- Au sein de l'Action COST CA18108, responsable du comité chargé de l'attribution des bourses de participations aux conférences, 2019-2023

Anja Butter

- Co-convener du groupe de travail IML, depuis 2021

Giovanni Calderini

- ITk pixel Resources coordinator, 2018-2023
- ITk pixel Hybridization coordinator, depuis 2023
- Coordinateur des activités ITk au sein de l'IN2P3, depuis 2016
- Deputy Scientific Coordinator, AIDAInnova, depuis 2021

Reina Camacho Toro

- Co-coordinatrice du groupe de performance du détecteur Jet/ETmiss dans la collaboration ATLAS, depuis 2021
- Coordinatrice Adjointe/contacte CNRS du projet Erasmus+ LA-CoNGA Physics (Latin American Latin American Alliance for Capacity building in Advanced Physics), depuis 2020

Jean-Marc Colley

- Responsable technique du projet NUTRIG, depuis 2022

Pablo Correa Camiroaga

- Représentant des jeunes chercheurs au sein de la collaboration GRAND, depuis 2023

Isabelle Cossin

- Responsable de l'animation du réseau des communicants de l'IN2P3
- Groupe de travail pour la mise en place du réseau Com'on des Chargés de Communication de l'IN2P3
- 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)

Wilfrid da Silva

- Membre du Collaboration Board de COMET

Olivier Dadoun

- Président ou membre de jurys de concours CNRS

Guillaume Daubard

- Membre du comité de pilotage des ANF Mécanique IN2P3, depuis 2011
- Membre expert de commission régionale d'interclassement CNRS, 2023

Frédéric Derue

- Responsable du groupe Calcul ATLAS France, depuis 2019
- Membre du conseil de direction de LCG-France
- Responsable scientifique du GIS GRIF (Grille au Service de la Recherche en Ile de France), depuis 2021

Marianna Fontana

- Coordinatrice du groupe Charm decays de LHCb, 2021-2022

Romain Gaïor

- Membre du conseil GDR DUPhy, depuis 2020
- Responsable électronique DAMIC-M

Claudio Giganti

- Coordinateur de la mise à jour de N280 pour T2K, depuis 2019
- Membre du comité exécutif de l'expérience T2K, depuis 2021
- Responsable du groupe de travail « HK-ND280 » pour l'expérience HK, 2019-2023
- Responsable du groupe de travail « Outils communs » dans l'IRN Neutrino, depuis 2020
- Responsable national pour l'expérience T2K, depuis 2021

Vladimir Gligorov

- Project leader du RTA de LHCb, 2019-2022
- Membre du Phase 2 Upgrade Cost Group (P2UG) for CMS HL-LHC upgrade, depuis 2023
- Membre de l'U2PG (Upgrade 2 Planning Group) de LHCb, depuis 2022
- Co-coordonateur du machine learning / AI work package dans L'ITN SMAR-THEP, depuis 2021

Mathieu Guigue

- Co-responsable du groupe de simulation et reconstruction de ND280 pour l'expérience T2K, depuis 2019
- Responsable de la distribution du calcul pour l'expérience HK, depuis 2022
- Expert scientifique pour l'ANR, depuis 2022

Delphine Hardin

- Membre du conseil scientifique du LPSC Grenoble, depuis 2021

Didier Lacour

- HGTD Detector Units Coordinator, depuis 2020
- Membre de l'Institute Board de HGTD

Bertrand Laforge

- Membre du conseil scientifique du réseau européen IDPASC
- Membre de la section 01 du CoNRS, depuis 2022
- Coordinateur pour la France du projet France-Brésil COFECUB ASPIC, 2018-2022
- Coordinateur du réseau Européen IDPASC, depuis 2023
- Membre du conseil scientifique de Digital FCU (projet AMI CMA France 2030), depuis 2023
- Membre du conseil scientifique de Games For Citizens, depuis 2020

Alexandre Lantheaume

- Membre expert de jury concours externe CNRS, 2022
- Membre expert de jury concours interne CNRS, 2023
- Membre du COPIL RDM-FA, depuis 2021

Didier Laporte

- Membre du comité de pilotage d'Atrium, depuis 2014
- Membre du comité de pilotage des ANF Mécanique IN2P3, depuis 2016
- Membre élu de la commission régionale de la formation permanente de la délégation Paris Centre, 2015-2023
- Membre élu de la commission régionale de l'action sociale de la délégation Paris Centre, 2015-2023
- Membre élu au conseil scientifique de la faculté de physique, depuis 2022
- Membre élu du conseil scientifique de l'IN2P3, 2018-2023
- Membre élu C de concours externe CNRS, 2022-2023

Olivier Le Dortz

- Responsable de l'électronique Back End du SciFi de LHCB, 2016-2023

François Legrand

- Président ou membre de jurys de concours CNRS
- Responsable du groupe de travail « Data Management » au sein de la collaboration GRAND, depuis 2023

Jean-Philippe Lenain

- Coordinateur du groupe de travail Extragalactique du consortium CTA, 2021-2022
- Membre du Consortium Board de CTA, depuis 2016

Antoine Letessier Selvon

- Coordinateur scientifique DAMIC-M
- Co-coordonateur ERC DAMIC-M
- Président du conseil scientifique de Cosmos à L'école

Bogdan Malaescu

- Convener du Comité de Statistique d'ATLAS, 2020-2022

David Martin

- Co-responsable du réseau régional des électroniciens de l'IDF et responsable de l'organisation de plusieurs formations

Olivier Martineau

- Membre de la section 01 du CoNRS, 2020-2023
- Co-porte parole de la collaboration GRAND, depuis 2015
- Porteur du projet NUTRIG, depuis 2022

Marco Martini

- Membre du comité NuSTEC, depuis 2015

Victor Mendoza

- Correspondant Sécurité Systèmes d'Information pour la grille de calcul

Evelyne Mephane

- Membre de jury de concours externe CNRS et MEN
- Présidente fondatrice du CREDAU, réseau des administrateurs de la DR02
- Responsable de l'animation du groupe de réflexion sur la formation d'administrateur au sein du CREDAU
- Responsable de l'animation du groupe de réflexion sur la fonction d'Administrateur au sein du CREDAU
- Expert auprès de l'Observatoire des Métiers pour la relecture des profils de concours

Jean-Luc Meunier

- Coordinateur Front End Electronics de NectarCAM, depuis 2023
- Coordinateur Front End Board de NectarCAM, depuis 2020
- Responsable technique CTA au LPNHE, depuis 2020

Iréna Nikolic

- HGTD Sub-system Speaker Committee Member, 2022-2024

José Ocariz

- Coordinateur international du projet européen LA-CoNGA physics (Latin-American alliance for Capacity building in Advanced Physics, ERASMUS+ CBHE)
- Membre du comité de pilotage du laboratoire franco-japonais de physique des particules TYL-FJPP, 2018-2023

Eric Pierre

- Membre du comité de pilotage du réseau PCB-Design de l'IN2P3, depuis 2023
- Membre du réseau de bibliothécaires CADENCE de l'IN2P3, depuis 2018

Francesco Polci

- Deputy Operations Coordinator de LHCB, 2020-2022
- Operations Coordinator de LHCB, depuis 2022

Boris Popov

- Coordinateur de l'analyse dans la collaboration NA61/SHINE, depuis 2009
- Responsable national pour l'expérience NA61/SHINE, depuis 2018

Paolo Privitera

- Porte-parole de la collaboration DAMIC-M
- Coordinateur ERC DAMIC-M

Nicolas Regnault

- Co-responsable projet ZTF-II, depuis 2021

Mélissa Ridel

- Membre de la direction du GDR Labos1point5 depuis 2022

Stefano Russo

- Responsable du système de temps pour l'expérience HK, depuis 2020
- Coordinateur technique pour l'assemblage de l'électronique d'HK au CERN, depuis 2023
- Responsable technique national pour l'expérience HK, depuis 2023

Luca Scotti Lavina

- Responsable national de XENON pour l'IN2P3, depuis 2023
- Coordinateur du groupe de travail Computing de XENON, depuis 2011
- Coordinateur du groupe de travail Xenon Storage and Recovery System de XENON, depuis 2012
- Coordinateur du groupe de travail Liquid Target de DARWIN, jusqu'en 2022
- Coordinateur du groupe de travail Computing de DARWIN, depuis 2023
- Membre de l'Editorial Board de XENON, depuis 2022
- Responsable scientifique R&T XeLab de l'IN2P3, depuis 2020
- Membre du conseil GDR DUPhy, depuis 2020

Sophie Trincas-Duvold

- Responsable de l'accueil et suivi des doctorants du LPNHE, depuis 2021
- Référente égalité et discriminations du LPNHE, depuis 2022

François Toussnel

- Responsable technique national de CTA pour l'IN2P3, depuis 2018
- Project manager de NectarCAM, depuis 2023

Patricia Warin-Charpentier

- Correspondante Sécurité Systèmes d'Information
- Président ou membre de jurys de concours CNRS
- Représentante du LPNHE auprès du Comité de coordination du Réseau des Informaticiens de l'IN2P3 et de l'IRFU
- Membre du comité de pilotage de RESINFO (Fédération des réseaux d'administrateurs Système et Réseaux), 2016-2022
- Membre du bureau référente budget de RESINFO, depuis janvier 2023
- Référente laboratoire pour le réseau TEAMLAB
- Représentante CNRS au sein du Groupe national Logiciel du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, depuis 2020

Pauline Zarrouk

- Responsable DESI IN2P3, depuis 2023
- Responsable du Key Project 5 de DESI, depuis 2020

CONFÉRENCES GRAND PUBLIC

Eli Ben-Haim

- « La physique des particules – un voyage au cœur de la matière », conférence grand public au Centre Shimon Peres pour la paix et l'innovation, Tel Aviv, juillet 2022

Reina Camacho Toro

- « Du Big Bang au CERN », conférence organisée par les divisions Astrophysique et Champs & Particules de la Société Française de Physique (SFP), Paris, France, septembre 2023
- « Communities of practice and the pursue for Open science on a global scale », Software Sustainability Institute's Collaboration Workshop 2023, Manchester, UK, mai 2023
- « LA-CoNGA physics: una colaboración Europea-Latinoamericana de educación abierta en física avanzada », webinaire organisé par la United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), septembre 2023

Bertrand Laforge

- « Qu'avons-nous appris sur le boson de Higgs depuis sa découverte », Olympiades de physique France, Université Paris Cité, Paris, décembre 2023
- « Ikigai, une plateforme pour l'enseignement par le jeu », Impromptu Capsule, Sorbonne Université, décembre 2023

Pascal Vincent

- « Un éclairage sur la lumière », conférence grand public organisée par le centre culturel de la mairie de Malakoff, janvier 2022

Pauline Zarrouk

- « Dessine ton futur », Festival Atmosphères, Courbevoie, octobre 2022

ACTIVITÉS DE VULGARISATION

Tristan Beau

- Atelier PyCoo au salon « Culture et Jeux Mathématiques », mai 2022
- Atelier PyCoo au salon « Culture et Jeux Mathématiques », mai 2023
- Masterclass lycéennes PyCoo, organisées à l'Institut Henri Poincaré par l'association Séphora Berrebi, juin 2022
- Masterclass lycéennes PyCoo, organisées à l'Institut Henri Poincaré par l'association Séphora Berrebi, juin 2023
- Atelier collaboratif PyCoo, Fête de la Science 2022, octobre 2022
- Atelier collaboratif PyCoo, Fête de la Science 2023, octobre 2023

Julien Bolmont

- Président du jury du concours « Ma thèse en trois minutes », Fête de la Science, octobre 2023

Reina Camacho Toro

- Panéliste « Universal Science » pendant la ATLAS Collaboration Week, Vancouver, Canada, juin 2023

Matthew Charles

- Contribution à un article dans une édition 2022 du média allemand Deutsche Welle : « Life as an LGBTQ scientist », <https://www.dw.com/en/out-lgbtq-scientists-between-success-and-discrimination/a-62217677>
- Modérateur et animateur de séances Masterclasses au LPNHE, 2023

Olivier Dadoun

- Atelier PyCoo au salon « Culture et Jeux Mathématiques », mai 2022
- Atelier PyCoo au salon « Culture et Jeux Mathématiques », mai 2023
- Masterclass lycéennes PyCoo, organisées à l'Institut Henri Poincaré par l'association Séphora Berrebi, juin 2022
- Masterclass lycéennes PyCoo, organisées à l'Institut Henri Poincaré par l'association Séphora Berrebi, juin 2023
- Atelier collaboratif PyCoo, Fête de la Science 2022, octobre 2022
- Atelier collaboratif PyCoo, Fête de la Science 2023, octobre 2023

Frédéric Derue

- Fête de la Science 2022, mise en place des visites et stands, octobre 2022
- Fête de la Science 2023, mise en place des visites et stands, octobre 2023

Romain Gaïor

- Atelier « Radioactivité », fête de la science, LPNHE, France, depuis 2016

Vladimir Gligorov

- Rédaction d'un chapitre pour « Étonnants Infinis », livre de l'IN2P3, éditions CNRS

Bertrand Laforge

- Utilisation de l'apprentissage automatique en physique des hautes énergies, Séminaire Master de physique Sorbonne Université, novembre 2022 et novembre 2023

Alexandre Lantheaume

- Atelier « Impression 3D », Fête de la Science, LPNHE, 2022 & 2023

Jean-Philippe Lenain

- Interventions à l'école primaire Notre Dame, Viry-Châtillon, avril 2022
- Interventions à l'école primaire Notre Dame, Viry-Châtillon, mai 2023
- Implication dans les visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2022
- Implication dans les visites du LPNHE à la fête de la science, octobre 2023

Bogdan Malaescu

- Session de discussions avec un groupe d'étudiants pendant la "Fête de la science" au LPNHE, octobre 2022

Ugo Pensac

- Participation au concours « Ma thèse en 5 minutes », Fête de la Science, LPNHE, octobre 2023

Eric Pierre

- Présentation des normes électroniques IPCs au service électronique du LPNHE suite à un retour de formation

Francesco Polci

- Exposition photographique itinérante grand public liées à notre discipline dans le cadre du GDR-InF (<http://gdrintensityfrontier.in2p3.fr/ExpoPhoto/>), Fête de la Science, LPNHE, octobre 2022

Alberto Rosales de León

- Participation à la Fête de la Science de la Cité Universitaire, mai 2023

Luca Scotto Lavina

- Atelier « Radioactivité », Fête de la Science, LPNHE, depuis 2017
- Interview sur la matière noire dans Sciences et Avenir, avril/juin 2022

Pauline Zarrouk

- Membre scientifique du Festival Atmosphères de Courbevoie, octobre 2023
- Membre du comité scientifique du Festival Atmosphères de Courbevoie, depuis 2022
- Membre du comité scientifique du Festival d'Astronomie de Fleurance, depuis 2020

Marco Zito

- « Étonnants infinis », livre de l'IN2P3, éditions CNRS
- « Marie Curie à la plage », Dunod, 2023

DISTINCTIONS

Reina Camacho Toro

- Software Sustainability Institute fellowship, 2023

Bogdan Malaescu

- Prix Jaffé de l'Académie des sciences - Fondation de l'Institut de France, 2023

Matthew Charles

- Prix Joliot-Curie de la Société Française de Physique (SFP), 2023

Enseignement supérieur et formation par la recherche

- L'enseignement supérieur et le LPNHE
 - Les enseignements de Licence
 - Le Master
 - Spécialité Noyau, Particules, Astroparticules et Cosmologie (NPAC)
 - Spécialité Capteurs, Instrumentation et Mesures (CIMES)
 - Spécialité Ingénierie Nucléaire (IN)
 - Le Doctorat
 - La formation en alternance
- Responsabilités dans les instances universitaires
- Les thèses au LPNHE
 - Le recrutement des doctorantes et doctorants
 - Les financements des thèses
 - L'accueil et le suivi des étudiantes et étudiants au LPNHE
- Les stages au laboratoire
 - Formations d'origine des stagiaires
 - Thématiques des stages
 - Accueil au laboratoire
- Stagiaires accueilli.es au laboratoire (hors élèves du secondaire) sur la période 2022-2023



Enseignement supérieur et formation par la recherche

Les activités de formation et de diffusion des connaissances constituent une des missions principales du LPNHE. Les 20 enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs (EC) du laboratoire, rattachés soit à Sorbonne Université (SU), soit à l'Université Paris Cité (UPCité), dispensent des enseignements à tous les niveaux, du L1 au doctorat, en abordant les concepts de base aussi bien que les développements les plus récents de la recherche. D'autre part, chaque année, des personnels du LPNHE sont également formateurs ou formatrices dans des écoles thématiques.

L'implication particulièrement forte des EC du LPNHE dans les parcours d'enseignement et la gestion de différentes spécialités de Masters permet d'établir un

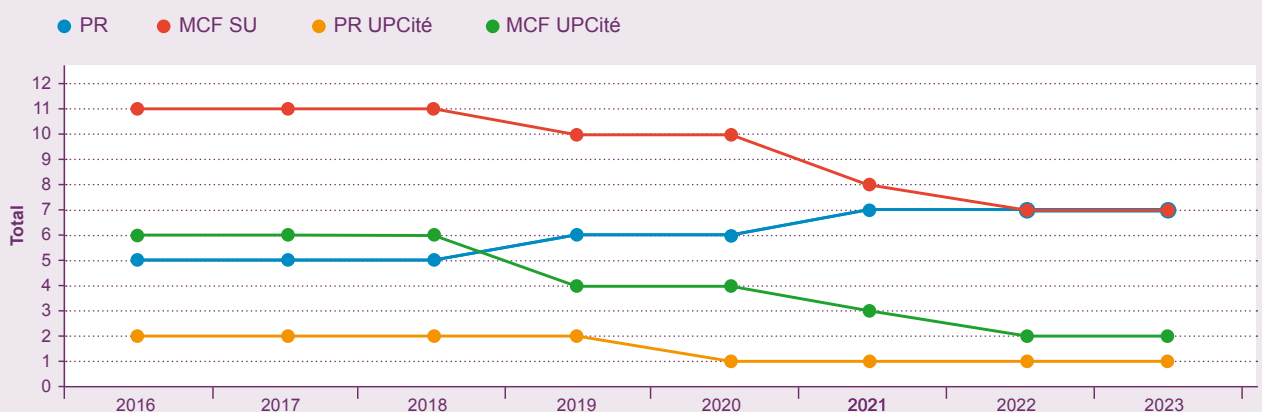
lien fort entre le laboratoire et les étudiantes et étudiants, et de renforcer la visibilité du LPNHE auprès de ces derniers et auprès des deux universités de tutelle.

La formation par la recherche est également une des missions importantes du laboratoire : les équipes scientifiques et techniques accueillent en moyenne une dizaine de nouveaux doctorants et doctorantes chaque année ainsi qu'une cinquantaine de stagiaires. Cet accueil se fait avec l'aide de chargés de mission du laboratoire : la prise en charge des stagiaires est coordonnée par un responsable des stages tandis que l'accueil et le suivi des doctorants et doctorantes est assuré par une chargée de mission dédiée.

L'enseignement supérieur et le LPNHE

Environ la moitié des chercheurs et chercheuses du LPNHE sont des enseignantes-chercheuses et des enseignants chercheurs (EC) de Sorbonne Université (SU) et de l'Université Paris Cité (UPCité).

Le graphique ci-dessous montre l'évolution du nombre d'EC des deux universités tutelles du LPNHE depuis 2016. Il montre que ce nombre est en légère baisse depuis plusieurs années, notamment à l'UPCité.



Évolution des effectifs enseignant.es-chercheur.es au LPNHE entre 2016 et 2023.

Aux EC titulaires s'ajoutent une dizaine de doctorantes et doctorants chargés de mission d'enseignement. Des chercheurs, chercheuses, ingénieurs et ingénieures CNRS du laboratoire

participent également à des enseignements que ça soit à l'Université, dans des grandes écoles, des écoles thématiques de l'IN2P3 ou encore des écoles d'été.

Dans les deux universités, les enseignements sont dispensés à tous les niveaux : de la Licence au Master, principalement dans les UFR de Physique, mais également dans celui de Mathématiques ou encore dans des cursus comme celui de la première année des études de santé. 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.

Les enseignements de Licence

Les EC du LPNHE participent aux enseignements des trois années de la licence (L1, L2, L3) dans les différentes mentions (ou portails) 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.). Outre les enseignements proprement dits, ils assurent également la responsabilité de plus d'une vingtaine d'unités d'enseignement, certaines ayant des effectifs de plus de 800 étudiantes et étudiants.

Le Master

En première année de master, les EC assurent les enseignements liés principalement 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. Ces enseignements ont lieu dans le cadre de différents Masters : Master « Physique Fondamentale et Applications » ou « Électronique, Énergie Électrique, Automatique » de SU, Master « Physique Fondamentale et Applications », Master « Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation » du domaine « Sciences, Technologie et Santé » de l'UPCité ou encore Master International « Paris Physics Master » conjointement élaboré par SU et UPCité dont deux EC 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.es 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 EC SU et une EC UPCité du laboratoire.

Partenariats : Sorbonne Université, Université Paris Cité et 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.es 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 EC du laboratoire.

Partenariats : SU et ESPCI

Spécialité Ingénierie Nucléaire (IN)

Cette spécialité a pour objectif de former des étudiant.es dans les domaines du génie civil, l'instrumentation pour le nucléaire, la gestion des ressources et la modélisation du stockage des déchets. Dans le cadre de cette formation, des personnels du LPNHE ont la responsabilité de cours et de travaux pratiques de physique nucléaire et d'instrumentation.

Partenariat : SU

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 ». Sur la période de ce rapport d'activité, deux EC du laboratoire se sont succédé.es comme directrice/directeur adjoints pour SU de cette ED. Une autre EC assure la responsabilité de la formation pour la composante « Physique de l'Univers » et fait partie du Conseil de l'ED. Toutes ces personnes participent aux concours de recrutement des doctorants et doctorantes.

Par ailleurs, un EC 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 de l'ED.

Des EC du laboratoires sont également impliqués dans la formation doctorale au travers des cours proposés par les écoles doctorales et des formations dispensées à SU pour les doctorant.es chargé.es chargé.e.s de mission d'enseignement.

La formation en alternance

Les services techniques du laboratoire s'impliquent dans la formation en alternance en accueillant régulièrement des apprentis de tous niveaux. Le service électronique accueille actuellement un apprenti Ingénieur en Instrumentation-Mesure et Qualité (CFA-CNAM) jusqu'en septembre 2024. Le service mécanique a accueilli un apprenti jusqu'en août 2022 qui a obtenu un DUT en Génie Mécanique et Productive (CFAI-Centre Val de Loire) et un nouvel apprenti prépare un BTS Conception de Produits Industriels (CFA Dorian) depuis septembre 2023. Le service informatique forme également 2 apprentis, le premier prépare un master en Ingénierie Réseaux et Systèmes (CFA AFORP) depuis septembre 2022, le deuxième a commencé un BTS Service Informatique aux Organisations (CFA AFIA) en septembre 2023.



RESPONSABILITÉS DANS LES INSTANCES UNIVERSITAIRES

- Aurélien Bailly-Reyre
 - Membre du Conseil Scientifique de l'UFR de Physique de Sorbonne Université
- Christophe Balland
 - Co-directeur de l'Initiative Physique des Infinis de l'Alliance Sorbonne Université, depuis 2020
 - Membre élu CNU 34, depuis 2023
 - Co-responsable de l'UE Mécanique et Physique de Sorbonne Université, depuis 2019
- Tristan Beau
 - Élu au conseil de la faculté des sciences de Université Paris Cité, depuis 2023
 - Élu au sénat académique de Université Paris Cité, depuis 2023 (membre du sénat académique en formation restreinte, de la commission formation du sénat)
 - Membre ex-officio du conseil des enseignements de l'UFR de Physique de Université Paris Cité
 - Responsable de la formation à l'agrégation interne de physique-chimie de Université Paris Cité
- Julien Bolmont
 - Membre élu suppléant du CNU, section 29 "Constituants élémentaires", 2019-2023
 - Directeur adjoint pour Sorbonne Université et gestionnaire de la composante "Physique de l'Univers" de l'École Doctorale (ED) STEP'UP (Sciences de la Terre et de l'Environnement et Physique de l'Univers de Paris, ED560), depuis 2022
 - Co-responsable de la plateforme de TP de physique nucléaire du Master de Physique, depuis 2016
- Mathieu Guigue
 - Membre du conseil de l'UFR de Physique de Sorbonne Université, depuis 2022
- Michael Joyce
 - Responsable du suivi des doctorants, Ecole doctorale « Physique en Ile de France », depuis 2019
- Bogdan Malaescu
 - Représentant du LPNHE à la FRIF ("Fédération de Recherche Interactions Fondamentales"), depuis 2021
- Iréna Nikolic
 - Membre du conseil des enseignements de l'UFR de Physique de l'Université Paris Cité
- José Ocariz
 - Membre élu suppléant du CNU, section 29 "Constituants élémentaires", 2019-2023
 - Membre du Conseil Scientifique de l'UFR de physique Université Paris Cité, depuis 2021
- Mélissa Ridel
 - Vice-doyenne transverse enjeux environnementaux de la faculté sciences et ingénierie (FSI) de Sorbonne Université
 - Membre de la commission d'avancement des maîtres de conférences Hors Classe des sections 28, 29 et 30 de la FSI de Sorbonne Université en 2022
 - Membre du Conseil de l'École Doctorale PHENIICS de l'Université Paris-Saclay depuis 2013
- Sophie Trincaz-Duvoid
 - Référente égalité et discriminations de l'UFR de Physique de Sorbonne Université, depuis 2023
 - Chargée de suivi de la politique de recherche en physique pour la FSI de Sorbonne Université, 2022-2023
 - Élu au conseil d'UFR de Physique de Sorbonne Université, depuis 2022
 - Élu au conseil de département de Master, depuis 2022
 - Membre de la commission des personnels enseignants de l'UFR de Physique de Sorbonne Université, depuis 2022
 - Membre du comité de pilotage de l'Initiative IPI de Sorbonne Université, depuis 2020

Les thèses au LPNHE

Le LPNHE s'investit pleinement dans sa mission de formation par la recherche en accueillant chaque année entre 8 et 9 nouveaux doctorants et doctorantes en moyenne. Une fois intégrés au laboratoire, ceux-ci bénéficient d'un accueil et d'un suivi destinés à leur permettre d'effectuer leur thèse dans de bonnes conditions.

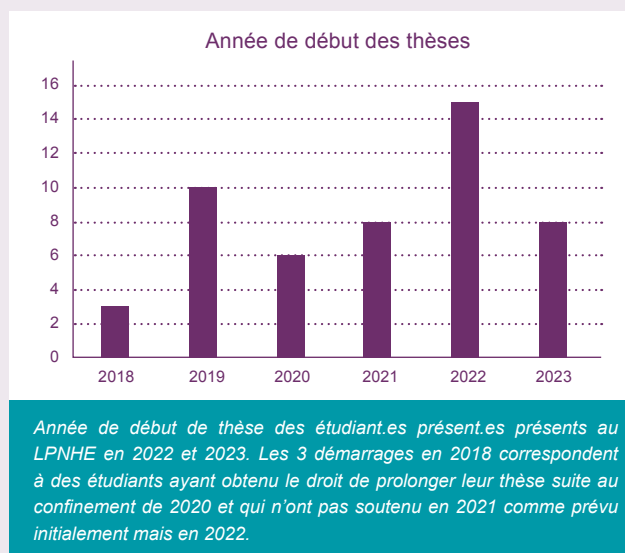
Le recrutement des doctorantes et doctorants

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 les étudiantes et les étudiants, 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 personnels universitaires du laboratoire contribuent largement à le faire connaître auprès des étudiantes et des étudiants, que ce soit lors de leurs enseignements dans les cursus de Licence ou Master de SU et de l'UPCité, par l'organisation de visites du laboratoire ou encore grâce à une politique de stages volontariste auprès des étudiantes et étudiants de L3 et M1. Ainsi, beaucoup des doctorantes et doctorants du laboratoire y ont déjà fait un stage auparavant.

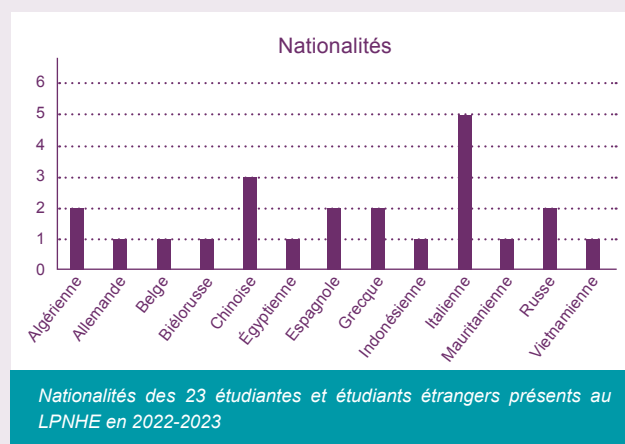
Le laboratoire jouit par ailleurs d'une bonne visibilité internationale, grâce aux collaborations internationales dans lesquelles travaillent les chercheuses et chercheurs du laboratoire, mais également grâce à des réseaux de coopérations entre pays, européens ou internationaux tels que LA-CoNGA, COFECUB, IDPASC, Action COST QG-MM, etc. dans lesquels des personnels du laboratoire sont investis et qui permettent la mobilité d'étudiants.

Sur la période 2022-2023, entre ceux qui ont soutenu leur thèse en 2022 et ceux qui l'ont commencée en 2023, 50 doctorantes et doctorants ont été présents au LPNHE comme le montre la figure ci-après. qui indique les années de début de thèse. On peut remarquer que le laboratoire accueille en moyenne chaque année 9 nouveaux doctorantes et doctorants avec un pic de 15 démarrages en 2022. Sur la figure, les trois thèses ayant démarré en 2018 correspondent à des étudiants qui ont obtenu une prolongation suite au



confinement de 2020 et qui ont finalement soutenu en 2022 au lieu de septembre 2021.

Sur ces 50 étudiantes et étudiants, 30 % sont des femmes et 46 % sont étrangers comme le montre la figure ci-dessus qui représente les 13 nationalités de ces étudiants.



Les financements des thèses

Sur la période couverte par ce rapport, les étudiantes et étudiants en thèse étaient inscrits dans les deux Universités tutelles du laboratoire (SU et UPC) et dans 3 Ecoles Doctorales (ED) : STEP'UP (47 inscriptions), PIF (2 inscriptions) et EDITE (1 inscription).

La principale source de financements de thèses vient du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (MESRI) distribuée par les ED sur la base d'un concours entre étudiants avec examen de dossier et auditions. Chaque année, le laboratoire accueille entre 2 et 3 étudiant.es avec ces financements.

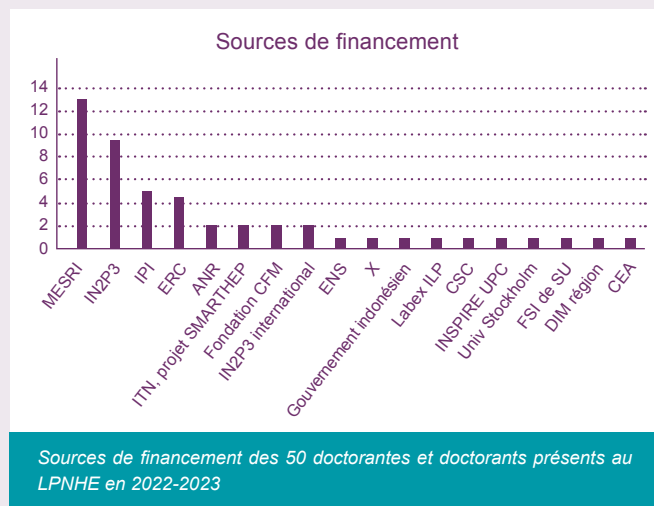
L'autre source principale vient de l'IN2P3 (entre 1 et 2 financements par an) sur la base des sujets de thèse et des projets, le choix des étudiant.es étant laissé à la discrétion des encadrant.es bénéficiaires du financement.

Comme organismes financeurs, on peut également citer l'Initiative Physique des Infinis (IPI) de SU qui, depuis sa création en 2020, finance entre 1 et 2 thèse par an ainsi que, dans une moindre mesure, la fondation CFM pour la recherche (Capital Fund Management), la Faculté des Sciences et Ingénierie (FSI) de SU, l'Idex d'UPCité, la région île-de-France au travers d'un Domaine d'Intérêt Majeur (DIM) ou encore le China Scholarship Council (CSC). L'ENS ou l'École Polytechnique (X) financent également certains de leurs étudiants. Le Labex ILP a disparu en 2019 mais il a financé environ une thèse par an jusqu'à cette date.

Des financements sont également obtenus grâce aux collaborations spécifiques de chercheurs avec des collègues d'organismes partenaires (comme le CEA ou l'Université de Stockholm) qui financent des étudiant.es basé.es au LPNHE.

Enfin de grands programmes internationaux, comme l'ERC ou les ITN et nationaux, comme l'ANR, dont des chercheuses et chercheurs du laboratoire ont été lauréats, ont également permis de financer 7 doctorats sur la période concernée. La figure ci-dessous détaille ces sources de financement.

Dans le futur, le laboratoire doit sortir de l'École Doctorale STEP'UP pour rejoindre plus massivement l'ED PIF à partir de 2024.



L'accueil et le suivi des étudiantes et étudiants au LPNHE

L'accueil et le suivi des étudiantes et étudiants du LPNHE sont assurés par une chargée de mission dédiée.

Dans le mois qui suit leur arrivée, les doctorantes et doctorants sont accueillis au laboratoire par le directeur d'unité ainsi que par la chargée de mission lors d'une réunion qui réunit l'ensemble des étudiantes et étudiants du laboratoire. Ceci permet aux nouveaux venus de faire connaissance avec les « anciens » et de commencer à souder le groupe des étudiantes et étudiants du laboratoire. La photo ci-dessous les montre rassemblés dans la cafétéria du laboratoire.

Le laboratoire a de nombreux dispositifs dédiés aux doctorantes et doctorants : le financement systématique d'une « école d'été », au moins une participation en conférence, le financement de cours de français pour les étudiants étrangers, un site web dédié, la présence d'une ou d'un représentant étudiant au conseil de laboratoire comme membre invité, ainsi qu'un système de parrainage.

En effet, afin de s'assurer que les thèses se déroulent bien sur le plan humain, chaque doctorante et doctorant choisit un parrain ou une marraine au début de sa thèse. Il s'agit d'un membre du laboratoire extérieur au domaine de la thèse et qui rencontre régulièrement son ou sa filleule pour s'assurer que tout va bien, que les relations avec le ou la superviseur de thèse sont bonnes et répondre à d'éventuelles questions. Une réunion des parrains et marraines se tient trois à quatre fois par an pour faire un bilan et discuter des problèmes éventuels et des actions à mener pour y remédier.

Le suivi scientifique, lui, est assuré par les comités de suivi individuels mis en place suivant le règlement des Écoles Doctorales.

Contact dans les masters 2 :

NPAC : Delphine Hardin, Eli Ben-Haïm

PRP : Pascal Vincent

Suivi des doctorant.es du laboratoire :

Sophie Trincaz-Duvoid

Lien avec l'école doctorale :

Julien Bolmont, Iréna Nikolic, Tristan Beau



Les doctorantes et doctorants du LPNHE.

Les stages au laboratoire

Une cinquantaine de stagiaires venant de tous les horizons sont accueilli.es, du collégien à l'étudiante ou l'étudiant en thèse. Les cohortes les plus importantes sont issues de licence 3 ou de master 2, ceux-ci effectuant le plus souvent un stage de pré-thèse. Nous recevons également régulièrement des élèves de BTS, IUT ou écoles d'ingénieurs. Par ailleurs, nous recevons aussi quelques lycéennes et typiquement 6 à 8 élèves de 3^{ème}, la grande majorité envoyée par l'UFR de Physique de SU, et qui découvrent en une semaine plusieurs composantes du campus. Avec plus de 50 stagiaires en 2023 en comptant les élèves du secondaire, nous retrouvons un niveau d'accueil similaire à ce que nous connaissions avant les épisodes pandémiques des années 2020-2022, ce qui est une

source de satisfaction pour nous. Notre capacité est désormais limitée par nos locaux qui ne sont pas extensibles, et qui atteignent leur utilisation complète au printemps, période privilégiée pour les stages par les formations.

Formations d'origine des stagiaires

La grande majorité des stagiaires effectuent des stages en recherche et sont issu.es des licences et masters de physique. Nous recevons chaque année un très grand nombre de demandes et nous ne pouvons pas répondre positivement à toutes celles-ci (limitation en capacité d'encadrement, en places de bureaux). Aussi, nous donnons priorité – mais pas exclusivité pour autant – aux étudiantes et étudiants des deux universités de tutelle, ayant un bon niveau et qui sont motivés par la perspective de continuer vers un M2 recherche du domaine du laboratoire.



Notre implantation sur le campus Pierre et Marie Curie de Sorbonne Université favorise bien entendu la venue d'étudiantes et étudiants de SU. À noter en particulier le stage obligatoire de deux semaines pour les L3 qui sont une dizaine à venir chaque mois de jan

vier au laboratoire découvrir le milieu de la recherche. Plusieurs étendent ce stage entre janvier et avril à raison d'une demie ou une journée par semaine avec leur responsable de stage.

		NIVEAU					
		BTS/IUT/Ecole d'ingénieur	Licence	Master 1	Master 2	Doctorat	Total
ANNÉE	2021	3	4	16	8	31	62
	2022	5	15	9	11	40	80
	2023	12	12	8	14	46	92
	Total	20	36	33	33	117	234

Nombre de stagiaires accueilli.es au LPNHE par année et niveau.

Thématiques des stages

Ci-dessous figure la répartition des stagiaires par équipe sous forme d'un tableau récapitulatif. Les stagiaires sont accueilli.es dans tous les projets du laboratoire, ce qui permet d'atteindre un taux

de stagiaire par membre permanent des équipes de l'ordre de un par an, ce qui est un taux cible remarquable. Les services accueillent également quelques stagiaires et forment également des apprenti.es, de plus en plus nombreux ([voir le chapitre Enseignement supérieur](#)).

		THÉMATIQUE				
		Masses et Interactions Fondamentales	Asymétrie Matière Antimatière	Rayonnement Cosmique et Matière Noire	Cosmologie et Energie Noire	Services Administratif, Techniques ou autre service
ANNÉE	2021	21%	6%	18%	21%	6%
	2022	38%	13%	33%	8%	8%
	2023	29%	21%	21%	8%	21%

Pourcentage de stages par thématique et par année au LPNHE.

Accueil au laboratoire

La meilleure insertion des stagiaires, et plus généralement de tout.e nouvel.le arrivant.e, est un objectif essentiel. Cela nécessite une large anticipation pour toute arrivée par les services administratifs (signature de convention), généraux (disponibilité de bureau) ou informatiques (installation d'un poste informatique). Ainsi, il faut compter typiquement un mois pour mettre en place un tel accueil, la procédure est rappelée régulièrement aux membres

encadrant.es du laboratoire et est disponible sur le site interne du laboratoire. Sur ce dernier, le ou la stagiaire trouvera également un "livret d'accueil", disponible soit en français soit en anglais.

Responsables des stages :

Sophie Trincaz-Duvoid puis Tristan Beau puis enfin Matthew Charles depuis octobre 2023

Contact par courriel : stage@lpnhe.in2p3.fr

Stagiaires accueilli.es au laboratoire (hors élèves du secondaire) sur la période 2022-2023

AHMED EMAM OSMAN Mahmoud

ARNAUD Baptiste

AZIZ Chirelle

BERNARD Hugo

BERTHEAS Tom

BOUCHARD Simon

BOUGHERARA Hanane

BOURGEOIS Agathe

BRASSART Amélie

CAILLET Aloïs

CAO Tony

CHABRILLAT Paul

CHALUMEAU Anaëlle

CONTRERAS MARTINEZ Maria José

CORREIA Anthony

DALMAZZONE Claire

DEBNATH Trisha

DELAGRANGE Line

DENIS Antoine

DIVERRES Théau

DJAROUM Celia

DODDI Naga.S.R.Greeshmani

EFREMOV Théodore

ENENKEL Eric

FEYDIT Antoine

GAILLARD Bastien

GONZALEZ Diego

GUELFAND Marion

GUO Yuxin

HERRY Sameo

HOARAU Pierre

HOMBERGER AXEL

IDDIR Lounes

JAIME HINOSTROZA Piero

KANDE Seydina

KIDDIER Georgia

KONG Chuizheng

KRUCH Gabrielle

KUHN Dylan

LACLAVERE Tom

LAUNAY Camille

LE GUENNEC Doriane

LENOUVEL Louis

LETURCQ-DALIGAUX Mattéo

LI Yifeng

LONGO Bruno

MALEK Rayan

MARIANI Edoardo

MARIANI Edoardo

MARTINEZ MENDEZ Alexander

MEDINA BAUTISTA Omar

MEKHOLOUFI Sélim

MORANE Matthieu

OLIVER Andrew

PAREDES SANTIAGO Sebastian

PELLEGRINI Quentin

PETIT DIT DARIEL Lakou

PLANCON Jean-Baptiste

POISVERT Pierre

RABOUR Léa

RADJABOU Elisa

RAJU Julia

RESTREPO Lorenzo

RIBGOU Imane

RIPAUX Antoine

RIVET Elliott

ROULLIER Yann

ROUSSEL Loula

RUSSO Lavinia

SALIB-WAHBA Emmanuel

SARMA Maharshi

SEBAOUN Paul

SEGAR Matthieu

SOCHARD Lucien

TAMBURINI Bianca

TEH CHHUNN

THIERS Typhanie

TIAN Xishui

TIMMERMANS Anne

TRIANTAFYLIDOU LEMONIA

VACCARO ORTEGA Clara

VAN DEN BROUCKE Romain

VASQUEZ RATTI Adrian

VIRGINET Ulysse

VUATTIER Paul

WANG Jing

WAYSENSON Zacharie

WDOWIAK Killian

YERLE Arsene

Organisation du laboratoire

- Services techniques
 - Service électronique et instrumentation
 - Service informatique
 - L'infrastructure serveurs et réseaux du service
 - Service mécanique
- Plateaux techniques et plateformes
 - Environnement des plateaux techniques
 - Salles blanches
 - Salles serveurs
 - Intelligence artificielle
 - Groupe transverse deep-learning
 - RTA/Allen
 - GRAND
 - Le Laboratoire LPNHE et le Projet ITk : avancées et défis dans le wirebonding
 - Pôle CAO-Câblage
 - Capteur à LA Pointe
- Support à la recherche
 - Ressources humaines du LPNHE
 - Ressources financières du LPNHE
 - Affectations des ressources dans les projets
 - Gestion des ressources financières
 - Evolutions
 - Pôle logistique et maintenance (services généraux)
 - Pôle Communication & documentation
 - Médiation scientifique - dialogue entre science et société
 - Mettre en valeur les métiers et les résultats de la recherche
 - Fête de la science
 - Diffuser l'information scientifique et technique en interne et à l'extérieur du laboratoire
 - Prévention des risques
- Organigramme
- Personnels au 31 décembre 2023
- Instances du laboratoire
- Chargé.es de mission



Organisation du laboratoire

Les activités de recherche du LPNHE sont essentiellement 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.es et de technicien.nes. Ils et 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.nes porteur.euses des projets pour proposer des solutions innovantes, basées sur leur expertise.

Plusieurs plateformes et plateaux techniques et leurs environnements permettent cette mise en œuvre et fonctionnent avec le concours essentiel des services généraux. Un effort particulier a été réalisé en 2022 et 2023 pour mettre à niveau et améliorer les équipements du laboratoire, notamment avec une jouvence majeure de la machine de mesure tridimensionnelle, mais aussi avec de l'équipement pour compléter la plateforme CLAP, une machine de test sous pointe permettant au laboratoire de rester compétitif pour la conception des nouvelles générations de détecteurs. Un renouvellement important du matériel informatique est également en cours, pour développer les performances de la plateforme PCS.

Les ingénieur.es et les technicien.nes 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 des réunions de coordination technique et lors des « réunions ressources », où la responsable scientifique et le 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. Une journée projets est organisée annuellement et ouverte à tout le personnel. Elle permet de faire le point sur les projets et aussi de favoriser les échanges entre les équipes.

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.

La grande majorité des personnels administratifs et techniques sont des personnels CNRS. Les groupes de recherche comptent des chercheur.euses et enseignant.es-chercheur.euses permanent.es et non permanent.es ainsi que des étudiant.es en thèse ou en stage.

Plusieurs équipes ont montré un intérêt croissant dans des utilisations de méthodes d'intelligence artificielle qui peuvent 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. Un autre groupe de R&D, à cheval entre électronique et informatique, a été formé en 2023, centré sur l'électronique embarquée.

De même, les équipes étant de plus en plus confrontées à la nécessité de répondre à différents appels à projets, une cellule ANR a été créée pour aider les proposant.es.

Service électronique et instrumentation

Le service Électronique et Instrumentation du LPNHE comprend treize personnels permanents dont 6 ingénieur.es de recherche, 3 ingénieur.es d'études, 3 assistant.es-ingénieur.es et 1 technicien. Le service est impliqué dans presque tous les développements instrumentaux du laboratoire, qu'il s'agisse des projets de physique auprès des grands accélérateurs (notamment CERN, DESY, JPARC), d'astro-particules ou de cosmologie observationnelle. Un pôle CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et Câblage offre toute l'assistance nécessaire pour la réalisation de cartes d'électronique. Les électronicien.nes 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. Le service dispose notamment d'une expertise solide en électronique numérique, en particulier dans la mise en œuvre de circuits numériques programmables (FPGA) qui sont couramment utilisés dans les différents développements. Ces développements font aussi appel aux technologies récentes telles que les liaisons série rapides, les systèmes embarqués ou les circuits imprimés haute densité.

Le très bon niveau des ingénieur.es et technicien.nes du laboratoire permet de considérer les instruments dans leur ensemble et de proposer des solutions qui optimisent les interfaces et les différents sous-systèmes. Des bancs de test expérimentaux de haute performance sont aussi assemblés dans les locaux du laboratoire, pour caractériser les détecteurs des projets en développement. Certain.es ingénieur.es ont des responsabilités de chef de projet dans des composantes nationales ou

internationales de grandes expériences. Les différentes expériences font de plus en plus appel à la qualité et à la gestion de projet. Ces méthodes sont désormais mises en place dès le début des projets.

Équipe technique :

Philippe Bailly, Julien Coridian, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Marc Dhellot, Karim El Haj Hussein, Romain Gaior, Claire Juramy-Gilles, David Martin, Jean-Luc Meunier, Eric Pierre, Stefano Russo, Francois Toussenet, Alain Vallereau

Étudiant.es :

Thibaud Carcone, Lounes Iddir

Service informatique



Le service informatique est composé de 14 personnes au 1^{er} décembre 2023 : 7 ingénieurs de recherche, 4 ingénieurs d'étude, deux apprentis et un stagiaire.

Le service assure les tâches suivantes tâches au sein de 3 pôles :

- L'Administration Systèmes et Réseaux, qui assure 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, 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 : ATLAS/HGTD, CTA/HESS, DAMIC, DESI, Grand, LHCb, LSST, T2K/HK et Xenon.

L'infrastructure serveurs et réseaux du service

Le service informatique administre 35 serveurs physiques dont 6 sont dédiés à la virtualisation de 40 serveurs. L'ensemble du parc est géré avec l'outil d'administration et de déploiement centralisé Ansible qui permet un déploiement multi-nœuds et l'exécution de tâches ponctuelles. Les serveurs virtuels sont gérés avec Proxmox et connectés au réseau 10 Gbps : en cas de défaillance matérielle 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 snaps 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.

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 2ème étage. Chaque donnée possède 3 copies sur 3 serveurs différents dont au moins une copie dans chacune des deux salles. Il se compose de 8 serveurs de stockage pour un total de 1.8 Po (80 disques de 8 To et 48 disques de 16 To et 24 disques de 18 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 et 25 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 2x 100 Gbps pour les liens principaux et 2x 10 Gbps pour les liens secondaires. Différents sous-réseaux permettent de sécuriser les activités les plus sensibles et d'augmenter la qualité de service.

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reyre, Jean-Marc Colley, Olivier Dadoun, Nabil Garroum, François Legrand, Karine Marquois, Victor Mendoza, Eduardo Sepulveda, Diego Terront, Vincent Voisin, Patricia Warin-Charpentier

Étudiant.es :

Tom Lagneau, Amar Hami

Service mécanique

EXPERTISES

Gestion de projet, ingénierie système et assurance produit.

Études 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.

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 2023, le service est composé par 2 ingénieurs de recherche, 1 ingénieur d'études, 3 assistant.es ingénieur.es et 1 apprenti.

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 labo ou l'installation sur site. Pour cela, ses ingénieurs assurent régulièrement des responsabilités de chef de projet ou d'ingénieur système. Grâce à l'expertise de ses membres, les compétences du service couvrent non seulement la mécanique (conception, dimensionnement et fabrication) mais aussi les domaines connexes tels que la mécatronique, le vide, la thermique, la cryogénie, et l'optique.

Le bureau d'études est équipé de logiciels de CAO (CATIA) et de calcul aux éléments finis performants (ANSYS) et utilise les systèmes de gestion de données techniques (Smarteam et ATRIUM). 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 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 réaliser des tests ou démontrer la faisabilité d'un concept : capteurs de forces, pompes à vide, détecteurs de fuite, étuves et sondes de température. Le service gère les sous-traitances pour des fabrications de série ou nécessitant des techniques spéciales, en rédigeant le dossier technique nécessaire à l'appel d'offre et en assurant le suivi jusqu'à la recette.

Le service est actif dans l'échanges de compétences et de services avec les autres laboratoires du campus.

Par ailleurs, les membres du service sont impliqués dans la vie du laboratoire (CL, AP, CLHSCT, CS, CPL), de l'UFR (CS), de l'IN2P3 (CS, réseaux métiers et formations), du CNRS (F4SCT, jury de concours, réseaux métiers) et plus largement dans des actions de présentation du service au grand public.

Équipe technique :

S. Colinot, G. Daubard, C. Georget, P. Ghislain, A. Lanthéaume, D. Laporte, Y. Orain, P. Repain
 Y. Da Silva (Apprenti Sept. 2020 – Aout 2022)
 J.-C. Monroe (Apprenti Sept. 2023 – Aout 2025)

CHIFFRES CLEFS

83 secondes : Temps pour changer de filtre dans la caméra LSST grâce au système de changeur de filtre.

8032 : Nombres de détecteurs silicium à implanter pour le détecteur HGTD.



Environnement des plateaux techniques

Les plateaux techniques proposés par le laboratoire nécessitent des environnements et installations particuliers pour fonctionner, comme des salles blanches et des salles serveurs. Ces installations sont surveillées et maintenues par les équipes du laboratoire.

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. La température, l'hygrométrie et la pression de chaque salle sont surveillées et le cas échéant régulées grâce à une Centrale de Traitement d'Air (CTA) et un dispositif de déshydratation de l'air qui sont situés dans les locaux attenants. La centrale est actuellement en cours de renouvellement. Les salles bénéficient depuis les locaux techniques 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 5T.

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 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 32 A, 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 de plusieurs autres laboratoires du campus Jussieu dont LPTHE (Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies) dont le LPTHE (Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies, le LCQB (Laboratory of Computational and Quantitative Biology) et ARTBio (une plateforme de bioinformatique).

Intelligence artificielle

Groupe transverse deep-learning

Face à l'efficacité des méthodes de deep-learning dans de nombreux domaines scientifiques et à la diversité des architectures exploitables, le LPNHE a créé un groupe de travail transversal, englobant les expériences et les groupes de recherche. L'objectif est de créer un pôle d'expertise au sein du laboratoire pour : favoriser les échanges, créer des formations en interne à travers des tutoriels, et permettre l'accueil de spécialistes du domaine afin de suivre les dernières avancées. des dernières avancées.

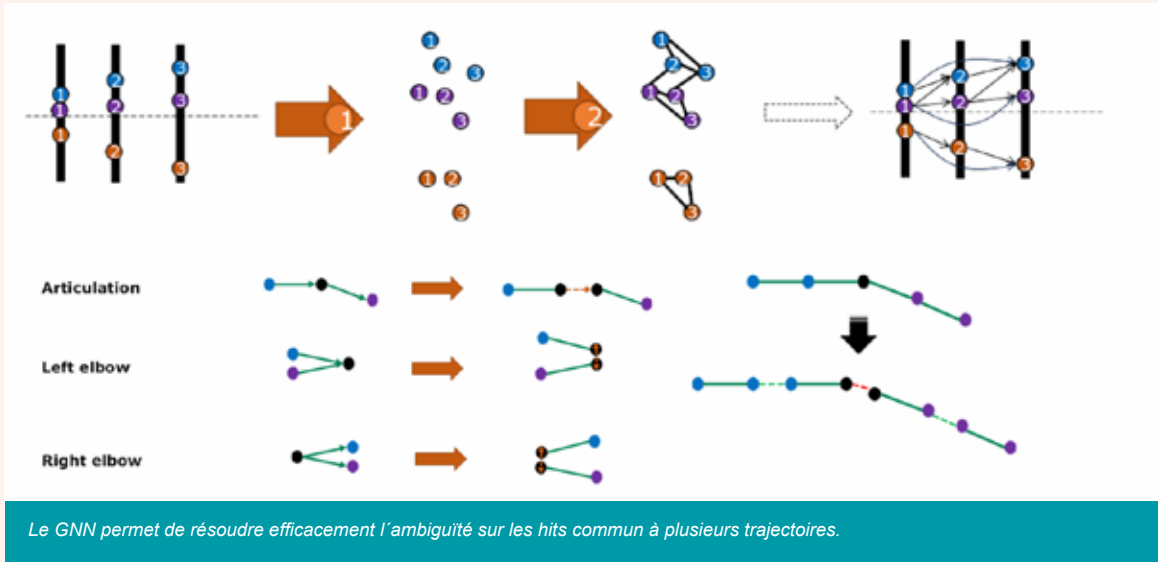
Le service informatique joue un rôle important dans la mise en œuvre en temps réel du deep-learning, en se concentrant notamment sur la sélection de données générées à haute fréquence liées aux phénomènes physiques étudiés.

RTA/Allen

Au sein de la collaboration LHCb, le groupe RTA explore les nouvelles possibilités offertes par les techniques du deep-learning pour la reconstruction en temps réels des collisions. Le framework actuel, Allen, qualifié en 2022 utilise les algorithmes combinatoires pour la reconstruction des traces. Devant l'augmentation prévue des volumes de données, l'équipe travaille sur de nouveaux algorithmes basés sur les GNN (Graph Neural Networks) qui sont une généralisation des réseaux de neurones, ayant pour double objectif d'atteindre l'efficacité et la rapidité des algorithmes standard. Les

graphes offrent une grande flexibilité quant à la variation de dimension des données d'entrée et sortie, et sont donc particulièrement adaptés aux problématiques de trajectographie. L'équipe RTA a ainsi développé une méthodologie d'apprentissage avec la librairie Pytorch par GNN atteignant les taux d'efficacité standard des algorithmes combinatoires. Cette technique est actuel-

lement appliquée au sous-détecteur Velo et est en cours d'extension aux autres sous-systèmes du détecteur LHCb, notamment le SciFi. L'équipe travaille actuellement sur l'optimisation du GNN et son intégration dans le pipeline de traitement (par le biais des librairies ONNX et TensorRT), afin d'augmenter la vitesse d'inférence et le traitement des données.



GRAND

Un autre domaine du deep-learning concerne l'étude des gerbes atmosphériques dans le domaine radio. L'ANR NUTRIG, obtenue par le projet GRAND, futur observatoire d'astroparticules, vise à définir un déclencheur au niveau du détecteur autonome. Dans la bande de fréquence observée, un bruit de fond important, de l'ordre de 2 à 3 ordres de grandeur par rapport aux gerbes, ainsi qu'une capacité limitée de transmission des données vers la station centrale située à quelques kilomètres, sont des défis

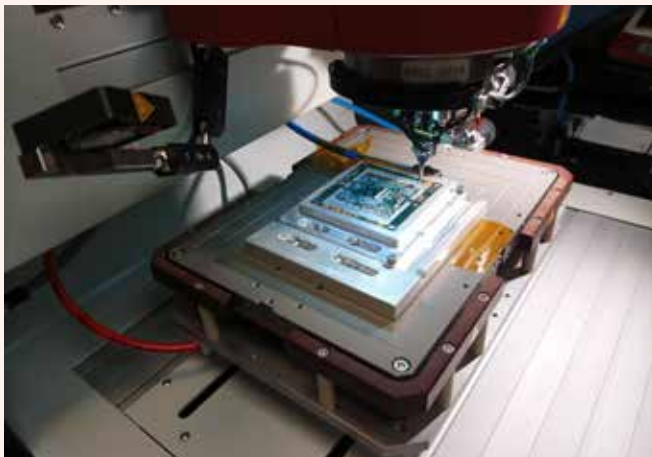
majeurs. Une méthode efficace de rejet du bruit de fond est cruciale pour la réussite de cette expérience.

Une solution basée sur une architecture ConvNet ou CNN a été étudiée. Des résultats prometteurs ont été obtenus sur un jeu de données préliminaire. Pour l'inférence de ConvNet et la mesure du temps de calcul, nous avons utilisé la bibliothèque TensorFlow Lite dédiée au matériel embarqué. En exploitant pleinement le bi-processeur ARM du System on Chip Xilinx de notre détecteur, nous sommes en mesure de traiter l'essentiel des données avec efficacité.



Le laboratoire LPNHE et le projet ITk : avancées et défis dans le wirebonding

En 2019, le Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies (LPNHE) a franchi une étape importante en s'équipant d'une machine de wirebonding de la marque F&S Bondtec modèle 5830, complétée par un pull-tester associé.

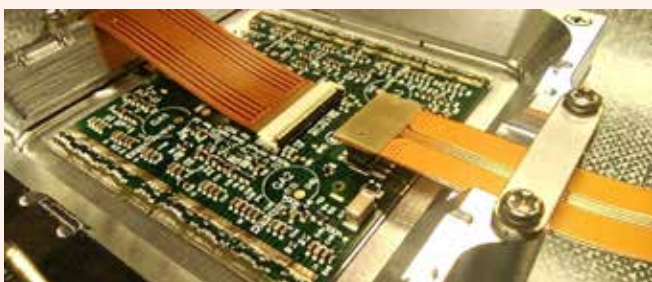


Machine à bonder en train de bonder un ITk Quad Module.

L'une des principales applications de la machine est dans la production des modules pour ITk, un projet de mise à jour du trajectographe ATLAS pour la phase 2 du LHC. La France, s'engageant dans ce projet ambitieux, a confié la construction d'environ 2000 (environ 30% des couches externe) modules aux laboratoires LPNHE, IJCLab et IRFU (CEA).

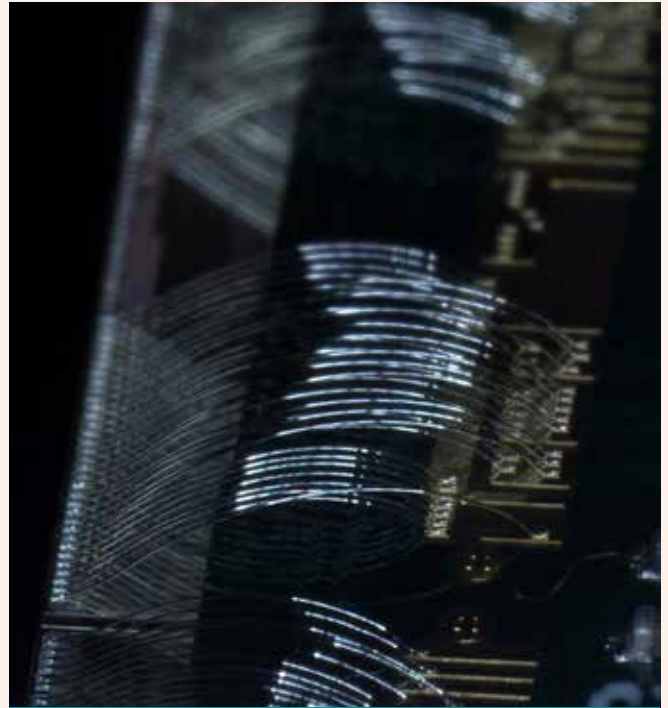
Malgré les défis posés par la pandémie de COVID en 2020-2021, le laboratoire a développé une expertise avancée dans l'utilisation de la machine. Cette compétence a conduit à l'achèvement de tous les modules requis pour la phase de prototypage d'ITk en 2022, en utilisant les puces de lecture RD53A.

L'année 2023 a marqué le début de la pré-production des modules ITk avec la puce de lecture ITkPix, destinée à être utilisée dans l'expérience. Cette phase de production est prévue pour durer jusqu'en 2025-2026.



ITk Quad Module entièrement bondé dans son support avec des "Pigtails" pour le test de fonctionnalité.

Chaque module produit est composé d'environ 630 wirebonds, utilisant un fil d'aluminium de 25 microns. La précision requise pour le bonding des modules est extrêmement élevée, avec une tolérance de seulement 10 micromètres, soulignant la sophistication technologique et la précision nécessaire dans ces processus.



Détail de fils de Bond entre PCB Flex et Puce RD53 ITkPix sur un ITk Quad Module.

Lorsqu'elle n'est pas utilisée pour les modules ITk, la machine de wirebonding du LPNHE est employée dans d'autres projets, démontrant sa polyvalence et sa valeur ajoutée au laboratoire. La vocation du LPNHE sera d'utiliser son expérience et son équipement avancé pour le wirebonding bien au-delà de la production d'ITk, créant un véritable pôle de micro-soudures.

L'équipe dédiée au wirebonding est actuellement composée de trois (auparavant quatre jusqu'en 2022) ITA du service électronique. Pour faire face à la phase intensive de production des modules ITk, l'équipe sera renforcée par l'intégration de deux CDD, assurant ainsi la continuité et l'efficacité dans le travail.

En conclusion, le LPNHE, avec son équipement avancé et son équipe dédiée, se positionne au cœur d'un projet crucial pour le monde de la physique des particules, contribuant de manière significative au développement scientifique et technologique dans ce secteur.

Pôle CAO-Câblage

Le pôle CAO-Câblage, composé de 3 électroniciens, aide à la conception, à la réalisation et au contrôle de la qualité de cartes électroniques en respectant les normes IPC et les normes environnementales (ROHS).

Le pôle réalise en moyenne 10 études par an ; lesquelles ont pour but de réaliser des circuits imprimés (PCB) allant jusqu'à 14 couches avec micro-vias et intégrant différentes contraintes telles que les temps de propagation, la compatibilité électromagnétique, les paires différentielles et les impédances contrôlées pour des signaux pouvant atteindre des vitesses de commutation de l'ordre du Gigabit.

Les membres du pôle dessinent les symboles et les formes de composants, lesquels sont intégrés à des bibliothèques mutualisées de l'IN2P3, et effectuent le placement-routage des PCB en utilisant des outils CADENCE. Pour des prototypes ou des petites séries, ils soudent et inspectent tout type de composants (BGA,

QFN, CMS...) à l'aide d'un poste de soudage de composants complexes accouplé à un endoscope professionnel, des binoculaires et des fers à souder.

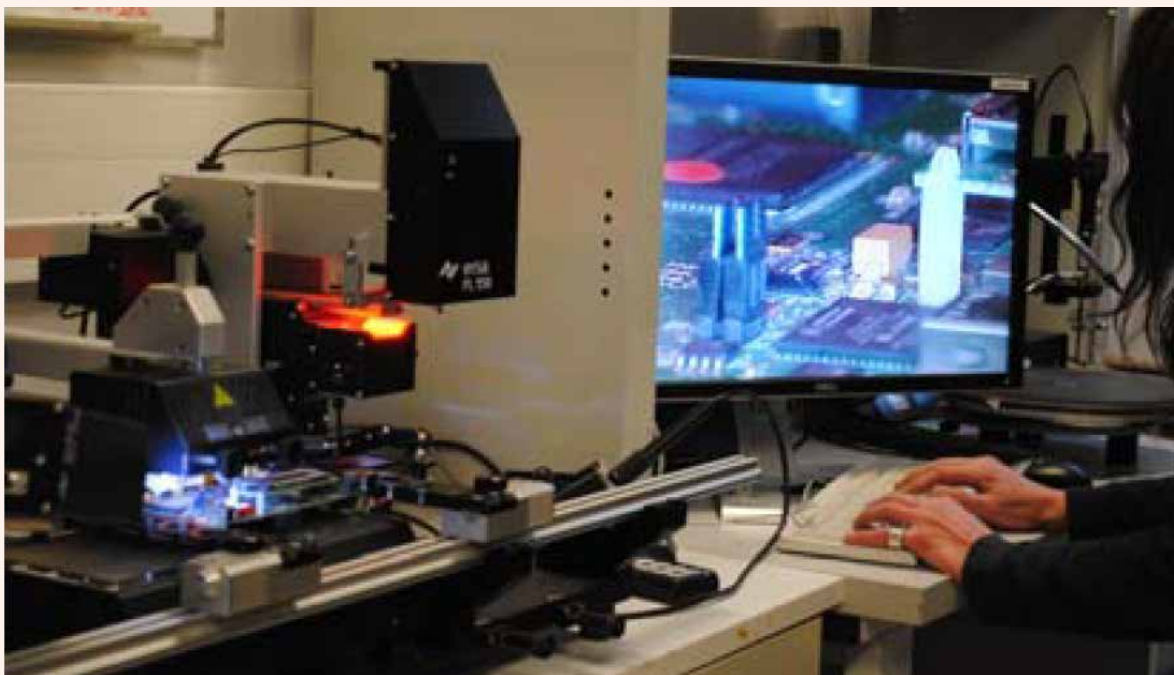
De plus, le pôle possède une petite fraiseuse à commande numérique Charlyrobot pour réaliser l'usinage de boîtiers et faces avant spécifiques.

Membres de l'équipe :

Julien Coridian, Marc Dhellot, Éric Pierre

CHIFFRES CLEFS

20 cartes réalisées entre 2022 et 2023.



Poste de soudage de composants complexes (BGA, QFN...) accouplé à un endoscope professionnel utilisé par un opérateur.

Capteur à LA Pointe

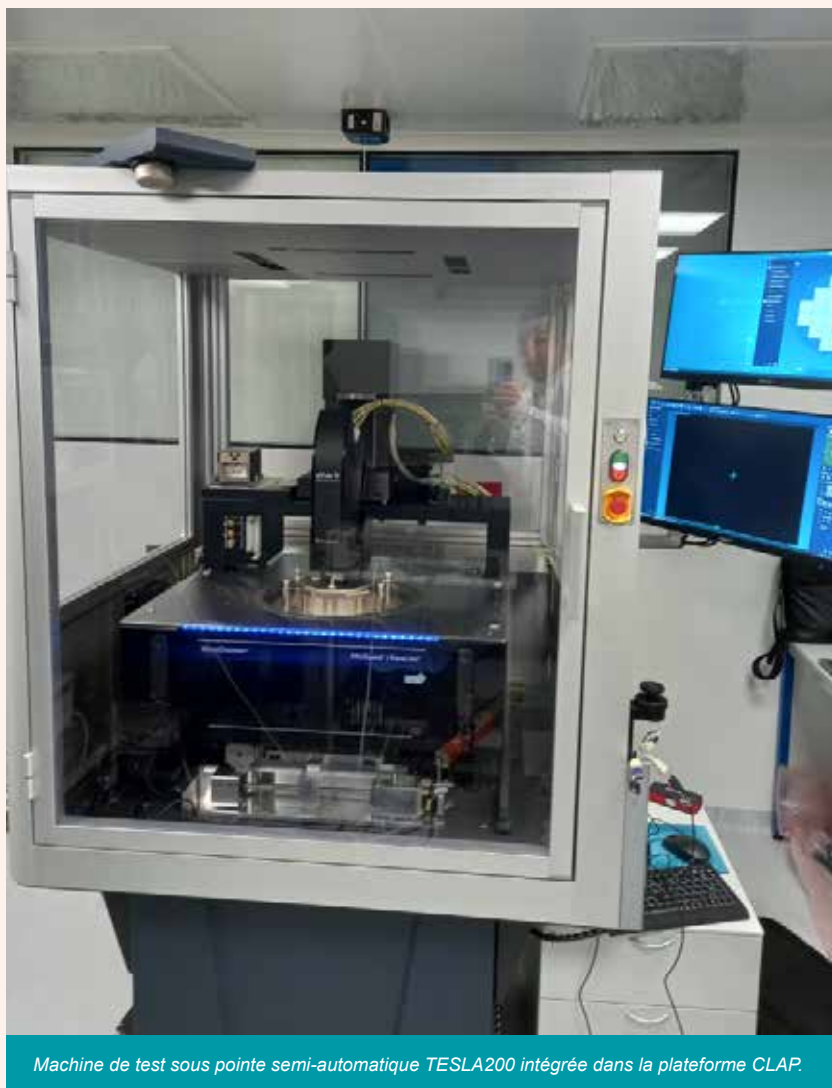
Le projet CLAP (Capteur à LA Pointe) financé grâce à la région Île-de-France et soutenu par Sorbonne Université et le CNRS dans le cadre des appels à projet SESAME2020, a permis l'achat d'une machine de test sous pointes semi automatique TESLA200 en 2021. Cette machine et l'instrumentation associée permet les tests de détecteur semi-conducteur, de micro-circuits et de circuits imprimés à très bas bruit, à des températures (-55 °C / +250 °C) sans problème de condensation et à des hautes tensions arrivant jusqu'à plusieurs kV.

L'installation de la machine ainsi qu'une formation à son utilisation par la société MBelectronique a eu lieu en février 2023 dans les salles blanches du laboratoire. Elle a depuis été validée en reproduisant des

résultats obtenus avec le système de test précédent.

Au LPNHE, ce dispositif est déjà utilisé pour différents objectifs. D'une part la caractérisation I-V C-V des senseurs pour la production de modules de l'expérience ITk mais aussi dans le cadre de la R&D Planar Silicon Sensor. Il permettra dans les deux prochaines années de caractériser de l'ordre de 700 modules et une centaine de structures de test dans le cadre de ces mêmes projets. Par ailleurs, il pourra servir aux expériences utilisant des détecteurs à semi conducteur du laboratoire, mais aussi aux partenaires extérieurs.

En effet, cette infrastructure est l'une des plateformes labellisées par Sorbonne Université et est donc ouvert à l'utilisation par des partenaires académiques ou industriels. Elle s'intègre également dans la plateforme IN2P3 TiSiDet mise en place au LPNHE.



Machine de test sous pointe semi-automatique TESLA200 intégrée dans la plateforme CLAP.

Support à la recherche

Essentiels au fonctionnement du laboratoire, les services de l'administration, service support à la recherche, comptent une dizaine de personnes. Après le confinement induit par la pandémie de la COVID 19, le travail à distance s'est généralisé. 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.

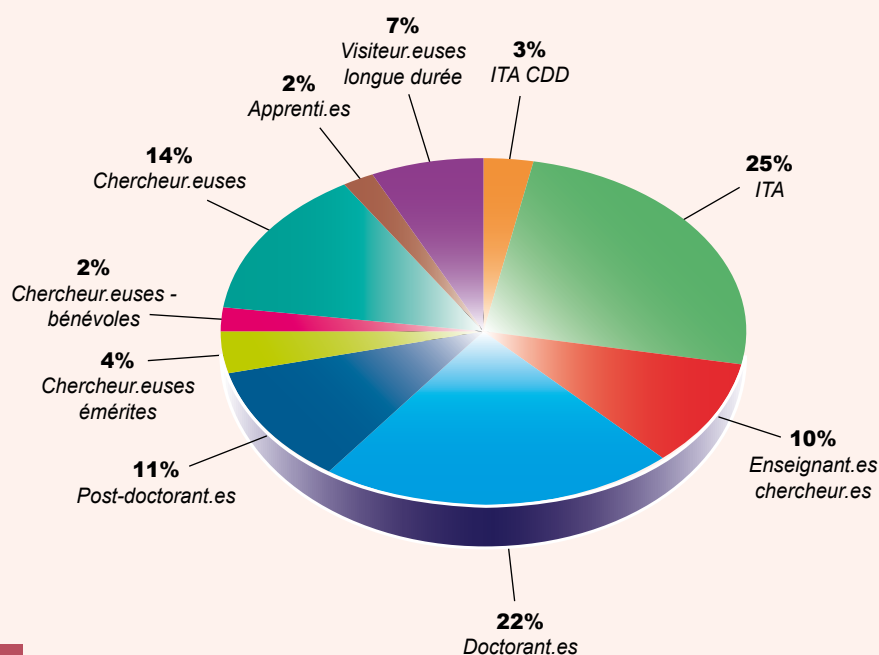
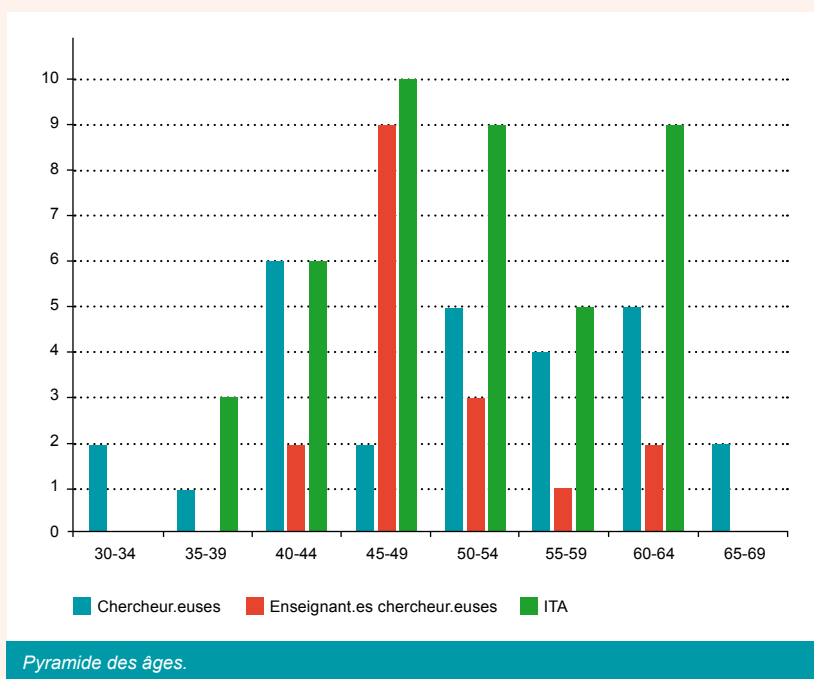
Les services administratifs sont répartis en trois pôles : Ressources Humaines, Gestion Financière et Communication.

Ressources humaines du LPNHE

Le pôle RH assure la gestion administrative des personnels. Cette gestion consiste à réaliser le suivi d'environ 207 agents permanent.es et non permanent.es, auxquels il faut ajouter une cinquantaine de stagiaires par an qui participent aux activités du laboratoire pour des périodes allant d'une semaine à 6 mois. Le pôle est en charge des procédures de recrutement (mobilité interne, auxiliaire, etc.), des procédures d'accueil des visiteur.euses étrangères, de stagiaires ou de doctorant.es (constitution des dossiers, aide dans les démarches auprès de nos tutelles, etc.). Il aide au mieux l'ensemble des

personnels dans l'établissement des dossiers de carrières, de concours et de formation. Il gère les congés et absences des agents, et diffuse toutes les informations utiles aux agents de l'unité.

En décembre 2023, le laboratoire comptait 45 chercheur.euses et enseignant.es chercheur.euses permanent.es, 18 chercheur.euses contractuel.les, 11 émérités et bénévoles, 39 doctorant.es et post-doctorant.es, 50 ingénieur.euses technicien.nes et administratif.ves (ITA) permanent.es et non permanent.es, 4 IT en alternance, et 40 stagiaires, soit un total de 207 personnes.



Le graphique ci-contre montre la pyramide des âges des personnels permanents. Il suffit de constater un nombre élevé de départs à la retraite depuis 2022, notamment au niveau des ITA. Face à cette perte d'expertise et d'expérience, le souci est de bien anticiper les recrutements dans une optique de remplacement.

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 AGATE, ARIANE, CANOPE SIRHUS ont notablement modifié l'appréhension de 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. À 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.

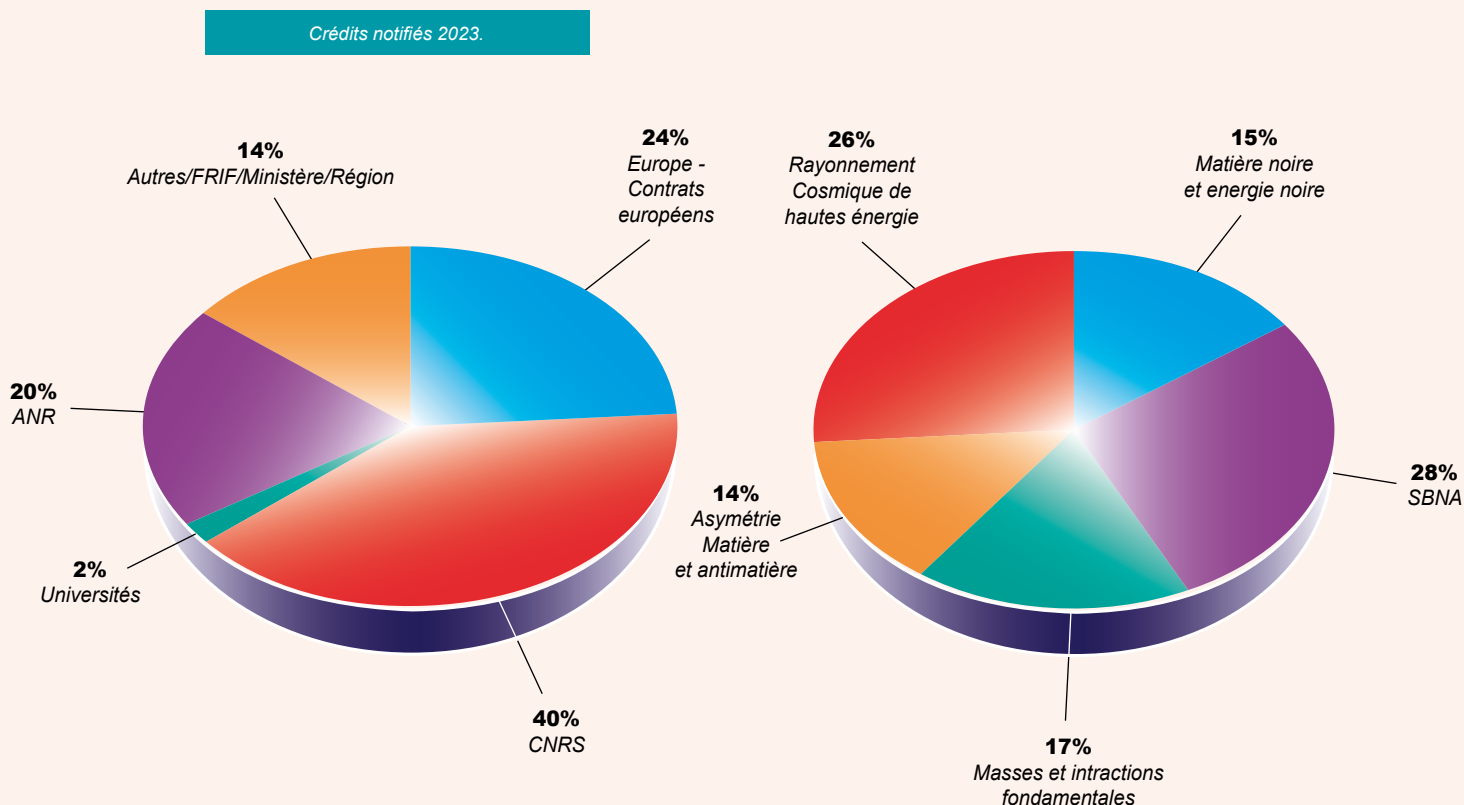
Equipe du pôle Ressources Humaines :

Yolande Bonnet (responsable du pôle RH)
Évelyne Mephane (administratrice de l'unité)
Marjorie Stievenaert-Ammour
Yves-Patrick Tchuenbou

Ressources financières du LPNHE

Le LPNHE dispose de ressources financières qui lui sont attribuées par ses trois tutelles, CNRS/IN2P3, les universités Sorbonne Université Paris Cité, ainsi que de ressources propres. Ces ressources sont gérées par le pôle de gestion financière, composé de 4 gestionnaires. Le pôle gère l'ensemble des achats de l'unité pour les groupes et les services du laboratoire en conformité avec les règles de la comptabilité publique.

À titre d'exemple, la répartition de ces ressources est représentée sur la figure ci-dessous pour l'année 2023.



La notification des contrats est ramenée aux dépenses prévisionnelles de l'année

En 2023, la dotation annuelle (soutien de base non affecté, SBNA) CNRS a représenté 28% du budget et celle de ses tutelles universitaires (Sorbonne Université et Université Paris Cité) 2%. Ces budgets sont alloués au fonctionnement du laboratoire pour les dépenses d'infrastructure, de vacations et aussi pour financer des colloques, écoles et conférences.

Le reste du budget, destiné aux projets du laboratoire, provenait, en 2023, du CNRS/IN2P3 (40%), de contrats ANR, Européens, Région et LABEX (58%).

Affectations des ressources dans les projets

Thématiquement, le budget « Projets » s'est réparti en 2023 selon :

- Masses et Interactions Fondamentales (17%)
- Asymétrie Matière / Antimatière (14%)
- Rayonnement Cosmique et Matière Noire (26%)
- Cosmologie et Énergie Noire (15%)

Gestion des ressources financières

La gestion financière du LPNHE s'appuie sur plusieurs applications dont une relativement récente :

- GESLAB : la base gestion des unités de recherche du CNRS
- ETAMINE, NOTILUS et GOELETT : progiciels relatifs à la gestion et au traitement des missions
- SIFAC (le Système d'Information, Financier Analytique et Comptable) des deux universités, n'est plus utilisé depuis la mise en place, en 2010, de la Délégation Globale de Gestion financière par le CNRS.

Évolutions

Le budget projet IN2P3 est apparu en légère augmentation entre 2022 et 2023 par rapport aux années précédentes.

Depuis 2017, on note un accroissement considérable des ressources propres avec pour conséquence une augmentation sensible de la charge de travail des gestionnaires. Ces nouvelles ressources proviennent des financements des contrats ANR, IPI, Région, Européens, 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. Ces derniers contrats ERC ont été prolongés d'une année supplémentaire en raison de l'impact de la pandémie COVID 19.

Les gestionnaires ont dû continuer à s'adapter à la mise en place de la dématérialisation de la dépense.

Après la GBCP et le SCTD, il a fallu s'adapter à la prise en compte de la vague 2 de Chorus pro, à l'évolution du traitement du service fait, à la nouvelle version de l'outil PUMA. Cela a entraîné pour les gestionnaires de grandes évolutions dans les méthodes de travail et dans l'acquisition de nouvelles compétences techniques et professionnelles.

La dématérialisation du processus « Missions » a commencé en 2021, s'est poursuivi avec la mise en place de NOTILUS en 2023. L'adaptation à ce nouvel outil de dématérialisation de gestion des missions est très complexe à mener. Il est à espérer que les choses deviennent plus simples dans les années à venir.



Équipe du pôle Gestion financière :

Swarna Latha Bassava, Bernard Caraco,
Carla Carvalhais (responsable du pôle Gestion financière à partir d'octobre 2022),
Véronique Criart (responsable du pôle Gestion financière jusqu'en septembre 2022),
Évelyne Mephane (Administratrice de l'unité),
Marjorie Stievenaert-Ammour, Yves-Patrick Tchuembou

Pôle logistique et maintenance (services généraux)

Les services généraux sont composés d'une seule personne depuis juillet 2021 suite à un départ.

Le pôle logistique et maintenance prend en charge les tâches courantes suivantes :

- répondre aux demandes d'intervention (logistique, aménagement, maintenance) faites par le personnel en assurant leur suivi par un logiciel de gestion de tickets ;
- 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 maintient à jour le 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 ;

Équipe technique :

Michaël Roynel

- gérer l'utilisation de l'amphithéâtre Georges Charpak, ouvert à la réservation pour des équipes hors LPNHE, ce qui implique d'assurer l'accueil des organisateurs ; il s'agit d'une activité significative du pôle avec des contraintes horaires pour l'accueil des utilisateurs.



Sur la période couverte par ce rapport, 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.

CHIFFRES CLEFS

120 réservations
externes de salle par an.

Pôle Communication & documentation

Un plan de communication pluriannuel élaboré avec le directeur du laboratoire et en cohérence avec la stratégie de communication de l'IN2P3, assure la mise en œuvre des missions du pôle « Communication & Documentation » :

- diffuser les activités et les résultats scientifiques et techniques du LPNHE,
- animer la promotion de la recherche scientifique en physique des particules, astroparticules et cosmologie, auprès de divers publics choisis : grand public, scolaire, institutionnel.

Composé de trois personnes permanentes, les activités du pôle sont renforcées ponctuellement avec l'aide de l'ensemble du personnel du laboratoire, constitué en comité d'organisation, groupe de travail ou chargé de mission.

Médiation scientifique - dialogue entre science et société

Le laboratoire organise ou participe à une dizaine de manifestations scientifiques internationales par an. Le pôle assure notamment l'organisation des « Rencontres de Moriond », qui rassemblent chaque année à La Thuile en Italie environ 400 physicien.nes du monde entier autour de thèmes de physique des hautes énergies : interactions électrofaibles et théories unifiées (2022, 2023), cosmologie (2022), QCD & interactions à haute énergie (2022, 2023), gravitation (2022, 2023), Physique mésoscopique quantique (2023) et Phénomènes de très haute énergie dans l'Univers (2022).

Le pôle organise aussi chaque année plusieurs événements avec la Société Française de Physique SFP, notamment les Journées Jeunes Chercheur.euses JRJC qui ont eu lieu en 2022 du 23 au 29 octobre et en 2023 du 22 au 28 octobre, à Saint-Jean-de-Monts - 85. Et les rencontres physique & interrogations fondamentales PIF, le samedi 18 novembre 2023 sur le thème du vide « De quoi le vide est-il plein ? », en partenariat avec la bibliothèque nationale de France à l'occasion des 150 ans de la SFP.

À chaque manifestation, une conférence grand public est organisée et une rencontre avec les journalistes locaux donnent l'occasion de marquer et animer l'actualité locale.



Participant.es aux JRJC2023.

Mettre en valeur les métiers et les résultats de la recherche

Les liens tissés entre le LPNHE et le milieu éducatif se manifestent par l'organisation chaque année de MasterClasses, la participation aux conférences NEPAL (Noyaux Et Particules Au Lycée), l'accueil de nombreux stagiaires et la mise en place d'actions « passion recherche » liant une classe et un intervenant scientifique ou technique, par exemple.

Fête de la science



Pièce de théâtre interactive avec des élèves de primaire.

Depuis 1997, le laboratoire participe à la fête de la science avec une équipe de plus de 30 personnes volontaires (physicien.nes et personnels techniques) ainsi que le partenariat fidèle du laboratoire Kastel Brossel et l'Institut des Nano-Sciences de Paris.

Un programme conçu à multiples facettes est proposé chaque édition pour accueillir près de mille visiteurs et près de 500 jeunes lycéens.

Lors de ce rendez-vous récurrent, des *visites guidées* dans le laboratoire par un membre du LPNHE permettent aux visiteur.euses d'appréhender les thématiques de recherche ainsi que les outils et méthodes utilisées. Des *ateliers pédagogiques* abordent la physique ou l'instrumentation sous un aspect plus concret ; par exemple, « Mesure de la masse d'un électron avec un double-décimètre ». Des *conférences grand public* présentent les recherches menées au laboratoire en permettant d'approfondir certains sujets. Des rencontres courtes, « *speed dating* », permettent des échanges directs avec les personnels du laboratoire autour des différents métiers de la recherche, ainsi que pendant les *parcours autour des six expositions* présentées.

Avec le concours « *ma thèse en 5mn* », initié depuis 2014 avec l'Association Française d'Astronomie dans le cadre du « Festival des 2 infinis », l'objectif est de faire découvrir aux lycéen.nes la recherche en physique des particules, astroparticules et cosmologie, mais aussi de



Lauréat.es du concours « *ma thèse en 5mn* » 2023.

faire se rencontrer les jeunes scientifiques et sensibiliser les doctorants à la médiation vers le grand public. À l'issue du concours, le jury et le public décernent un prix aux trois meilleures présentations sur les critères suivants : maîtrise du sujet et des réponses aux ques-



Stand médiation LPNHE pendant la fête de la science.

tions du jury, niveau de formation, présentation adaptée à l'auditoire, illustration, créativité dans la présentation du sujet, justesse des données scientifiques et gestion-maitrise du temps imparti.

Depuis 2018, le LPNHE s'inscrit dans la tradition de proposer aux publics un parcours ludique inspiré des Escape Games : chaîne d'énigmes à résoudre pour explorer deux thèmes : le monde des particules élémentaires et la vie d'un laboratoire de recherche.

Depuis toutes ces années de médiation scientifique, le pôle communication a su motiver et animer de nombreux.euses volontaires en proposant de nouvelles animations, activités, de nouveaux messages, objectifs, enjeux, thèmes.

Diffuser l'information scientifique et technique en interne et à l'extérieur du laboratoire

De nombreux outils de communication permettent la diffusion des activités scientifiques et techniques du LPNHE, en interne et vers l'extérieur :

- la conception et la réalisation du rapport d'activité (bi-annuel), document institutionnel diffusé à l'ensemble de la communauté scientifique et administrative ;



- l'organisation de journées de réflexion « biennale » : elles ont eu lieu du 17 au 20 mai 2022 à Saint-Brévins-les-Pins (44) ;
- l'organisation des séminaires hebdomadaires ;
- la mise à jour des actualités du laboratoire sur le site web et les supports multimédia
- la communication interne est assurée via des listes de diffusion et via une page web appelée « La vie du labo » dont le contenu est aussi diffusé sur les écrans plats disposés dans les cafétérias du 1^{er} étage et du rez-de-chaussée.

Ces actions sont menées par des comités ou chargé.es de mission (*voir page 111 « Chargé.es de mission »*)

Le LPNHE dispose d'une bibliothèque de recherche associée à la bibliothèque de Sorbonne Université (BSU) ; elle dispose d'un fonds constitué d'un peu plus de 2000 monographies spécialisées cotées selon le système Dewey. Le catalogue des ouvrages est intégré au catalogue général des bibliothèques de Sorbonne Université, et au catalogue national du SUDOC. Le catalogue apparaît aussi sur Google Books (en suivant le lien « Trouver ce livre dans une bibliothèque ») et sur WorldCat. La collection des monographies s'est récemment enrichie d'une centaine d'ouvrages grâce à plusieurs dons et legs. La bibliothèque du LPNHE possède aussi une importante collection de périodiques et de proceedings de conférences couvrant les domaines de recherche du LPNHE sur plus de 70 ans.

Un physicien chargé de la gestion de la documentation veille à la continuité des abonnements aux périodiques scientifiques et aux magazines spécialisés ; il prépare aussi l'acquisition régulière de nouveaux ouvrages, en fonction des demandes et des besoins des membres du laboratoire ; il s'assure de plus de l'intégration de ces nouveaux ouvrages dans les catalogues locaux et nationaux.

La gestion du prêt des ouvrages s'effectue via un automate de prêt muni d'un lecteur de codes-barres : les utilisateur.trices ont ainsi la possibilité d'emprunter et de rendre les ouvrages de manière autonome, 7j/7 et 24h/24. L'emprunt est réservé aux membres du laboratoire ; les prêts extérieurs sont possibles, sur rendez-vous <bibliotheque@lpnhe.in2p3.fr>.

Outre les périodiques disponibles au format papier, les membres du laboratoire ont accès à de nombreuses revues scientifiques en ligne à travers les abonnements de Sorbonne Université et via le portail BibCNRS.

Équipe du pôle communication & documentation, hors chargé.es de missions spécifiques :

Isabelle Cossin, Frédéric Derue, Laurence Marquet, Vera de Sà-Varanda

Prévention des risques

Un des enjeux majeurs dans le monde du travail actuel réside dans la prévention des risques professionnels et l'optimisation des conditions de travail. En s'appuyant sur les directives du CNRS et de l'établissement hôte (Sorbonne Université) le Directeur du LPNHE est assisté dans cette mission par deux Assistant.es de Prévention (AP) placés sous sa responsabilité directe. Les AP's entretiennent une étroite collaboration autant avec les services de prévention des risques professionnels de la délégation CNRS-Paris Centre, de Sorbonne Université et de Université Paris Cité, 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 5 décembre 2022 et le 14 décembre 2023.

Concernant le suivi des expériences, une activité de conseil est apportée 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. 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.



DAE : défibrillateurs automatisés externes. Achetés et maintenus par le laboratoire, nous en trouvons trois dans nos locaux.

Concernant les 1^{er} secours, le laboratoire s'est équipé de 3 défibrillateurs cardiaques automatisés et de 3 armoires de 1^{er} secours, desservant les différents secteurs du LPNHE. Huit agents ont reçu la formation de secouristes du travail.

Depuis 2011, le LPNHE s'est pourvu de dispositifs de protection pour travailleurs isolés : 14 zones, principa-

lement 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. Deux nouveaux DATI seront achetés en 2024 pour équiper des expériences en cours de développement.



Un DATI est un "dispositif d'alarme du travailleur isolé". Il permet la détection de perte de verticalité et/ou d'immobilisme de l'agent qui le porte, et appelle le service sécurité incendie de Sorbonne Université le cas échéant.

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 nouvelles et nouveaux entrant.es 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 de personnels temporaires.

Un enseignant-chercheur assure la fonction de Conseiller en Radioprotection (CRP). En charge dans ce rôle



depuis 2016, il s'assure du respect de la réglementation et supervise toutes les activités nécessitant un suivi spécifique à la radioprotection : détention de sources radioactives, suivi des mouvements, des achats de ces sources selon les besoins des groupes, suivi des agents se rendant en zones sensibles lors de leurs missions et devant disposer d'un suivi dosimétrique. Récemment, le groupe ATLAS du laboratoire s'est porté acquéreur d'un générateur de rayonnement X pour effectuer les tests de détecteurs dans le cadre du projet ITk. Le CRP, en concertation avec le groupe et le service mécanique, a défini les moyens de protection à mettre en œuvre (définition et dimensionnement du blindage, affichage, signalisation lumineuse) et les consignes de sécurité particulières au poste de travail. Il travaille également à la démarche d'enregistrement de cet équipement auprès de l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

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). Le fait le plus important de la période 2022-2023 a été le démontage du laser de classe 4 accordable du banc d'essai de StarDICE du laboratoire. Il a été expédié en novembre 2022 vers sa destination finale au Chili après une escale à Tucson. Les années d'utilisation du laser en laboratoire se sont déroulées sans incidents et les mesures de sécurité n'ont pas empêché la collecte de données importantes pour l'avancement scientifique du projet. Actuellement, il n'y a pas de risques particuliers liés au laser en laboratoire.

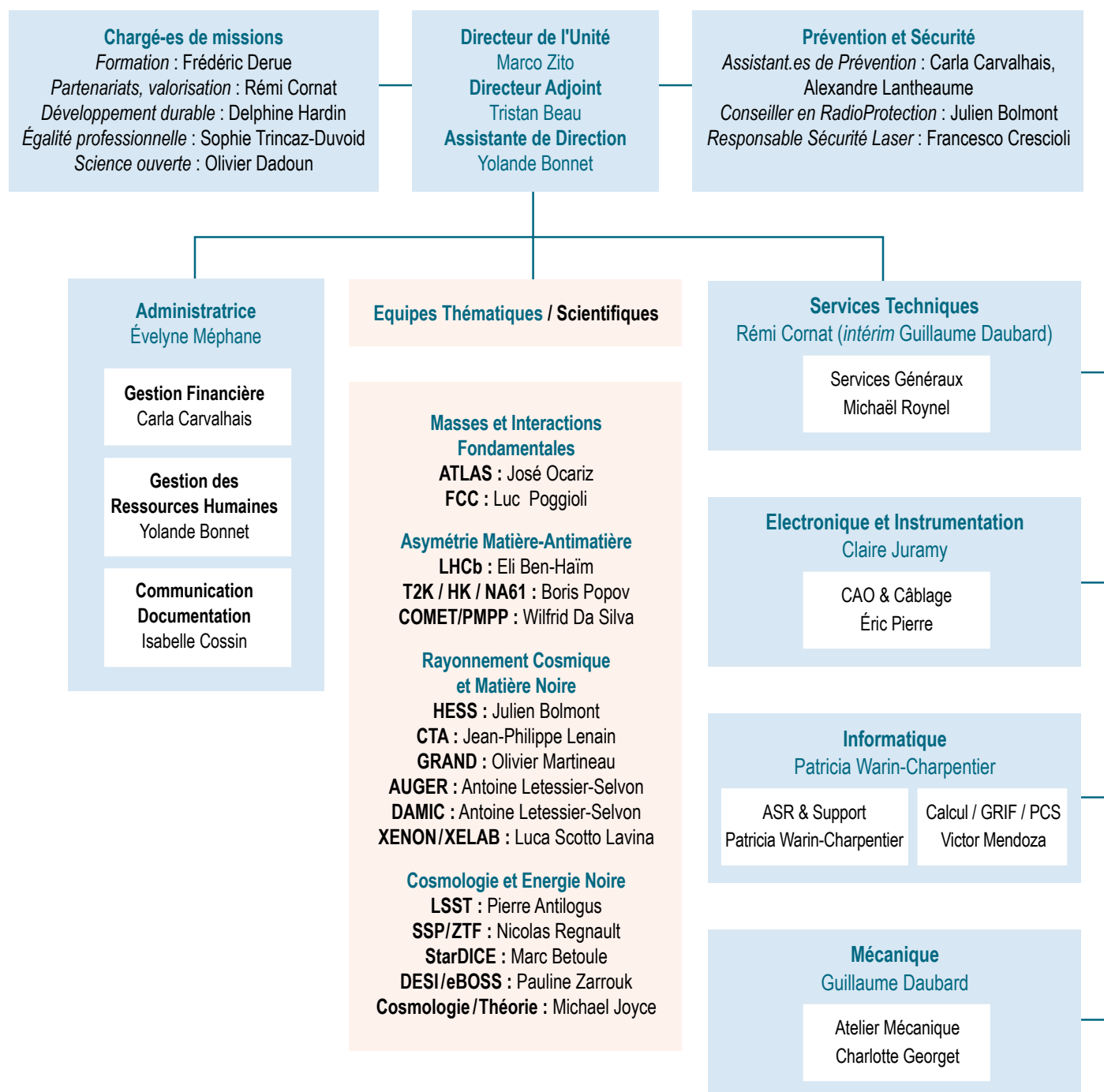
L'évaluation des risques professionnels constitue un élément clé de la prévention des risques. Depuis 2014, le « Document Unique » qui en résulte est réalisé à l'aide de l'application en ligne « EvRP », consultable directement par nos tutelles. La dernière mise à jour date de décembre 2023

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.

Membres de l'équipe :

- A.Lantheaume - Assistant de Prévention du LPNHE
 - C. Carvalhais - Assistante de Prévention du LPNHE
 - J. Bolmont - Conseiller en Radioprotection du LPNHE
 - F. Crescioli - Référent Sécurité Laser du LPNHE
-

ORGANIGRAMME



Personnels au 31 décembre 2023

Chercheur.euse.s CNRS

Directeur.trices de recherche

ANTILOGUS Pierre
ASTIER Pierre
CALDERINI Giovanni
DERUE Frédéric
GLIGOROV Vladimir
KRASNY Mieczyslaw
LACOUR Didier
LETESSIER-SELVON Antoine
POPOV Boris
REGNAULT Nicolas
ROOS Lydia
SCOTTO LAVINA Luca
ZITO Marco (CEA)

Chargé.es de recherche

ANDRIEU Bernard
BEUCERON Stéphanie
BETOULE Marc
BONGARD Sébastien
BUTTER Anja
CAMACHO TORO Reina
DEL BUONO Luigi
GIGANTI Claudio
LENAIN Jean-Philippe
MALAESCU Bogdan
POLCI Francesco
ZARROUK Pauline

Chercheur.euses émérites et bénévoles

BLONDEL Alain
DUMARCHEZ Jacques
POGGIOLI Luc

Enseignant.es-chercheur.euses

Professeur.es

BALLAND Christophe (SU)
BEN-HAIM Eli (SU)
HARDIN Delphine (SU)
JOYCE Michael (SU)
LAFORGE Bertrand (SU)
OCARIZ José (UPCité)
TRINCAZ-DUVOID Sophie (SU)
VINCENT Pascal (SU)

Maîtres de conférences

BAUMONT Sylvain (SU)
BEAU Tristan (UPCité)
BOLMONT Julien (SU)
CHARLES Matthew (SU)
DA SILVA Wilfrid (SU)
GUIGUE Mathieu (SU)
LE GUILLOU Laurent (SU)
MARTINEAU Olivier (SU)
NIKOLIC Irena (UPCité)
RIDEL Mélissa (SU)

Maîtres de conférences accueillis sur convention

NEVEU Jérémy
MARTINI Marco

Enseignant.es-chercheur.euses émérites et bénévoles

BILLOIR Pierre
CHAUVEAU Jacques
KRIVINE Hubert
LOISEAU Benoît
PONS Yvette
VANNUCCI François

Ingénieur.es et technicien.nes

Sauf indication contraire, les ingénieur.es et technicien.nes sont agents CNRS

Ingénieur.es de recherche

COLLEY Jean-Marc
CORNAT Rémi
CRESCIOLI Francesco
DADOUN Olivier
DAUBARD Guillaume
GAIOR Romain
GARROUM Nabil
JURAMY-GILLES Claire
LAPORTE Didier
LEGRAND François
MENDOZA Victor
MEPHANE Evelyne
MEUNIER Jean-Luc
RUSSO Stefano
SEPULVEDA E duardo
TOUSSENEL François
WARIN-CHARPENTIER Patricia

Ingénieur.es d'études

BAILLY-REYRE Aurélien (SU)
BONNET Yolande
CORONA Pascal
FREROT Fabien
LANTHEAUME Alexandre
MARQUOIS Karine
MARTIN David
MERCERON COSSIN Isabelle
TERRONT Diego
VALLEREAU Alain
VOISIN Vincent

Assistant.es ingénieur.es

CARVALHAIS Carla
COLINOT Sébastien
DHELLOT Marc
GEORGET Charlotte
ORAIN Yann
PIERRE Eric
ROYNEL Michael
STIEVENART-AMMOUR Marjorie
TCHUENBOU Yves-Patrick

Technicien.nes de recherche

BASSAVA Swamalatha
CARACO Bernard
CORIDIAN Julien
MARQUET Laurence (SU)

Autres (CDI)

DE SA-VARANDA Véra

CDD

EL HAJ HUSSEIN Karim
ZARAOUI Lina

Apprenti.es

CARCONE Thibaud
HAMI Amar
LAGNEAU Tom
MONROSE Jean-Charles

Doctorant.es

AHMED EMAM OSMAN Mahmoud
AMALRIC Renaud (doctorant)
AMEZZA Thiziri (doctorant)
BOGGIA Laura Sara
CAILLET Alois
CHABRILLAT Paul
CHALUMEAU Anaëlle
CORDEIRO OUDOT CHOI Artur
CORREIA Anthony
DALMAZZONE Claire
DANIEL GARCIA Layos
DELAGRANGE Line
FARIS Yassine
FERRIERE Arsène
FULGHESU Tommaso
GIASEMIS Fotios
GROLLERON Guillaume
GUELFAND Marion
IDDIR Lounes
KUHN Dylan
LACROIX Leander
MARIANI Edoardo
PAN Yongyu
PELLEGRINI Quentin
PENSEC Ugo
RUSSO Lavinia
SOVERIN Thierry
TRUSOV Svyatoslav
VAN DEN ABEELE Enya
VAN DEN BROUCKE Romain
VIRGINET Ulysse

Chercheur.euses CDD et post-doctorant.es

CORREA CAMIROAGA Pablo
DE DOMINICIS Claudia
DE JAEGER Thomas
DIAZ LOPEZ Gonzalo
GIRARD Frédéric
NIEMIEC Anna
PANWAR Lata
POLAT Léonard
PRIVITERA Paolo
PURCINO DE SOUZA Edmar
ROLAND Christophe
ROSALES DE LEON Alberto
SAENZ AREVALO William
ZOPOUNDIS Jean-Philippe

Instances du laboratoire

<p>Conseil de laboratoire</p> <p>Président ex-officio ZITO Marco</p> <p>Membres invité.es ex-officio BEAU Tristan CORNAT Rémi DAUBARD Guillaume MÉPHANE Evelyne</p> <p>Représentant des étudiant.es CORDEIRO OUDOT CHOI Artur</p> <p>Membres élu.es GUIGUE Mathieu JURAMY Claire LEGRAND François MEUNIER Jean-Luc HARDIN Delphine BOLMONT Julien LENAIN Jean-Philippe</p> <p>Membres nommé.es CARVALHAIS Carla REGNAULT Nicolas</p> <p>Conseil Scientifique</p> <p>Membres extérieurs nommés YECHE Christophe (SPP) UNAL Guillaume (CERN)</p>	<p>Membres nommé.es ASTIER Pierre (président élu) HARDIN Delphine RUSSO Stefano</p> <p>Membres élu.es CHARLES Matthew GIGANTI Claudio (secrétaire) LAPORTE Didier LENAIN Jean-Philippe SEPULVEDA Eduardo TRINCAZ-DUVOID Sophie</p> <p>Invités ex-officio BEAU Tristan CORNAT Rémi DAUBARD Guillaume ZITO Marco</p> <p>Comité Local Hygiène et Sécurité et Conditions de Travail</p> <p>Président ZITO Marco</p> <p>Membres ex-officio BEAU Tristan CORNAT Rémi DAUBARD Guillaume MÉPHANE Evelyne</p>	<p>Assistant.es de prévention CARVALHAIS Carla LANTHEAUME Alexandre</p> <p>Conseiller RadioProtection BOLMONT Julien</p> <p>Représentant.es du personnel GILLES-JURAMY Claire LENAIN Jean-Philippe</p> <p>Ingénieure Prévention Sécurité Patrimoine du CNRS-Paris Centre FANGET Isabelle</p> <p>Cheffe de service de Prévention des Risques Professionnels Conseillère de Prévention (Campus P.-et-M.-Curie) CHIMBAULT Sarah</p> <p>Responsable du Département Transverse de Prévention des Risques Professionnels de l'Université de Paris COUTARD Yann</p> <p>Ingénieur en Radioprotection, IN2P3 CHABARDES Aymeric</p> <p>Médecin du travail du CNRS VASSEUR Arnaud</p>	<p>Médecin du travail de Sorbonne Université <i>En cours de recrutement</i></p> <p>Médecin du travail-Coordonnateur du service de médecine de prévention et santé au travail d'Université Paris Cité ROQUE Isabelle</p> <p>Commission du personnel locale</p> <p>Membres élu.es CARVALHAIS Carla CORIDIAN Julien LAPORTE Didier</p> <p>Membres nommé.es LEGRAND François MARTIN David</p>
--	--	---	--

Chargé.es de mission

<p>Formation DERUE Frédéric</p> <p>Partenariats et valorisation CORNAT Rémi</p> <p>Égalité professionnelle TRINCAZ-DUVOID Sophie</p> <p>Développement Durable BEAU Tristan DE SA VERANDA Véra HARDIN Delphine (référente) LENAIN Jean-Philippe MARQUOIS Karine MÉPHANE Evelyne NIEMEC Anna VAN DEN BROUCKE Romain</p> <p>Sécurité</p> <p>Assistant.es de Prévention CARVALHAIS Carla LANTHEAUME Alexandre</p> <p>Conseiller en RadioProtection BOLMONT Julien</p> <p>Responsable Sécurité Laser CRESCIOLI Francesco</p>	<p>Sécurité Informatique MENDOZA Victor WARIN-CHARPENTIER Patricia</p> <p>Science ouverte DADOUN Olivier</p> <p>Masters 2 BEN-HAÏM Eli HARDIN Delphine VINCENT Pascal</p> <p>Stages, Thèses, Ecoles Doctorales Suivi des doctorants du laboratoire TRINCAZ-DUVOID Sophie</p> <p>Stages CHARLES Matthew</p> <p>École Doctorale BEAU Tristan BOLMONT Julien NIKOLIC Iréna VINCENT Pacal</p> <p>Bibliothèque LE GUILLOU Laurent</p>	<p>Plateforme documentaire Atrium LAPORTE Didier WARIN-CHARPENTIER Patricia</p> <p>Réunions du Vendredi BAILLY-REYRE Aurélien CHARLES Matthew</p> <p>Séminaires BEAUCERON Stéphanie NIEMEC Anna</p> <p>Nouveaux entrants DADOUN Olivier</p> <p>Structures partenaires Initiative Sorbonne Université Physique des infinis BALLAND Christophe TRINCAZ-DUVOID Sophie</p> <p>DIM ORIGINES BOLMONT Julien</p> <p>IDPASC LAFORGE Bertrand</p> <p>PNCG REGNAULT Nicolas</p>	<p>LA-CoNGA-Physics CAMACHO TORO Reina OCARIZ José</p> <p>Cellule contrats de recherche BEAU Tristan DERUE Frédéric GLIGOROV Vladimir</p> <p>Web BEAU Tristan COSSIN Isabelle DE SA VERANDA Véra LEGRAND François TRINCAZ-DUVOID Sophie</p> <p>Comité biennale BEAU Tristan COSSIN Isabelle NEVEU Jérémy MALAESCU Bogdan STIEVENART-AMMOUR Marjorie TOUSSENEL François</p>
---	--	--	--

Vie du laboratoire

- 2022 : une biennale réussie !
- Partenariats scientifiques
- Les vendredi du LPNHE
- Développement durable et enjeux environnementaux
- Chargée de mission égalité discrimination
- Les séminaires
 - Liste des séminaires
- Le journal club
 - Listing des thématiques
- Valorisation de la recherche
- Science ouverte
- Le projet ADOCO (Analyser les DONnées du COvid), partie intégrante de l'outil Pycoa
- La formation permanente
- Ikigai : gamification des formations, médiation scientifique et culturelle
- Revalorisation du patrimoine
 - Le Kennedy 9000 & le Chadac
 - La chambre à brouillard
 - Maison du patrimoine informatique et numérique en France



Vie du laboratoire

La vie scientifique du LPNHE s'articule à travers les activités et les projets que nous avons décrit précédemment mais aussi grâce à plusieurs événements incontournables qui ponctuent la semaine.

Les séminaires du lundi permettent de recevoir un.e 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 étudiant.es et jeunes post-doctorant.es 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 doctorant.es avec des réunions mensuelles.

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 et toutes. La nouvelle organisation de la journée, avec un binôme chercheur.euse et personnel 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 participant.es 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. La prochaine échéance est en mai 2024.

La fête de la science et les master-classes sont d'autres moments forts de l'année qui permettent de toucher différents publics 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.

En 2023, le laboratoire a été très actif pour deux campagnes d'évaluation : l'une par la section 01 du CoNRS (cette évaluation est appelée « tourniquet ») et l'autre par le HCERES, avec une visite de chacun des ces comités. Cela nous a permis de revenir sur le bilan de nos recherches et activités dans les dernières années et de nous projeter dans le prochain « contrat » du laboratoire. Nous sommes fiers des

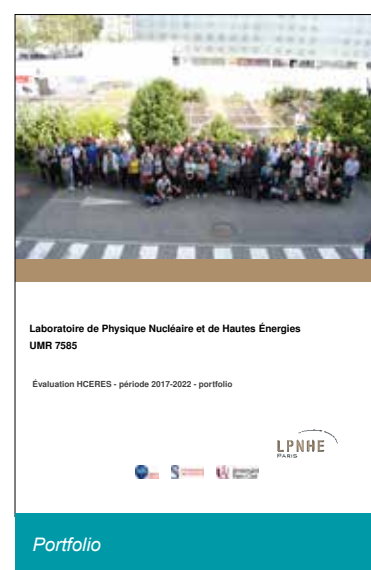


Visite de l'HCERES les 4 et 5 décembre 2023.

documents produits dans ce cadre, notamment le rapport d'auto-évaluation ainsi que le portfolio ; voir <https://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1750> pour retrouver les documents. Les rapports de ces comités sont élogieux et nous allons analyser avec soin les recommandations qu'ils nous adressent.



Autoévaluation



Portfolio

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, la revue des projets qui structurent tout le long de l'année notre vie scientifique et technique.

Toute cette « vie du laboratoire », au delà des seuls projets strictement scientifiques et techniques, est portée par toutes et par tous, membres du laboratoire, responsables ou chargé.es de mission, et nous en relatons ici quelques aspects.



2022 : une biennale réussie !

Cette biennale s'est tenue du 17 au 20 mai 2022 à St. Brévin-les-Pins avec environ 85 participant.es. Après la période des confinements et des Plan de Continuité d'Activités, l'ensemble du personnel du laboratoire avait grande envie de retrouver les collègues en présentiel pour quelques jours d'échanges.

Le format de cette biennale présentait quelques éléments de nouveauté. Deux sessions de présentation de posters, deux tables rondes (l'une sur les futurs grands projets, l'autre sur les R&D). Ces deux occasions pour connaître les activités des autres groupes et services et pour discuter tous ensemble du devenir du laboratoire ont été très appréciées. A 22 h, la salle « poster » était encore pleine et animée par des discussions nourries autour d'un verre.

La biennale a aussi été l'occasion d'inviter l'équipe de Subatech pour discuter de Développement Durable, ce qui a permis à l'ensemble du laboratoire d'être sensibilisé à ces questions.

Impossible d'évoquer ces journées sans rappeler la météo favorable et l'environnement particulièrement accueillant. Nous sommes tous rentrés au laboratoire avec les batteries bien chargées et beaucoup d'idées nouvelles !

Comité biennale 2022 :

Carla Carvalhais, Isabelle Cossin, Delphine Hardin, Bogdan Malaescu, Laurence Marquet, Olivier Martineau, Jérémy Neveu, Francois Toussenet et la direction

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. Impossible d'évoquer ici toutes les collaborations et partenariats, nous nous limitons ici à quelques exemples.

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 chercheur.euses, enseignant.es et étudiant.es 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 chercheur.euses du LPNHE et les théoricien.nes du LPTHE, du LPTENS et de l'APC. Le Collège de France est également associé à la FRIF. 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 noire.

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 Origines, labellisé « domaine d'intérêt majeur » (DIM) par le conseil régional d'Île-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 Associés » (LIA) comme le Laboratoire Franco-chinois de physique des particules (FCPPL) et son équivalent Japonais et Coréen (FJPPL, FKPPL). Grâce entre autre aux liens tissés dans le passé par le LPNHE, deux nouveaux laboratoires du 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 chercheur.euses 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, ...).

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. Signalons aussi le partenariat avec le Brésil dans le cadre du programme COFECUB.



Les vendredi du LPNHE



L'une des traditions, et des spécificités, du LPNHE est sa réunion hebdomadaire, qui se tient tous les vendredis matins. Comme la biennale, elle a pour vocation de réunir l'ensemble du personnel : tout membre du laboratoire y est invité, de tout pôle, et de tout statut (y compris stagiaires, doctorant.es, CDD, et membres permanent.es). Elle permet de présenter de nouvelles entrantes et nouveaux entrants, de diffuser de nouvelles scientifiques, administratives, ou personnelles, et d'échanger avec la direction, avec un rythme plus fréquent et dans une atmosphère moins formelle qu'un conseil du laboratoire. Une réunion typique consiste en un échange de nouvelles générales, suivi d'une présentation d'un.e membre du laboratoire, soit scientifique, soit technique ou d'intérêt général au laboratoire.

Notre laboratoire recouvrant des domaines de recherche à large spectre, les présentations scien-



tifiques et techniques permettent de tenir ses collègues d'autres pôles au courant des projets, avancées, et publications des équipes diverses, et de stimuler des discussions transversales. De même, il est important que les membres des services techniques et administratifs soient au courant des activités scientifiques qu'ils et elles soutiennent, et, à cette fin, il est demandé aux orateurs et oratrices de s'efforcer à ce qu'une partie de la présentation (ou, occasionnellement, sa totalité) soit accessibles à l'ensemble du personnel. Les présentations générales permettent aux instances du laboratoire de faire un point (par exemple, le groupe du développement durable a présenté le bilan carbone du LPNHE), et aux services de présenter de nouveaux outils techniques ou administratifs. Afin d'assurer un bon équilibre, l'équipe d'animation comprend un membre ITA et un membre Ch/EC.



Responsables des vendredis :
Aurélien Bailly-Reyre, Matthew Charles

Développement durable et enjeux environnementaux

Le comité de réflexion dédié au développement durable au LPNHE (DD) est actuellement composé de neuf membres, impliqué.es dans les différentes composantes du laboratoire, notamment l'administration, l'informatique, l'enseignement et la recherche. Il compte une référente DD IN2P3 et FSI.

À l'initiative du DD, des membres du LPNHE ont rejoint le GDR Labos1point5 en 2022. Ce groupe de recherche s'est formé en 2021 avec pour objectif de proposer des outils et entreprendre des actions visant à comprendre, quantifier et réduire l'empreinte carbone des activités de recherche, et ainsi initier une transformation institutionnelle et culturelle.

En plus des membres du groupe DD du laboratoire, certains membres du LPNHE sont impliqués dans ce GDR - en particulier la vice-doyenne "enjeux environnementaux" de la Faculté des Sciences et Ingénierie de Sorbonne Université, membre de la Coordination de Labos1point5.

Les actions du groupe DD incluent l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (EGES) pour les années 2019 et 2022, et la formulation de propositions à la direction, au Conseil de Laboratoire et à l'ensemble du personnel du LPNHE.

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) pour les années 2019 et 2022 a été réalisé en utilisant l'outil fourni GES 1point5, permettant ainsi une comparaison entre les laboratoires à l'échelle nationale. Cette évaluation s'appuie sur les informa-

tions fournies par Sorbonne Université, hébergeur du LPNHE, et les données transmises par les gestionnaires au LPNHE pour les achats et les missions.

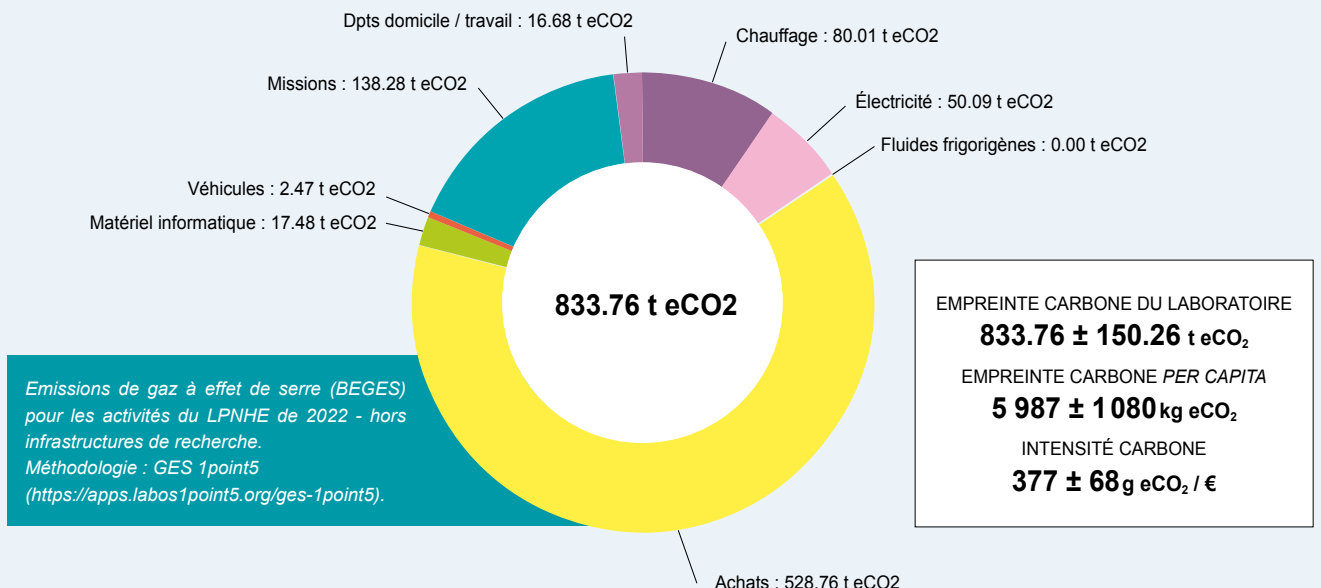
Le BEGES inclut ainsi via les données de l'hébergeur la consommation d'électricité, l'utilisation des fluides frigorigènes et le chauffage calculés en fonction de la surface utile du laboratoire.

Les EGES liées aux achats sont évaluées en se référant au code NACRES (Nomenclature Achats Recherche Enseignement Supérieur). Elles constituent la part prépondérante des EGES du LPNHE, et sont principalement attribuables aux achats liés aux expériences.

Le bilan pour l'informatique s'appuie sur la liste du matériel informatique acheté par le laboratoire. L'évaluation des EGES a démontré la nécessité d'y intégrer une analyse, récemment implémentée, des données fournies par les unités de distribution d'alimentation électrique (PDU) pilotables. Le maintien d'un inventaire précis a permis le remplacement à bon escient et le réemploi de l'existant, avec un suivi du cycle de vie de tous les matériels.

Les émissions de gaz à effet de serre liées aux missions sont calculées en prenant en compte le kilométrage et les moyens de transport utilisés.

Enfin la prise en compte des déplacements domicile-travail s'appuie sur une enquête menée auprès du personnel (participation en 2022 : 70 %). Ces déplacements représentent une fraction de 3% des émissions totales de gaz à effet de serre, du fait de la localisation francilienne du laboratoire.

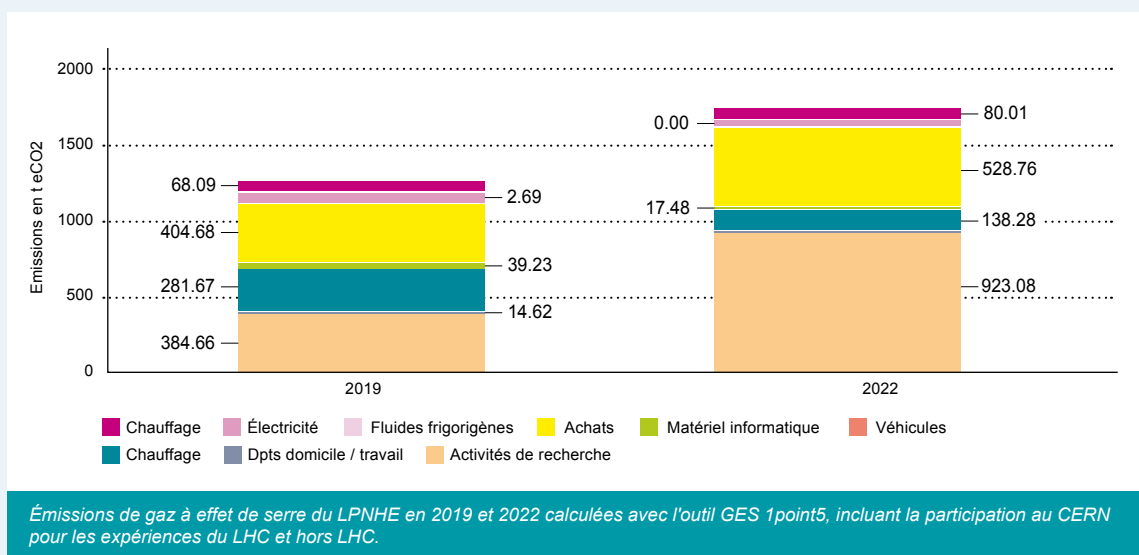


Les bilans obtenus (*voir le schéma ci-dessous - Bilan 2022*) correspondent à une émission d'environ 6 tonnes eCO₂ par personne. Ils sont à comparer avec l'objectif au niveau national de 2 tonnes eCO₂ par personne d'ici 2030, qui correspond au maintien du réchauffement climatique d'ici la fin du siècle en deçà de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels.

À ce bilan a été ajouté récemment (*voir le schéma ci-dessous*) la contribution des EGES des infrastructures du CERN calculées au prorata de l'implication des équipes du LPNHE dans les expériences LHC, ATLAS et LHCb, ainsi que hors LHC (NA61/SHINE). Une des membres du laboratoire, M. Ridel, a participé au groupe de trois physiciens

qui a élaboré la méthodologie permettant d'évaluer cette contribution.

Le comité DD s'est appuyé sur ces résultats pour formuler des propositions transmises au Conseil de Laboratoire, dans l'objectif d'une baisse de nos émissions d'au moins 10% par an. Ainsi, la mise en œuvre d'une politique d'achats écologiquement responsables, notamment par le choix des fournisseurs, et quand cela est possible, du réemploi, du recyclage, en faisant par exemple appel aux bourses au matériel du CNRS ou de SU. Le comité DD a aussi proposé dans ce but l'adoption d'une démarche durable pour l'évènementiel (pots végétariens) et les missions (missions circulaires, ou à buts multiples, estimation systématique des EGES dans le logiciel Etamine).



Afin de faciliter l'engagement concret du laboratoire dans des actions durables, le comité DD envisage de recommander l'adhésion du LPNHE au réseau Transition 1point5 (<https://apps.labos1point5.org/transition-1point5>). Cette adhésion constituerait une étape importante vers une future collaboration et un partage de bonnes pratiques avec les laboratoires engagés dans le réseau, essentiels pour réussir la réduction de l'empreinte environnementale de nos recherches.

Composition actuelle du comité :

Tristan Beau, Carla Carvalhais, Vera De Sa-Varanda, Delphine Hardin, Jean-Philippe Lenain, Karine Marquois, Évelyne Méphane, Anna Niemiec, Romain Van Den Broucke.
 Jusqu'à octobre 2022 : Véronique Criart

Chargée de mission égalité discrimination

Suite à l'accord relatif à l'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes dans la fonction publique du 30 novembre 2018, la nomination d'une personne référente en matière d'égalité est obligatoire au sein des ministères et établissements publics. Dans les laboratoires UMR, on les appelle les correspondantes et correspondants égalité. Ils et elles font partie d'un réseau au sein duquel ils et elles participent à des réunions régulières organisées par le CNRS ou par l'Université. Des formations leur sont également proposées, notamment sur la prévention des violences sexuelles et sexistes et des discriminations et sur la réception de témoignages.

Le rôle des COREGAL est d'assister le directeur / la directrice d'unité dans le déploiement du plan d'action de l'unité, en intégrant les axes prioritaires définis au niveau national et régional. Ces axes sont :

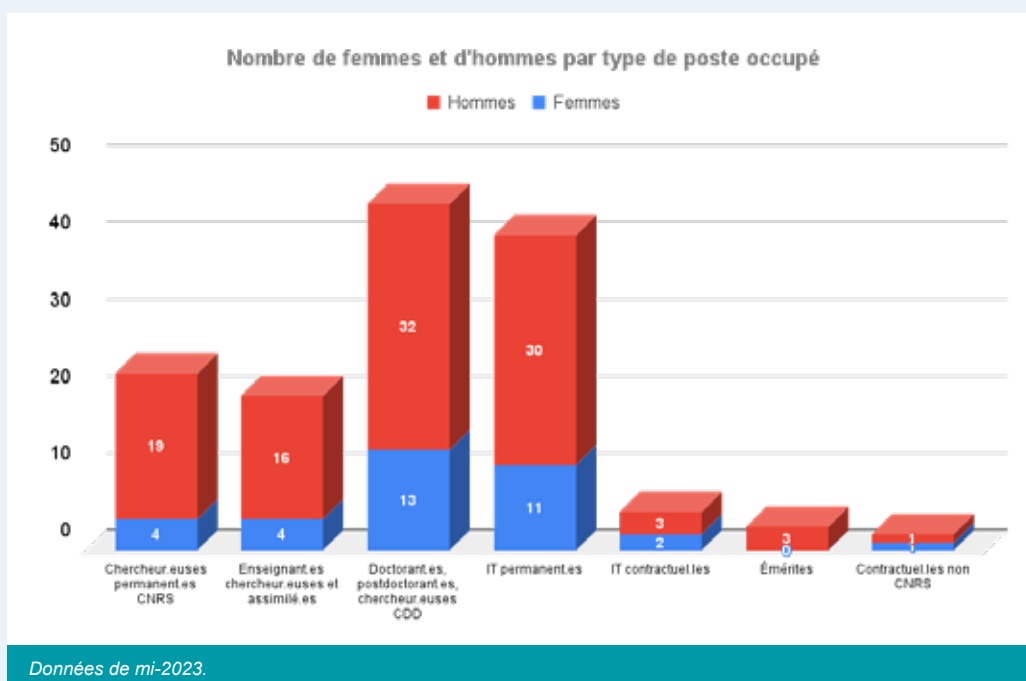
- évaluer, prévenir et traiter les écarts de rémunération,
- garantir l'égal accès des femmes et des hommes aux corps, grades et emplois,
- favoriser l'articulation entre vie professionnelle et vie personnelle et familiale,
- prévenir et lutter contre les violences sexuelles et sexistes, les harcèlements et les discriminations,
- conseiller sur la gouvernance.

Sur proposition du directeur du LPNHE, le conseil de laboratoire a approuvé la nomination de Sophie Trincaz-Duvoid comme COREGAL en décembre 2022. Auparavant cette fonction était assurée par Mélissa Ridel, directrice adjointe du laboratoire de 2019 à 2022.

En ce qui concerne le volet prévention de cette mission, une réunion d'information et de sensibilisation a été réalisée lors d'une réunion du vendredi du laboratoire le 22 décembre 2023. Celle-ci a été accompagnée d'une animation sous la forme d'un jeu avec des questions sur ce thème. Il est prévu que d'autres réunions suivent, notamment une réunion en anglais à destination des personnels non francophones du laboratoire.

Les informations sur les procédures de signalement par les témoins ou les victimes, sont également diffusées par voie d'affichage et par des dépliants disposés dans les deux cafétérias du laboratoire.

**Chargée de la mission
« égalité / discrimination » :**
Sophie Trincaz-Duvoid



Les séminaires

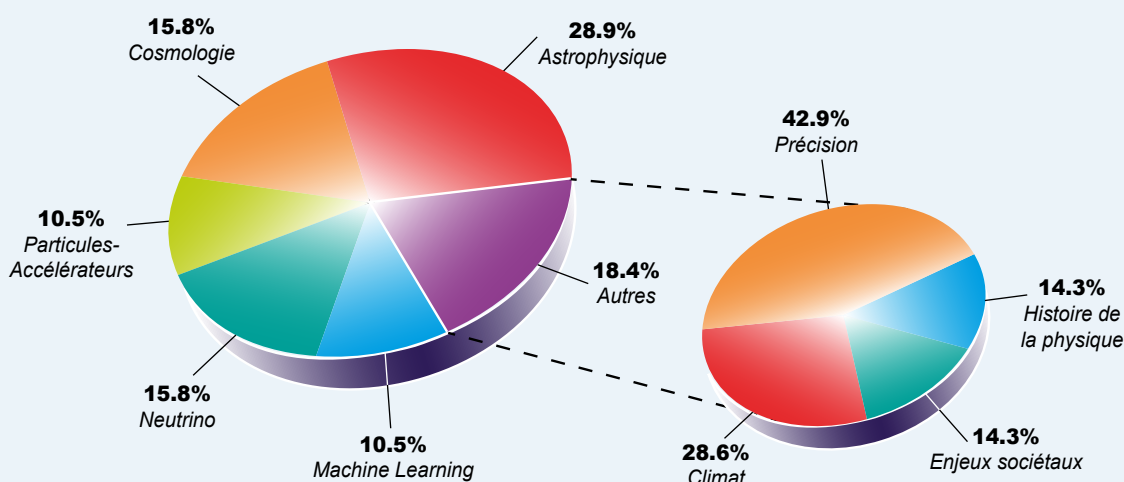
Le LPNHE organise régulièrement des séminaires ouverts à tous, sur les différentes thématiques scientifiques abordées au laboratoire, mais aussi sur des sujets plus transverses. Depuis la fin de la période COVID, les séminaires ont repris en présentiel exclusivement, avec un taux de remplissage du calendrier d'environ 65%, et une bonne participation, notamment de la part des jeunes chercheur.euses.

Comme le montre le diagramme ci-dessous (*voir figure ci-dessous*), les différentes thématiques du laboratoire ont été représentées de manière assez équilibrée, d'autant plus que la limite entre celles-ci peut se montrer assez poreuse. L'émergence du groupe Machine Learning au laboratoire a aussi consolidé la

présence récurrente de thématiques plus techniques liées à l'apprentissage automatique, tendance qui devrait se poursuivre. Enfin, des séminaires transverses sont proposés environ une fois par mois. Ces séminaires permettent d'aborder des sujets plus généraux, que l'on pourrait regrouper dans la catégorie science et société (e.g. histoire des sciences, place de la recherche dans la crise écologique, etc). Ces séminaires ont lieu en français, et sont destinés non seulement au personnel scientifique mais à tous les membres du laboratoire.

Responsables successifs des séminaires :

Luc Poggioli, Pauline Zarrouk, Marco Martini puis désormais Stéphanie Beauceron, Anna Niemec



Liste des séminaires

2022

17/01/2022 : Guido Intronati, Héloïse Nonne (SNCF) "2 physicists journey: from condensed matter physics to rolling stock maintenance at SNCF"

14/02/2022 : Julien Donini (LPC) "Programmation Différentiable et optimisation du design de détecteurs pour la physique des particules"

28/02/2022 : Anthony Brown (Durham University) "The Cherenkov Telescope Array: challenges & goals of observing the cosmos at gamma-ray energies"

28/03/2022 : Aurelien Hees (OBSPM) "Testing the equivalence principle: from the lab to the Galactic Center"

04/04/2022 : Michel Spiro (CEA) "L'histoire des astroparticules : astronomie multi-messagers et contribution française"

11/04/2022 : Marc Moniez (IJCLab) "New limits from microlensing on Galactic Black Holes in the mass range $10M_{\odot} < M < 1000M_{\odot}$ "

27/06/2022 : Claire Pacheco (Louvre) "New AGLAE: l'accélérateur de particules sous le Louvre fait parler les œuvres d'art"

11/07/2022 : Charles Timmermans (Radboud U, Nijmegen) "Ultra High Energy Cosmic Rays: Experimental status and Future Observations"

18/07/2022 : Witek Krasny (CERN/LPNHE) "The Gamma Factory project for CERN"

19/09/2022 : David Katz (Observatoire de Meudon) "Gaia Data Release 3: a pinch of satellite, a teaspoon of catalogue and a cup of Milky-Way"

10/10/2022 : Michelangelo Mangano (CERN) "Why FCC?"

17/10/2022 : Manuel Rodrigues (ONERA) "The MICROSCOPE mission has not detected any violation of the Equivalence Principle at 10^{-15} level"

14/11/2022 : Riccardo Catena (Chalmers) "Dark Matter phenomenology at direct detection experiments"

21/11/2022 : Pierre-Olivier Lagage (CEA) "Amazing JWST"

2023

09/01/2023 : Lifan Wang (Texas A&M University) "Artificial Intelligence Assisted Inversion of Supernova Observations"

20/01/2023 : Diego Gotz (CEA) "SVOM: a new mission for multimessenger and time-domain astrophysics"

13/02/2023 : Pablo Correa (LPNHE) "Hunting the Sources of Astrophysical Neutrinos with IceCube"

06/03/2023 : Patrice Hello (IJCLab) "LIGO et Virgo... en route vers O4 !"

13/02/2023 : Jean-Charles Cuillandre (CEA), Pierre Astier (LPNHE), Stephan Aune (CEA), "Les 20 ans de MegaCam sur le Télescope Canada-France-Hawaii"

20/03/2023 : Alberto Rosales De Leon (LPNHE) "Neutrino and gamma-ray astronomy in the era of multi-messenger astrophysics"

27/03/2023 : Cristina VOLPE (APC) "Neutrino astrophysics: a window to new physics"

03/04/2023 : Davide Sgalaberna (ETHZ) "New developments in scintillator-based near detectors for the Hyper-K program"

15/05/2023 : Erwan Allys (LP-ENS) "Scattering Transforms in astrophysics, application to components separation"

22/05/2023 : Xavier Sarazin (IJCLab) "Slowing down light in vacuum with intense laser pulses: the DeLLight experiment"

25/05/2023 : Elena Aprile (Columbia University) "The Quest for Dark Matter with the XENON Project"

01/06/2023 : Ma Colomer Molla (Brussels U.) "Astrophysics and neutrino physics with JUNO: from sub-MeV to few-GeV energies"

05/06/2023 : Stephanie C. Lefrère "Impact du Changement climatique sur la biodiversité en Laponie finlandaise - Stratégies adoptées en Finlande"

12/06/2023 : Jean-Charles Cuillandre (CEA) "UNIONS, a deep photometric survey of the northern sky open to the French scientific community"

19/06/2023 : Marco CIRELLI (LPTHE) "Sub-GeV Dark Matter and X-rays"

25/09/2023 : Naotako Suzuki (LBNL) "Towards Supernova Survey 3.0"

02/10/2023 : David Darson (LP-ENS) "SIRIS: An Infrared (SWIR) Very Low Noise and High Dynamic Fast Camera"

09/10/2023 : Jürgen Knödseder (IRAP) "L'astronomie à l'aune du réchauffement climatique"

06/11/2023 : Quentin Buat (CERN) "PIONEER, a next-generation rare pion decay experiment"

13/11/2023 : Jacques Marteau (IP2I) "From cosmos to the center of the earth : muography basics and applications"

20/11/2023 : Joe Silk (IAP) "Quasi-extremal primordial black holes are a viable dark matter candidate"

27/11/2023 : Alessandro De Angelis "Le jeune Galilée dans son contexte et l'invention de la science expérimentale"

01/12/2023 : Mathias Josef Backes (Kirchhoff Institut für Physik) "An unfolding method based on conditional Invertible, Neural Networks (cINN) using iterative training"

11/12/2023 : Arianna Rizzi (APC) "LiteBIRD"

13/12/2023 : Yusuke Koshio (Okayama university) "The supernovae neutrino detection in Super- and Hyper-Kamiokande (Yusuke Koshio)"

Le journal club

Le journal club accueille doctorant.es et post-doctorant.es du LPNHE de façon régulière dans l'objectif d'avoir un évènement complémentaire avec les séminaires.

À chaque session une personne volontaire prépare une présentation pour discuter de son sujet de recherche, d'un nouvel article intéressant, d'un autre thème scientifique ou bien d'un sujet qu'il ou elle souhaite partager. Des membres d'autres laboratoires peuvent aussi être invités pour présenter. Le cadre étant moins formel que les séminaires du LPNHE les étudiant.es peuvent poser des questions et participer aux discussions plus facilement.

Le journal club est aussi une très bonne solution pour ceux et celles qui veulent préparer et répéter des présentations importantes pour des conférences, workshop ou séminaires à venir ainsi que pour les stagiaires en master qui préparent les oraux avec l'école doctorale. La discussion suivant la présentation est également un moment de partage plus convivial avec la mise à disposition de café, thé et biscuits. Une personne en doctorat se porte volontaire pour organiser le journal club, trouver des participant.es et communiquer avec les doctorant.es et post-doctorant.es.

Entre mars 2022 et juin 2023 une doctorante et un doctorant se sont chargé.es d'organiser le journal club. Sur cette période 20 séances ont eu lieu ce qui s'approche de l'objectif de 2 journal club par mois. Deux des 20 présentations ont été faites par des doctorants invités et 4 par des post-doc. Avec une pré-

sence moyenne de 15 personnes, majoritairement en doctorat, le journal club joue un rôle important dans la vie du laboratoire pour les chercheurs en début de carrière et permet de créer des discussions, majoritairement scientifiques, intéressantes sur beaucoup de sujets divers et variés.

Listing des thématiques

- Ressources for early career researchers
- History of neutrino physics
- (Failed) Attempt at using Benty Fields
- Discussion on peer-review
- Keeping time in Hyper-Kamiokande
- Cosmic Microwave background
- Neutron to hidden neutron oscillation
- Random walk
- Doctoral school interview rehearsals
- Cosmology for dummies
- Introduction to quantum machine learning
- Are substructures in clusters in tension with Λ CDM
- New techniques for ATLAS jet calibration
- Edelweiss-III experiment
- Book review, Trop belles pour le Nobel
- Book review, A PHD is not enough
- Tips and tricks on how to build your bibliography
- New techniques for ATLAS jet calibration
- Rubik's cubes and other twisty puzzles



Valorisation de la recherche

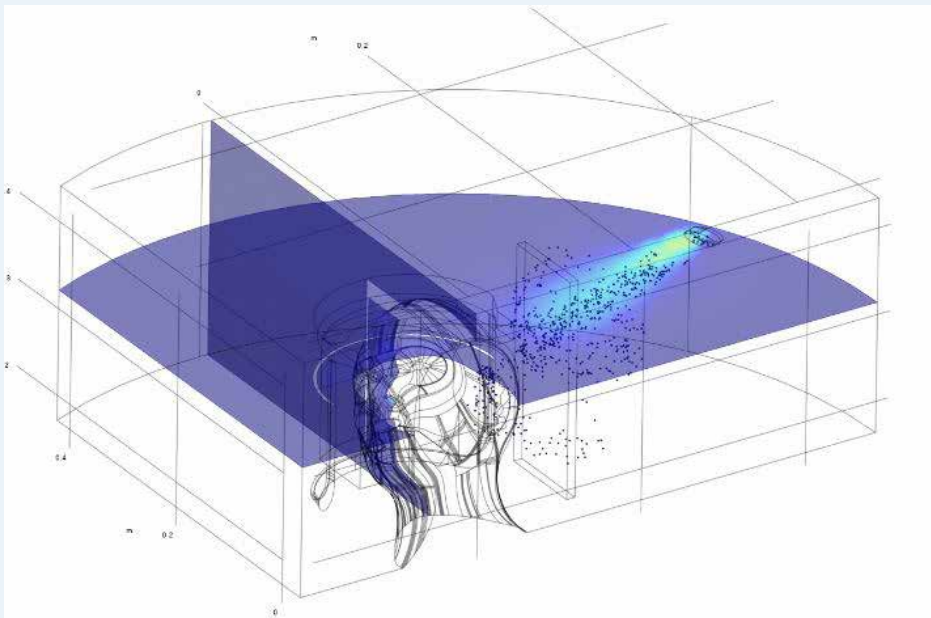
Le laboratoire, par le biais de ses moyens techniques et scientifiques, s'implique également dans des applications avec une forte composante d'innovation et à destination de la société. Ainsi, le laboratoire a soutenu le dépôt d'une déclaration d'invention auprès du CNRS d'une protection respiratoire active, permettant de protéger le personnel médical. Ce projet est né suite au développement de modèles précis de diffusion d'aérosol sur un mannequin numérique humain, cette bonne compréhension des flux respiratoires et nous a conduit à la conception de protections respiratoire d'un nouveau genre permettant de

pallier l'usage des masques et leurs défauts inhérents (gêne respiratoire, impossibilité de parler, buée, etc...).

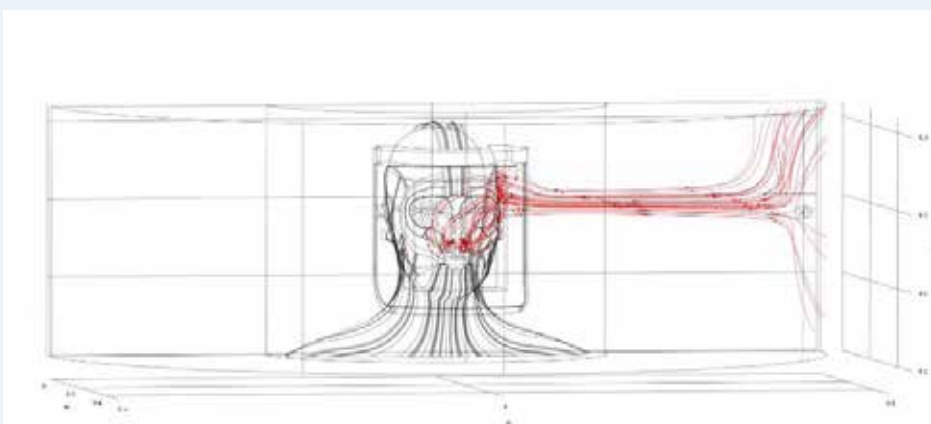
Ce projet est actuellement mené par un ingénieur du laboratoire et a été lauréat en 2023 du concours MyStartUp program de Sorbonne Université.

Une étude de marché a été commanditée par la SATT Lutec dont le résultat nous a été transmis en décembre 2023, et a permis d'évaluer l'étendue du potentiel applicatif de l'invention.

Actuellement le projet est dans la phase de l'étude des certifications selon les marchés cibles et de dépôt de brevet pour pérenniser la propriété industrielle.



Représentation d'un mannequin numérique et des gouttes d'aérosols lors d'un éternuement.



Représentation des lignes de flux entre un mannequin numérique qui respire sous une visière, et une personne qui éternue : les visières standard ne protègent pas.

Science ouverte

La recherche est face à un défi majeur : préserver, partager et ouvrir les données qu'elle produit, pour favoriser une science ouverte, transparente et cumulative, au service de toutes et tous, des équipes de recherche mais aussi de la société dans son ensemble.

Par définition « la science ouverte » est la diffusion des résultats, des méthodes et des produits de la recherche scientifique. Elle s'appuie sur l'opportunité que représente la mutation numérique pour développer l'accès ouvert aux publications et aux données, aux codes sources et aux méthodes de la recherche.

Dans ce cadre le laboratoire est impliqué dans le projet DOP2I pour données ouvertes pour les deux infinis. Il s'agit d'un master projet de l'IN2P3 qui a pour objectif :

- recenser les actions déjà en cours à l'IN2P3 et dans nos collaborations ;

- recenser les besoins non couverts, définir les outils et les services nécessaires ;
- participer à la réflexion sur la structuration que doivent prendre ces activités au sein de l'IN2P3 ;
- définir l'articulation des activités au sein de l'IN2P3 avec celles développées à l'internationale (Europe, EOSC, ministère, CNRS, universités).

Des discussions sont en cours et une première journée des données ouvertes sera organisée en mai 2024.

Notons que le projet Pycoa, initié lors de la première vague de Covid19, est par essence dans cette mouvance des données ouvertes. Depuis peu l'ensemble du code source et des données sont sur le dépôt Zenodo, basé au CERN.

Chargé de mission « science ouverte » :
Francesco Polci puis désormais Olivier Dadoun



Open Science

Le projet ADOCO (Analyser les DONnées du COvid), partie intégrante de l'outil Pycoa

Initié lors de la première pandémie de la Covid19, l'outil Pycoa a été initialement prévu pour permettre son analyse épidémiologique (voir www.pycoa.fr et voir le précédent rapport d'activité).

Face aux succès des différents ateliers organisés depuis 2021 (Fête de la science, salon des maths, masterclass lycéennes) nous avons imaginé notre logiciel comme un outil beaucoup plus générique : Pycoa permet l'analyse de tout type de données ouvertes présentant une structure temporelle et géographique.

Parce que l'environnement médiatique contemporain place souvent les citoyennes et les citoyens dans un état de consommation forcé, notre outil a été pensé pour permettre à chacune et chacun d'avoir une démarche active face à l'information, tout en développant la littératie numérique.

L'outil est désormais suffisamment mûr pour que le projet aille plus loin : diffuser à plus grande échelle pour une appropriation massive et une analyse de

ces données. C'est l'objet du projet ADOCO, lauréat 2023 de l'appel à projet de l'Institut Covid-19 Ad Memoriam (IC19AM) de UPCité et l'IRD.

Le projet ADOCO - pour Analyser les DONnées du COVID - dont la brique élémentaire logicielle est PyCoA, a pour but principal d'y remédier en élargissant le périmètre du public en capacité d'accéder, de manière pérenne, aux données épidémiologiques de la COVID-19.

Outre la finalisation du code et la documentation de Pycoa, le projet a pour but de sauvegarder durablement des données libres actuellement disponibles de la Covid19, et qui restent éphémères. Ce projet s'inscrit donc dans la continuité des objectifs de l'institut IC19AM, à savoir de constituer un lieu de mémoire active et numérique avec la société civile et les chercheurs.euses pour penser ensemble la pandémie Covid-19.

Équipe PyCoA/ADOCO :

Tristan BEAU, Olivier DADOUN, Julien Browaey (laboratoire MSC UPCité). À l'équipe, on ajoutera Aurélien BAILLY-REYRE et Amar HAMI pour le développement et le support d'instance Jupyter sur le cloud du laboratoire. Par ailleurs, entre 2022 et 2023, cinq stagiaires ont été accueilli.es pour contribuer au projet.



ADOCO lors du 24^{ème} salon culture et jeux mathématiques (2023).

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 (<https://formation.in2p3.fr/>) permettent d'assurer la cohérence de la mise en œuvre de celles-ci, en particulier avec des réunions des correspondants formations des laboratoires. 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, en concertation avec les responsables de service dans le plan de formation de l'unité qui est soumis à la DR02, à l'IFSEM (<https://formation.ifsem.cnrs.fr/>) et au service formation de l'institut.

Près de 200 actions de formation ont été réalisées pour un total de 525 jours, presque 50% de plus que sur la période précédente en pleine pandémie. Environ 45 agents ont suivi une formation chaque année, principalement des personnels ITA ou IATSS, mais aussi quelques chercheur.euses. Les

formations dédiées à l'évolution des métiers sont prépondérantes. Celles concernant la sécurité sont obligatoires et prioritaires pour le laboratoire qui se doit d'offrir 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 au e-learning mais aussi assurées par et pour des personnels du laboratoire particulièrement sur les techniques d'intelligence artificielles. Enfin, les étudiant.es 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", "École de Gif", "SIMDET", "ANF Conteneurisation" ...

Chargé de mission formation :

Frédéric Derue

CHIFFRES CLEFS

525 jours de formation.

Ikigai : gamification des formations, médiation scientifique et culturelle

Ikigai est un portail de jeux vidéo éducatifs à destination du public étudiant. Il se destine à un usage généralisé à l'ensemble de l'enseignement supérieur français à court terme, puis à l'ensemble de l'enseignement secondaire et au grand public. Porté initialement par Sorbonne Université, il est depuis 2021 géré 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 étudiant.es.

En quelques années, le jeu vidéo est devenu un phénomène de société 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 joueur.euses arrivé à maturité.

La plateforme Ikigai se compose de 3 parties principales : le portail web mettant à disposition les jeux vidéo, les jeux et les services associés pour les enseignant.es et les étudiant.es, et une solution de récupération et de traitement des données de jeux (Learning Analytics) conçue selon un modèle de Edge Computing respectant l'esprit du projet européen GAIA-X. Elle permettra l'obtention d'importants volumes de données permettant le développement de recherches ambitieuses en pédagogie et en didactique. Les données des différents établissements partenaires seront anonymisées pour être mises à disposition de projets de recherche mis en œuvre au sein du réseau d'établissements partenaires.

Ikigai est 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 le professeur Bertrand Laforge (équipe MIF du LPNHE) qui a initié et porte ce projet depuis plus de 6 ans et qui préside depuis 2020 l'association Games for Citizens qui est désormais le support administratif du consortium. Le projet est activement soutenu par le ministère de la Culture, le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche ainsi, par le ministère de l'éducation nationale et par la région Île-de-France.

En décembre 2023, après une phase d'expérimentation, la plateforme IKIGAI lance sa première application d'apprentissage à l'échelle nationale ([voir visuel ci-dessous](#)).



La plateforme Ikigai offre également des opportunités en termes de médiation de la science auprès du grand public ou de publics d'experts impliqués dans des organisations traitant de sujets sociétaux comme le changement climatique ou la conservation de la biodiversité. Inscrite au RNSR, l'association Games for Citizens qui porte la plateforme Ikigai peut accompagner les organismes de recherche dans le cadre de projets financés par l'ANR ou l'Europe. Elle offre également des outils d'animation de collectifs de travail comme ce fut le cas ce 22 décembre 2023 pour sensibiliser les personnels du laboratoire à la lutte contre le sexisme.

Chercheur :
Bertrand Laforge

CHIFFRES CLEFS

13 jeux éducatifs
produits depuis 2020.

Revalorisation du patrimoine

Les chercheur.euses, ingénieur.es ou technicien.nes n'ont la plupart du temps pas conscience de la valeur historique des témoignages de leurs activités. Ainsi au fil du temps les couloirs et sous-sols du LPNHE, regorgent d'appareils, de photographies, de plans ou encore de documentations techniques. Ils sont généralement peu ou pas exploités. Plusieurs projets en 2023 ont permis de revaloriser une partie de ce patrimoine.

Le Kennedy 9000 & le Chadac

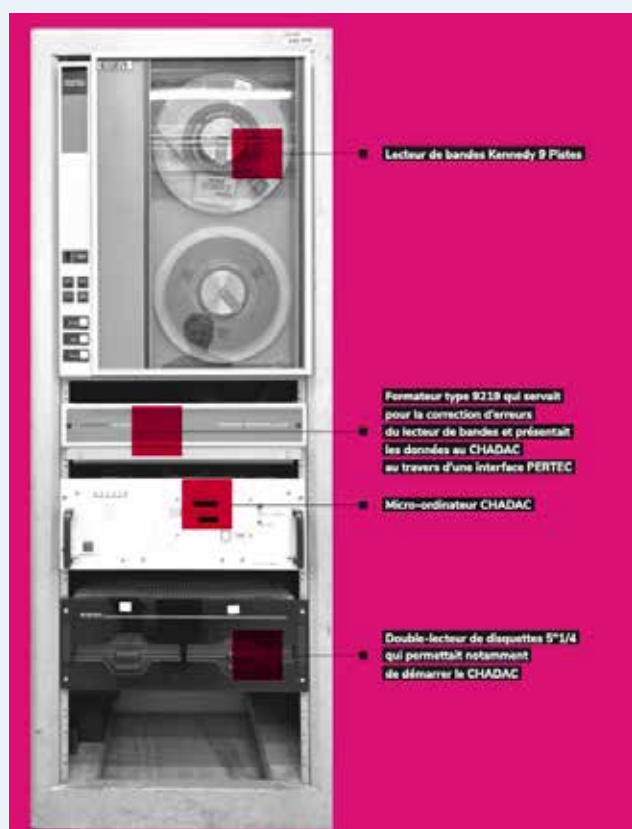


Image extrait du cartel qui accompagne l'exposition du Chadac au musée de l'informatique au CCIN2P3.

Le projet initial était de relire des bandes magnétiques de données de DELPHI dans le cadre d'un projet pour la fête de la science. Nous avons sollicité des informaticien.nes du CCIN2P3 pour avoir leurs avis et leurs expertises. Il est apparu au cours des discussions que notre matériel était unique en France. En effet le Chadac est une machine d'acquisition multiprocesseur à base de 8086 unique en son genre (c.f. rapport activité LPNHE 1981). Jusqu'à présent, il était entreposé au deuxième étage dans la salle des imprimantes et montré de manière épisodique. En assurer la conservation était donc d'une impor-

tance capitale non seulement pour l'histoire de notre discipline mais aussi pour l'histoire de l'informatique Français. Pour valoriser pleinement ce matériel la décision a été prise de donner le Kennedy 9000 ainsi que le Chadac au CCIN2P3 où il a trouvé une place privilégiée dans la collection informatique de leur musée (arrivé du matériel en septembre 2023).

La chambre à brouillard

La chambre à brouillard du laboratoire voyait sa surface de détection s'appauvrir au cours du temps (atteignant à peine 30%). De plus les roues ne permettaient plus de la déplacer facilement. Une cure de jouvence était désormais nécessaire, dont les modifications essentielles sont : changement du condensateur, des roues et de la plaque d'aluminium noire de détection.

Fort de ces modifications la chambre à brouillard a pu être transportée dans une galerie du 11^{ème} arrondissement à Paris pour une exposition Art-Science dans le cadre de l'année de la physique 2023/2024. Dans cette exposition organisée à l'association L'ahah (<https://lahah.fr/>) du 20 octobre au 16 décembre 2023, six artistes ont réalisé des œuvres - peintures, sculptures, installations vidéo, dispositif sonore - en résonance avec l'interface, la chambre à brouillard, mais aussi avec son dessein: révéler la trace de quelque chose qui nous traverse et dont nous n'avons pas réellement conscience.

À l'issue de cette exposition une publication a été réalisée ainsi qu'un site web : www.chambreabrouillard.fr



L'exposition est centré sur la chambre à brouillard du LPNHE. Six artistes ont réalisé des œuvres en résonance avec le dessein de cet appareil: révéler la trace de quelque chose qui nous traverse et dont nous n'avons pas réellement conscience.

Maison du patrimoine informatique et numérique en France

Il s'agit d'un projet porté par le CNAM, pour créer un musée nationale du patrimoine informatique Français. Des premiers jalons et contacts ont été initiés avec le CCIN2P3, le Palais de la Découverte et la Cité des Sciences et de l'Industrie.

Notons qu'une rencontre avec la Direction des Expositions universcience a permis de retrouver la trace de la « table de dépouillement de clichés de chambre à bulles » donnée à la Cité de Sciences et de l'industrie le 1^{er} octobre 1992. Cette dernière est actuellement entreposée dans la Halle aux cuirs (fiche descriptive 2583 de la Cité de Sciences et de l'industrie).

La sauvegarde du patrimoine scientifique apparaît comme une action pluridisciplinaire, dont l'initiative revient, bien entendu, aux scientifiques mais qui peut également faire appel à des spécialistes de l'histoire des sciences, de la pédagogie et de la communication scientifique. Dans ce cadre des collaborations pourraient être envisagées avec d'autres laboratoires ou département de Sorbonne Université et de l'Université de Paris Cité.

Porteur des projets de valorisation du patrimoine scientifique :

Olivier Dadoun



INDEX DES ACRONYMES

A

AAT : Anglo-Australian Telescope
ACF : Anisotropic Conductive Films
ACP : Anisotropic Conductive Pastes
ADOCO : projet Analyser les DONnées de la COvid
ADS : Astrophysics Data System
AGN : Active Galaxy Nuclei
AI : Artificial Intelligence
ALP : Axion Like Particle
AMA : Asymétrie Matière Antimatière (équipe LPNHE)
AMI : Appel à Manifestation d'Intérêt
ANF : Action Nationale de Formation
ANR : Agence Nationale de la Recherche
AP : Assistant.e de Prévention
APC : laboratoire AstroParticule et Cosmologie (Paris)
ARCES : Association des Responsables de Communication de l'Enseignement Supérieur
ARM : Advanced RISC Machines
ASIC : Application-Specific Integrated Circuit
ATLAS : A Toroidal LHC Apparatus (détecteur auprès du LHC)
ATOM : Automated Telescope for Optical Monitoring

B

BAO : Baryon Acoustic Oscillations
BEGES : Bilan des Émissions des GES
BEH : mécanisme de Brout-Englert-Higgs
BESIII : BEIJing Spectrometer 3
BGA : Ball Grid Array package
BGS : Bright Galaxy Survey
BOSS : Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
BSU : Bibliothèque de Sorbonne Université
BTS : Brevet de Technicien Supérieur

C

CA : Conseil d'Administration
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CBHE : Capacity Building for Higher Education (programme ERASMUS)
CBIC : Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional
CBP : Collimated Beam Projector
CCD : Charge Coupled Device
CCIN2P3 : Centre de Calcul de l'IN2P3
CDD : Contrat de travail à Durée Déterminée
CDI : Contrat de travail à Durée Indéterminée
CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
CEM : Compatibilité ÉlectroMagnétique
CEPC : Circular Electron Positron Collider
CERN : Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (laboratoire européen pour la physique des particules, Genève)
CKM : matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
CL : Conseil de Laboratoire
CLAP : Capteur à LA Pointe
CLFV : Charged Lepton Flavor Violation
CLHSCT : Comité Local d'Hygiène, Sécurité, et Conditions de Travail
CMA : Compétences et Métiers d'Avenir
CMD : Cryogenic Magnetic Detector (détecteur sur collisionneur e+e-, Novosibirsk)
CMOS : Complementary Metal Oxyde Semi-conductor
CMS : Compact Muon Solenoid (détecteur auprès du LHC)
CNAM : Conservatoire National des Arts et Métiers
CNES : Centre National d'Études Spatiales
CNN : Convolutional Neural Network
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CNU : Conseil National des Universités
COEN : COsmologie et Énergie Noire (équipe LPNHE)
COFECUB : Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil
COMET : COherent Muon to Electron Transitions
COPILOT : COmité de Pilotage
COPIN : Consortium Polonais des Institutions Nucléaires
COREGAL : CORepondant.e ÉGALité
COVID : COronaVirus Disease
CP : Charge-Parity
CPL : Commission du Personnel Locale
CPPM : Centre de Physique des Particules de Marseille

CPU : Central Processing Unit
CRP : Conseiller en RadioProtection
CRV : Cosmic Ray Veto
CS : Conseil Scientifique
CSC : Chinese Scholarship Council
CTA : Cherenkov Telescope Array

D

DAMIC : DArk Matter In CCD
DAMIC-M : DAMIC in Modane
DARWIN : DArk matter WImp search with liquid xenON
DATI : Dispositif d'Alarme du Travailleur Isolé
DD : Développement Durable
DELPHI : DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification (détecteur auprès du LEP)
DESC : Dark Energy Science Collaboration
DESI : Dark Energy Spectroscopic Instrument
DESY : Deutsches Elektronen-Synchrotron
DHMZ : Davier, Hoecker, Malaescu, Zhang (methodologie)
DIM : Domaine d'Intérêt Majeur
DIRAC : Distributed Infrastructure with Remote Agent Control
DIVE : Di-Higgs in VBF Events
DM : Dark Matter
DNE : Direction du Numérique pour l'éducation
DOI : Digital Object Identifier
DR : Directeur.ice de Recherche
DRD : Detector R&D
DRU : Data Rate Unit (1 DRU = 1 événement par keV et par kg)
DTBP : Digital Trigger Back Plane
DU : Directeur.ice d'Unité
DUNE : Deep Underground Neutrino Experiment

E

EC : Enseignant.e chercheur.euse
ECFA : European Committee for Future Accelerators
ED : École Doctorale
EDITE : École Doctorale Informatique, Télécommunications et Electronique
EDM : Moment Dipolaire Électrique
EDR : Early Data Release
EDRIS : Estimation de Distance pour les Relevés Incomplets de Supernovas
EGES : Émission des Gaz à Effet de Serre
EGI : European Grid Infrastructure
EI : Élève Ingénieur
EIC : Electron-Ion Collider (futur projet aux USA)
ENS : École Normale Supérieure
EOS : EOS Open Storage (acronyme auto-récursif)
EOSC : European Open Science Cloud
ERASMUS : EuRopean Action Scheme for the Mobility of University Students
ERC : European Research Council
ESPCI : École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de la ville de Paris
ESPP : European Strategy for Particle Physics

F

F4SCT : Formations Spécialisées de Service en matière de Santé, de Sécurité et des Conditions de Travail
FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur
FBK : Fondazione Bruno Kessler
FCC : Future Circular Collider
FCNC : Flavour Changing Neutral Current
FCPPL : France-China Particle Physics Laboratory
FCU : Formation Continue Universitaire
FEB : Front End Board
FEC : Front End Card (for T2K-II)
FJPL : France-Japan Particle Physics Laboratory
FKPL : France-Korea Particle Physics Laboratory
FPGA : Field-Programmable Gate Arrays (circuit logique programmable)
FRIF : Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales
FSI : Faculté des Sciences et Ingénierie (de SU)
FSRQ : Flat Spectrum Radio Quasar

G

GBCP : Gestion Budgétaire et Comptable Publique
GdR : Groupement de Recherche

GES : Gaz à Effet de Serre
GESLAB : outil de GESion financière des LABoratoires
GFC : Game for Citizens
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
GLAM : GaLaxy Mocks
GLPI : outil de Gestion Libre de Parc Informatique
GNN : Graph Neural Networks
GNSS : Global Navigation Satellite System
GPS : Global Positioning System
GPU : Graphics Processing Unit
GRAND : Giant Radio Array for Neutrino Detection
GRB : Gamma Ray Burst
GRIF : Grille en Île-de-France

H

HCERES : Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
HDR : Habilitation à Diriger les Recherches
HEP : High Energy Physics
HESS : High Energy Stereoscopic System
HFLAV : Heavy Flavor Averaging Group
HGTD : High Granularity Timing Detector
HK : HyperKamiokande
HKND : HyperKamiokande Near Detector
HL : High Luminosity
HLLHC : High Luminosity (phasis of the) Large Hadron Collider
HLs : Hidden Local Symetry
HLT : High Level Trigger
HSC : Hyper Suprime Cam (caméra installée sur le télescope Subaru)
HVP : Hadronic Vacuum Polarisation

I

IA : Intelligence Artificielle
IAP : Institut Astrophysique de Paris
IATSS : personnels Ingénieurs, Administratifs, Techniques, Sociaux et de Santé
IB : Interface Board
IBL : Inserted B Layer (in ATLAS)
IBM : International Business Machines corporation
IBPC : Institut de Biologie Physico-Chimique (Paris)
IC19AM : Institut Covid 19 Ad Memoriam (UPCité, IRD)
IDEX : Initiative D'EXcellence
IDF : Île-de-France
IDPASC : International Doctorate Network in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFAE : Institut de Fisica d'Altes Energies (Barcelona)
ILC : International Linear Collider
ILP : Institut Lagrange de Paris
IML : Inter-experiment Machine Learning
IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
INSP : Institut des NanoSciences de Paris
IP2I : Institut des 2 Infinis (de Lyon)
IPC : Institute of Printed Circuits (standard de qualité)
IPHC : Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (Strasbourg)
IPI : Initiative Physiques des Infinis (de SU)
IPMU : Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Tokyo)
IPN : Institut de Physique Nucléaire (Orsay)
IRAP : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
IRFU : Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (CEA)
IRL : International Research Laboratory
IRN : International Research Network
ISO : International Organization for Standardization
ISSN : International Standard Serial Number
IT : personnels Ingénieurs et Techniciens
ITA : personnels Ingénieurs, Techniciens et Administratifs
ITK : Inner TraKer (de ATLAS)
ITN : Innovative Training Networks
IUT : Institut Universitaire de Technologie

J

JPARC : Japan Proton Accelerator Research Complex
JPEG : Joint Photographic Experts Group
JRJC : Journées de Rencontres Jeunes Chercheurs

K

KDP : Key Decision Point

L

L1/L2/L3 : année de Licence
LABEX : Laboratoire d'Excellence
LACoNGA : Latin American alliance for Capacity buildiNG in Advanced physics
LAL : Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (Orsay)
LAPP : Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules
LAT : Large Area Telescope (instrument à bord du satellite Fermi)
LBC : Low Background Chamber
LBL : Low Background Level
LCG : LHC Computing Grid
LCQB : Laboratory of Computational and Quantitative Biology (Paris)
LED : Light-Emitting Diode
LEMAÎTRE : Latest Extended Mapping of Acceleration with an Independent Trove of Redshifted Explosions
LEP : Large Electron-Positron Collider (CERN)
LERMA : Laboratoire d'Études du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères (Paris)
LESIA : Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (Paris)
LFV : Lepton Flavor Violation
LHC : Large Hadron Collider (CERN)
LHCb : Large Hadron Collider Beauty (détecteur auprès du LHC)
LHCC : LHC Conclil
LIA : Laboratoire International Associé
LIP6 : Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (SU)
LJP : Lund Jet Plane
LLR : Laboratoire Leprince-Ringuet (École Polytechnique, Palaiseau)
LNv : Leptonic Number Violation
LOC : Local Organizing Committee
LPC : Laboratoire de Physique de Clermont
LPENS : Laboratoire de Physique de l'ENS (Paris)
LPNHE : Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies (Paris)
LPP : Laboratoire de Physique des Plasmas (École Polytechnique, Palaiseau)
LPSC : Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (Grenoble)
LPTENS : Laboratoire de Physique Théorique de l'ENS (Paris)
LPTHE : Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Énergies (Paris)
LSM : Laboratoire Souterrain de Modane
LSST : Large Synoptic Survey Telescope
LST : Large-Sized Telescopes
LULI : Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (École Polytechnique, Palaiseau)
LZ : LUX-ZEPLIN (experiment)

M

M1/M2 : première ou deuxième année de Master
MAGIC : Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope
MC : Monte Carlo (technique)
MCF : Maître de Conférences
MENJS : Ministère de l'Éducation Nationale, de la Jeunesse et des Sports
MESRI : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de l'Innovation
MET : Missing Transverse Energy
MIDAS : Maximum Integrated Data Acquisition System
MIF : Masses et Interactions Fondamentales (équipe LPNHE)
ML : Machine Learning
MS : Modèle Standard (de la physique des particules)
MSC : laboratoire Matière et Systèmes Complexes (Paris)
MST : Medium-Sized Telescope

N

NACRES : Nomenclature Achats Recherche Enseignement Supérieur
NASA : National Aeronautics and Space Administration (USA)
ND : Near Detector
NEPAL : Noyaux Et Particules Au Lycée (conférences)
NIST : National Institute of Standards and Technology (USA)
NMC : Nectar Module Controller (on CTA)
NN : Neural Network
NP : Nouvelle Physique
NPAC : parcours Noyau, Particules, Astroparticules et Cosmologie (M2)

O

OHP : Observatoire de Haute Provence
ONNX : Open Neural Network Exchange (écosystème IA open-source)

P

PCB : Printed Circuit Board
PDU : Power Distributed Units

PFS : Prime Focus Spectrograph (monté sur le télescope Subaru)
PHENICS : Particles, Hadrons, Energy, Nuclei, Instrumentation, Imaging, Cosmos et Simulation (école doctorale Paris Saclay)
PI : Principal Investigator
PIB : Produit Intérieur Brut
PIF : Physique en Île-de-France (école doctorale)
PKS : ParkES Radio Sources Catalogue
PM : PhotoMultiplieur (en français)
PMT : Photo-Multiplier Tube (en anglais)
PNGC : Programme National de Cosmologie et Galaxies
PR : PRofesseur.e (d'université)
PTI : Prévention du Travailleur Isolé
PUMA : avis de PUBlicité pour les Marchés à procédure Adaptée

Q

QCD : Quantum ChromoDynamics
QED : Quantum ElectroDynamics
QFN : Quad Flat No-leads package

R

RCMN : Rayons Cosmiques et Matière Noire (équipe LPNHE)
R&D : Recherche et Développement
RENATER : RÉseau NAtional de Télécommunications pour la technologie, l'Enseignement et la Recherche
RGE : Renormalisation Group Equation
RH : (service des) Ressources Humaines
RISC : Reduced Instruction Set Computer
RNSR : Registre National des Structures de Recherche
ROHS : Restriction Of Hazardous Substances
RSL : Référent Sécurité Laser
RTA : Real Time Analysis (projet LHCb)

S

SATT : Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies
SBNA : Soutien de Base Non Affecté
SCTD : Service Central du Traitement de la Dépense
SDSS : Sloan Digital Sky Survey
SESAME : dispositif francilien de soutien aux projets de recherche nécessitant l'achat de matériel
SFP : Société Française de Physique
SHINE : SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment
SIFAC : Système d'Information, Financier Analytique et Comptable
SIPM : photomultiplicateur en silicium
SIRHUS : Système d'Information Ressources Humaines des Unités et des Services
SK : Super Kamiokande
SLAC : Stanford Linear Accelerator Center
SM : Standard Model
SMARTHEP : Synergies between Machine Learning, Real Time analysis and Hybrid architectures for efficient Event Processing
SN : SuperNova
SNLS : Supernova Legacy Survey
SNOLAB : Sudbury Neutrino Observatory Laboratory (Canada)
SOC : Scientific Organizing Committee
SPP : Service de Physique des Particules (CEA)
SPS : Super Proton Synchrotron (CERN)
SSP : Subaru Strategic Program
SST : Small-Sized Telescope / Sauveteur Secouriste du Travail
STEPUP : ED Sciences de la Terre et de l'Environnement et Physique de l'Univers de Paris
SU : Sorbonne Université
SUDOC : Système Universitaire de DOCumentation
SYRTE : laboratoire SYstèmes de Référence Temps-Espace (Observatoire / SU)

T

T2K : Tokai to Kamioka experiment
TDCM : Trigger and Data Concentrator Module
TDR : Technical Design Report
TP : Travaux Pratiques
TPC : Time Projection Chamber
TV : TéléVision

U

UCLA : University of California, Los Angeles
UDP : User Datagram Protocol (protocole sur internet)
UE : Unité d'Enseignement
UFR : Unité de Formation et de Recherche
UK : United Kingdom

UMR : Unité Mixte de Recherche
UPCité : Université Paris Cité
USA : United States of America
UTC : Coordinated Universal Time

V

VBF : Vector Boson Fusion
VBS : Vector Boson Scattering
VERITAS : Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System
VHDL : VHASIC2 Hardware Description Language
VHSIC : Very High Speed Integrated Circuit
VIL : Violation de l'Invariance de Lorentz
VLT : Very Large Telescope
VUV : Vacuum UltraViolet

W

WG : Working Group
WIMP : Weakly Interactive Massive Particle
WLCG : World LHC Computing Grid
WP : Work Package

X

XENON : XENON Dark Matter Search Experiment
XLZD : Dark Matter Detection Consortium (XENON, LZ and DARWIN experiments)

Z

ZTF : Zwicky Transient Facility

Directeur de la publication

Marco Zito

Coordination éditoriale

Tristan Beau

Comité de rédaction

Tristan Beau, Isabelle Cossin, Olivier Dadoun, Guillaume Daubard,
Mathieu Guigue, Jean-Philippe Lenain, Évelyne Méphane,
Jean-Luc Meunier, Pauline Zarrouk, Marco Zito

Remerciements à

José Ocariz, Sophie Trincaz-Duvoid

Conception graphique

Jean-Jacques Daigremont

Crédits photos

CERN ; collaborations ATLAS, COMET, CTA, DAMIC-M, DarkSide, DESI,
FCC, GRAND, HESS, LHCb, StarDICE, T2K, XENON, ZTF ; Palomar
Observatory / Caltech ; V.Rubin Observatory; Kamioka Observatory,
ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo ;
Sorbonne Université - Faculté des Sciences et d'Ingénierie ; pycoa.fr ;
Tristan Beau, Stéphanie Beauceron, Eli Ben-Haïm, Julien Bolmont,
Giovanni Calderini, Pascal Corona, Isabelle Cossin, Olivier Dadoun,
Marc Damage (L'Ahah), Eleanor Downing, Nabil Garroum, Louis Ginabat,
Didier Lacour, Didier Laporte, Alexandre Lantheaume, Laurent Le Guillou,
Olivier Martineau, Jean-Luc Meunier, Michaël Roynel, Stefano Russo,
Vera de Sá-Varanda, Sophie Trincaz-Duvoid, Vincent Voisin, Marco Zito.

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

1b avenue de Guitayne

33610 Canejan

Avril 2024

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022
2023

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>